

ÉCOLE DOCTORALE

MECANIQUE, THERMIQUE ET GENIE CIVIL

Année 2007

N° B.U. :

Thèse de DOCTORAT

*Diplôme délivré conjointement par
L'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes*

Spécialité : GENIE MECANIQUE

Présentée et soutenue publiquement par :

FLORENT LAROCHE

le 7 décembre 2007
à l'Ecole Centrale de Nantes

TITRE

**CONTRIBUTION A LA SAUVEGARDE DES OBJETS TECHNIQUES ANCIENS PAR L'ARCHEOLOGIE INDUSTRIELLE AVANCEE.
Proposition d'un Modèle d'information de référence muséologique et d'une
Méthode inter-disciplinaire pour la Capitalisation des connaissances du Patrimoine technique et industriel.**

VOLUME 1/2 - MANUSCRIT

JURY

Président : Philippe DUBE, Professeur d'Histoire à l'UNIVERSITE de LAVAL à QUEBEC, CANADA

Rapporteurs : Améziane AOUSSAT, Professeur des Universités, ENSAM PARIS
André GUILLERME, Professeur titulaire de la chaire d'histoire des techniques, CNAM PARIS

Examineurs : Patrick SERRAFERO, Professeur des Universités associé, ECOLE CENTRALE de LYON
Bruno JACOMY, Conservateur en chef HDR, MUSEE des CONFLUENCES de LYON
Samuel GOMES, Maître de conférences, UNIVERSITE de TECHNOLOGIE de BELFORT-MONTBELIARD
Alain BERNARD, Professeur des Universités, Ecole CENTRALE de NANTES
Michel COTTE, Professeur des Universités émérite, UNIVERSITE de NANTES

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord exprimer toute ma reconnaissance à mes deux directeurs de thèse, Alain BERNARD, Professeur des Universités, spécialisé en GENIE INDUSTRIEL à l'ECOLE CENTRALE DE NANTES, pour la confiance qu'il m'a témoignée en me confiant ce travail de thèse et la liberté qu'il m'a autorisée pour envisager ce travail de recherche fondamentale dans tous ses aspects complexes ; ainsi qu'à Michel COTTE, Professeur émérite des Universités, spécialisé en HISTOIRE DES TECHNIQUES à l'UNIVERSITE DE NANTES, pour ses nombreux conseils amicaux, le temps tout aussi bien formel qu'informel qu'il a partagé avec moi pour me conseiller, sans oublier ses écrits apportant l'expertise nécessaire à la véracité scientifique de ce manuscrit et faisant ainsi progresser ce projet de recherche fondamentale dont la tâche fut sans précédent.

Ce travail multi-disciplinaire m'a amené à côtoyer de nombreux universitaires dans des domaines variés ainsi que des institutions et des entreprises afin d'acquérir les connaissances nécessaires. Je ne saurais être exhaustif dans la liste des personnes m'ayant aidées durant ces trois ans tellement elles sont nombreuses ; aussi, je présente d'ores et déjà mes excuses pour ne pouvoir citer tout le monde et si je fais quelques oublis, ils sont involontaires.

Tout d'abord, je remercie les collègues et leurs étudiants des structures universitaires et de recherche regroupées sous l'appellation Pôle O.S.TIC :

- *Pour l'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBELIARD, Pascal FOURNIER, Pierre LAMARD, Didier KLEIN, Samuel DENIAUD et Yves LEQUIN qui ont su me guider et me conseiller afin de poursuivre dans la voie de la recherche universitaire.*
- *Pour l'IUT de CARQUEFOU de l'UNIVERSITE DE NANTES, Sébastien Le LOCH ainsi que ses trois collègues enseignants et la vingtaine d'étudiants qui ont été les cobayes des projets patrimoine.*
- *Pour l'ECOLE CENTRALE DE NANTES et l'IRCCyN, l'équipe IVGI qui m'a accueillie ainsi que Nicolas PERRY, Guillaume MOREAU, Damien CHABLAT et Corentin L'HOSTIS pour leurs conseils avisés dans les domaines de l'ingénierie ; sans oublier Laurence LOUATRON et la trentaine d'étudiants de l'Ecole qui ont relevé le défi pour m'assister dans les enquêtes, les PER, les projets R&D ou simplement pour leurs contributions spontanées...*
- *Pour l'UNIVERSITE DE NANTES, Stéphane TIRARD, Catherine CUENCA, Virginie CHAMPEAU, Jean-Louis KEROUANTON et tous les membres de l'équipe du CENTRE FRANÇOIS VIETE ainsi que les doyens de la FAC DE SCIENCES et de la FAC DE LETTRES qui croient en notre projet avant-gardiste.*
- *Ainsi que Bruno SUNER et ses étudiants de l'ECOLE D'ARCHITECTURE DE NANTES, Mounira HARZALLAH pour le laboratoire LINA de la FAC DE SCIENCES de l'UNIVERSITE DE NANTES, les enseignants de l'ECOLE DE DESIGN DE NANTES ATLANTIQUE, de l'ECOLE DES BEAUX ARTS DE NANTES, de l'ECOLE POLYTECHNIQUE de l'UNIVERSITE DE NANTES et les trois étudiants de la formation DUTIL, l'équipe IVC de l'IRCCyN...*

Je tiens particulièrement à remercier Olivier ROCHARD, Laurent DEROUENE et Jean-Baptiste MARTIN alors stagiaires et désormais devenus ingénieurs, qui ont été la cheville ouvrière de travaux mécanique et informatique de pointes.

Ce projet de recherche fondamentale n'ayant pas de moyens dédiés pour fonctionner et donc pas de cas d'études de terrain, je ne saurais oublier les institutions et les entreprises qui ont cru dans nos idées et nous ont soutenues :

- *Mickaël SIMMONIN et Gildas BURON, conservateurs du MUSEE DES MARAIS SALANTS de BATZ-SUR-MER,*
- *Patrice NOTTEGHEM et Fabienne BADIAT de l'ECO-MUSEE de la Communauté du CREUSOT-MONCEAU,*
- *Marie-Louise GOERGEN de La MAISON DES HOMMES ET DES TECHNIQUES, ainsi que les anciens de la Navale, Gérard TRIPOTEAU et Jean-Claude MASSON qui ont su me donner l'impulsion nécessaire pour débiter ses travaux de recherche,*
- *Gilbert DARGENT, Jean-Paul FACHE et toute l'équipe du PHI de la DCNS site d'INDRET,*
- *Véronique GRATAS de l'Association ENTREPRISE ET PATRIMOINE ET INDUSTRIEL,*
- *Sans oublier les contributions du MUSEE DES ARTS-ET-METIERS de PARIS, du MUSEE DE L'IMPRIMERIE de NANTES, de l'ECOLE DE LA MARINE MARCHANDE de NANTES, du cabinet d'architecture MOREL MAPPING WORKSHOP, de l'AIP PRIMECA PAYS DE LA LOIRE, de l'ASSOCIATION FRANÇAISE DE PROTOTYPAGE RAPIDE, du LABORATOIRE ARC'ANTIQUE, de la DRAC 44, du CHATEAU DES DUCS DE NANTES, de l'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE TROYES, de l'IUFM DE BREST, des sociétés de numérisation EUROFORM 3D et CREAFORM 3D, du MUSEE D'ORSAY et l'ATELIER DE MOULAGE DU MUSEE DU LOUVRE, de la scierie SCIENS à LA ROCHE-EN-BRENIL, de la SOCIETE MONEGASQUE DE L'ELECTRICITE ET DU GAZ...*

Ce travail ayant été effectué sur plusieurs structures nantaises, je remercie tous les personnels de l'ECOLE CENTRALE et de l'ECOLE POLYTECHNIQUE pour leur attention et le soutien logistique qu'ils m'ont apporté : Bénédicte, Patricia, Nicole, Thérèse, Rachel, Corinne, Sandrine, Nathalie, Dominique, Robert, Philippe, Denis, Olivier, Franck..., et en particulier ma coloc du bureau S410, Karine, qui, sans sa bonne humeur, il aurait parfois été difficile que je me remette à la tâche.

J'adresse également une pensée particulière à tous les étudiants, doctorants, maîtres de conférence et ingénieurs de recherche ou d'étude avec qui j'ai partagé quotidiennement trois ans de ma vie : Catherine, Emilie, Samar, Alexandre, Clément, Davy, Matthieu, Michel, Mickaël, Sébastien... un clin d'œil particulier à mes camarades du COGEN et des SGDF qui m'ont apportés les bouffées d'air frais nécessaires.

Enfin, je ne pourrais finir sans adresser mes remerciements à mes parents et à ma sœur pour la patience dont ils sont su faire preuve et le soutien moral apporté ; ainsi qu'à mes amis qui m'ont toujours soutenus dans ma démarche : Hélène, Faustine, François, Mickaël, Olivier, Corse, Bruno...

Je terminerai en rendant hommage et en dédiant ces travaux de recherche aux nombreux vulgarisateurs scientifiques des siècles passés qui réalisèrent des œuvres sans précédent ; plus particulièrement à Louis FIGUIER à qui j'ai emprunté des extraits des préfaces de ses ouvrages pour ouvrir et clôturer ce manuscrit.

Nous avons étudié le monde ancien, la littérature, l'histoire et la philosophie de la Grèce ou de Rome. Nous sommes parfaitement initiés à l'histoire d'Alexandre et de César, aux faits et gestes de Caton l'ancien et de Denys le tyran, et nous pouvons dire le nombre de galères qui figuraient à la bataille de Salamine. Nous avons la valeur du sesterce romain, du talent et de la mine d'Egypte, de Corinthe et d'Athènes.

[...]

Mais la science est entrée, de nos jours, dans toutes les habitudes de la vie, comme dans les procédés de l'industrie et des arts.

- *Nous voyageons par la vapeur ;*
- *Tous les mécanismes de nos usines sont mus par la vapeur ;*
- *Nous correspondons au moyen d'un courant électrique ;*
- *Nous commandons notre portrait à la chimie ;*
- *Nous nous faisons éclairer par un gaz emprunté à la chimie ;*
- *C'est la chimie qui conserve nos légumes pour la saison de l'hiver ;*
- *Nous demandons à l'électricité de remplacer nos sonnettes ;*
- *...*

[...]

Rechercher l'origine de chacune des principales inventions scientifiques modernes, raconter ses progrès et ses développements successifs, exposer son état actuel et les principes sur lesquels elle est fondée, [...] l'histoire des progrès de l'esprit humain dans la voie scientifique est aussi riche en intérêt, aussi féconde en enseignements qu'aucune autre partie de l'histoire générale.

*Louis FIGUIER
[FIGUIER 1876] [FIGUIER 1896]*

TABLE DES MATIERES

1. PRELIMINAIRES INTRODUCTIFS	13
1.1 Quoi ?	14
1.1.1 Une première approche du patrimoine : La connaissance de l'Humanité.....	14
1.1.2 La science et la technique.....	15
1.2 Qui ?	16
1.2.1 Des rencontres et une idée.....	16
1.2.2 Une première expérience : la presse Bliss	17
1.2.3 Vers un cadre de recherche inter-disciplinaire	19
1.2.4 Un parcours atypique pour un travail de recherche fondamentale peu commun.....	20
1.3 Comment ?	23
1.3.1 La rédaction d'une thèse en Génie Industriel	23
1.3.2 La rédaction d'une thèse en Histoire	25
1.3.3 La rédaction d'une thèse interdisciplinaire en Génie Industriel et en Histoire.....	26
1.3.3.1 Le terrain d'expérimentation.....	27
1.3.3.2 La démarche globale de la recherche.....	27
1.3.3.3 L'outil de modélisation conceptuel déployé.....	30
1.3.3.4 La chronologie globale de la recherche	32
1.3.3.5 La démarche de recherche d'informations et la bibliographie	33
1.3.3.6 Découpage du manuscrit et prescriptions de lecture	35
1.4 Synthèse et hypothèses des apports scientifiques.....	36
2. LA SITUATION DU PATRIMOINE AUJOURD'HUI	39
2.1 Définition du patrimoine	39
2.1.1 Le patrimoine selon l'Unesco.....	40
2.1.2 Le patrimoine matériel : nature et culture	41
2.1.3 Le patrimoine technique et industriel.....	44
2.1.3.1 Vers une approche globalisante : entre Génie Industriel et Histoire des Techniques.....	45
2.1.3.2 Quelques exemples considérés comme patrimoine industriel	47
2.1.3.3 Définition	49
2.1.4 Une problématique sous-jacente : « Et le patrimoine immatériel ? ».....	50
2.1.4.1 Définition	52
2.1.4.2 La science et la technique : un patrimoine immatériel ?.....	52
2.1.5 Synthèse	54
2.2 Comment capitaliser cette connaissance ?	55
2.2.1 Histoire de la culture et du patrimoine en France puis à l'international.....	56
2.2.1.1 La loi de 1792 pour la protection du patrimoine français.....	56
2.2.1.2 La création du Conservatoire des Arts-et-Métiers	57
2.2.1.3 La formation des technologues et les sociétés savantes d'ingénieurs	57
2.2.1.4 Quelques structures françaises d'aide à la valorisation des connaissances immatérielles.....	59
2.2.1.5 Le Ministère Français de la Culture.....	60
2.2.1.6 Les aides aux Musées : OCIM et ICOM.....	61
2.2.1.7 Les structures internationales de sauvegarde.....	62

2.2.2	Des critères pour certifier le patrimoine	62
2.2.2.1	Le code du patrimoine : entre mobilier et immobilier	63
2.2.2.2	Les critères d'authenticité et d'intégrité selon l'Unesco.....	65
2.2.2.3	Synthèse	66
2.3	Synthèse	68

3. L'ARCHEOLOGIE INDUSTRIELLE AVANCEE : ETAT DE L'ART ET PREMIERES HYPOTHESES..... 71

3.1	Hypothèse de niveau 1	71
3.1.1	L'archéologie industrielle	71
3.1.2	Des difficultés liées à la sauvegarde du patrimoine technique et industriel	72
3.1.3	Synthèse.....	74
3.2	Les connaissances et les sources.....	76
3.2.1	Le cycle de vie des objets anciens et le PLC.....	77
3.2.2	Les sources en histoire des techniques	78
3.2.3	Connaissances et Knowledge Management.....	81
3.2.3.1	Du document vers la connaissance.....	82
3.2.3.2	Les méthodes de capitalisation des connaissances en Génie Industriel	84
3.2.4	La génétique ou l'évolution des objets	87
3.3	La conservation par la virtualisation	89
3.3.1	L'avancée des techniques numériques.....	89
3.3.2	Capture d'informations physiques.....	92
3.3.2.1	Les systèmes avec contact physique	92
3.3.2.2	Les systèmes passifs sans contact	93
3.3.2.3	Les systèmes actifs sans contact	94
3.3.2.4	Synthèse et tableau récapitulatif.....	96
3.3.3	Traitement et Reconstruction de modèles 3D à partir de nuages de points numérisés	98
3.3.3.1	Rebouchage du nuage de points.....	98
3.3.3.2	Reconnaissance automatique de formes	98
3.3.3.3	Distinction de pièces/couleurs	99
3.3.3.4	Outils logiciels de traitement et de reconstruction de nuages de points	99
3.3.3.5	Synthèse	100
3.3.4	La modélisation 3D et la dynamique.....	102
3.3.4.1	La modélisation CAO 3D : un peu de théorie	102
3.3.4.2	La modélisation CAO 3D : outils et exemples patrimoniaux	103
3.3.4.3	La simulation numérique 3D+t : outils	104
3.3.4.4	La CAO 3D+t : exemples patrimoniaux	105
3.3.4.5	La modélisation CG 3D et 3D+t : outils.....	106
3.4	La valorisation muséographique par la Réalité Virtuelle	108
3.4.1	Maquette numérique : des utilisations innovantes en GI et en Muséographie.....	108
3.4.1.1	La maquette numérique comme support au prototypage rapide : faits réels	109
3.4.1.2	La maquette numérique comme usage muséographique : hypothèses	110
3.4.2	Vers une nouvelle muséologie.....	112
3.4.2.1	Le public.....	112
3.4.2.2	Audiovisuel et muséologie.....	113
3.4.2.3	Une nouvelle dimension muséologique : l'immersion	115
3.4.2.4	Enquête : les attentes du public par les outils de la Réalité Virtuelle.....	116
3.4.3	Les technologies de Réalité Virtuelle	117
3.4.3.1	Les logiciels de Réalité Virtuelle	118
3.4.3.2	Les formats de 3D et le Web3D.....	119
3.4.3.3	Interopérabilité et portage des données 3D+t.....	122
3.4.3.4	La vision en Réalité Virtuelle : 3D vision et vision immersive	123
3.4.3.5	L'interactivité en Réalité Virtuelle : des interfaces kinesthésiques	124
3.4.3.6	La Réalité Augmentée	127
3.4.4	Perspectives et Applications muséologiques.....	127
3.4.4.1	Réalité Virtuelle dans l'art, l'architecture et l'archéologie	128
3.4.4.2	Interfaces homme/machine et culture technique	131
3.5	Synthèse : problématique et hypothèse de niveau 2	133

4. UN OBJET CONTEXTUALISÉ & TEMPORALISÉ : CAS D'ÉTUDE DE LA MACHINE À VAPEUR PIGUET N°135	135
4.1 Préliminaire : Plan de l'étude	135
4.2 Etude historique linéaire du PLC étendu et étude de la technologie Pigué dans ses contextes.....	139
4.2.1 L'entreprise Pigué : de sa création à la multinationale	139
4.2.1.1 Alphonse Duvergier, un éminent ingénieur : ses débuts dans le métier.....	139
4.2.1.2 La création de l'entreprise Duvergier à Lyon.....	140
4.2.1.3 Pigué & C ^{ie} , les successeurs de Duvergier : de rapides évolutions économiques et sociales	141
4.2.1.4 Courte monographie de la société Pigué et de ses successeurs	143
4.2.2 Le produit Pigué : une machine à vapeur horizontale à cylindre unique, à tiroirs plans et à condenseur.....	145
4.2.2.1 Disposition générale de l'exposition universelle de 1900 en vapeur, en force motrice et en électricité	145
4.2.2.2 Place des machines Pigué dans la galerie des groupes électrogènes.....	146
4.2.2.3 Description générale de la technologie Duvergier : simplicité et efficacité	147
4.2.2.4 Description de la technologie : le cylindre	151
4.2.2.5 Description de la technologie : le piston et l'arbre moteur	152
4.2.2.6 Description de la technologie : les tiroir-plans : fonctionnement, commande et arbres de distribution.....	152
4.2.2.7 Description de la technologie : le condenseur et la pompe à air	154
4.2.2.8 Description de la technologie : fonctionnement normal et entretien	154
4.3 Plusieurs vies pour l'exemplaire n°135.....	156
4.3.1 Les machines à vapeur Pigué aux balbutiements de l'électricité : Monaco	156
4.3.1.1 Les progrès de l'éclairage à la fin du 19 ^{ème} siècle : du gaz à l'électricité.....	156
4.3.1.2 Les installations en gaz et les prémices de l'électricité à Monaco.....	158
4.3.1.3 Descriptif des installations électriques de Monaco.....	159
4.3.1.4 Evolution de la production de gaz et d'électricité à la SBE	163
4.3.2 Une 2 ^{ème} vie pour l'exemplaire n°135 dans la scierie Bonnichon à Moulins (03).....	165
4.3.2.1 Ambiguïté d'appartenance pour cette société monégasque ?	166
4.3.2.2 Remontage de l'exemplaire n°135 à Moulins	166
4.3.2.3 Hypothèses sur les modifications de puissances	168
4.3.3 Une ultime exploitation dans la scierie Brunel à La Roche-en-Brénil (21).....	169
4.3.3.1 Des travaux préliminaires pour accueillir la machine dans la scierie : maçonnerie et chaudière.....	169
4.3.3.2 Un acteur garant de la réussite de la scierie Brunel : l'APAVE	170
4.3.3.3 Installation, modification de puissance et mise en route	172
4.3.3.4 Les installations en force motrice et force électrique de la scierie Brunel	172
4.3.3.5 Une tentative d'augmentation de la force motrice pour la scierie : une potentielle petite sœur ?.....	177
4.3.3.6 Des difficultés de fonctionnement à partir de 1950	178
4.3.3.7 45 ans de vie dans la scierie Brunel.....	180
4.3.4 Une dernière vie pour la machine Pigué n°135 : la sauvegarde patrimoniale	182
4.4 Modélisation 3D et valorisation Web3D.....	185
4.4.1 Méthodologie de conception de la maquette numérique	185
4.4.1.1 Choix du logiciel et modules utilisés.....	185
4.4.1.2 Méthode de modélisation	186
4.4.2 Le travail de modélisation et d'archéologie industrielle avancée	188
4.4.2.1 Rappel des caractéristiques techniques de la machine étudiée.....	188
4.4.2.2 Etude des classes d'équivalence de la cinématique	188
4.4.2.3 Définition des liaisons et schéma cinématique.....	190
4.4.2.4 Modélisation volumique et habillage du squelette	193
4.4.3 Valorisation de la DMU : Applications muséographiques en Web3D	194
4.4.3.1 Développement d'une interface HTML couplée à une base de connaissances	194
4.4.3.2 Application autonome muséographique	197
4.5 Problèmes soulevés par l'étude de la machine Pigué et Perspectives	199
4.5.1 Ancienne machine ou nouvelles machine : quelle DMU pour quelle temporalité ? Un problème de sémantique et de sources.....	199
4.5.2 Complétude de la DMU en vue d'obtenir une maquette numérique de référence : entre détails et environnement complet.....	200
4.5.3 La sécurité dans les musées et la perspective d'une évolution en Réalité Virtuelle	201
4.6 Synthèse du cas d'étude.....	203

5. VERS UN PROCESSUS FORMALISE ET UN SYSTEME D'INFORMATIONS GLOBAL	205
5.1 Analyse du cas d'étude de la machine à vapeur Piguet n°135 : hypothèse n°3	207
5.2 Vers une méthodologie générale et un dossier d'oeuvre patrimonial technique	209
5.2.1 Le processus de patrimonialisation	209
5.2.2 Etat A : La vue Vestiges archéologiques industriels	210
5.2.2.1 Description	210
5.2.2.2 Synthèse	211
5.2.3 Etat B : La vue Dossier d'Oeuvre Patrimonial Technique	212
5.2.3.1 Description	212
5.2.3.2 Synthèse	213
5.2.4 Etat C : La vue Produit numérique final de valorisation	214
5.2.4.1 Description	214
5.2.4.2 Synthèse	215
5.2.5 Synthèse des états du processus de patrimonialisation	216
5.2.5.1 L'objectum : entre les professionnels et les amoureux du patrimoine	218
5.2.5.2 Une transformation d'objets intermédiaires	219
5.2.5.3 Le modèle d'usage générique du processus de patrimonialisation	221
5.3 L'objet technique ancien idéalisé avant patrimonialisation	222
5.3.1 L'objet technique dans son caractère internaliste	223
5.3.1.1 Définition et aspect fonctionnel	223
5.3.1.2 Les caractéristiques	224
5.3.1.3 La structure interne	224
5.3.1.4 Aspect dynamique	225
5.3.1.5 Synthèse : modèle d'usage fonctionnel internaliste de l'objet technique ancien	225
5.3.1.6 Validation du modèle	226
5.3.2 Quel objet pour quel usage ?	227
5.3.2.1 Les usages des objets techniques dans leur état d'origine	227
5.3.2.2 Classification	229
5.3.2.3 Généralisation : le concept des poupées russes	230
5.3.2.4 Synthèse : le concept des boîtes noires / boîtes blanches	231
5.3.3 Un objet dans son environnement : description de ses contextes multi-dimensionnels et multi-temporels	234
5.3.3.1 Les sources du patrimoine technique et industriel	235
5.3.3.2 Un contexte à multi-niveaux pour les objets techniques anciens	237
5.3.3.3 Définition du Système Technique étudié : liens contexte-objet	240
5.3.3.4 Une rupture dans la typologie des objets techniques	241
5.3.3.5 La problématique du temps et l'accumulation de connaissances contextualisantes	243
5.3.3.6 Synthèse : modèle d'usage externaliste de l'objet technique ancien	246
5.3.4 L'homme dans le Système Technique	248
5.3.4.1 L'usage de l'objet technique ancien par l'Homme	248
5.3.4.2 Société et civilisation	250
5.3.4.3 Synthèse : modèle d'usage de l'Homme et de l'objet technique ancien	251
5.4 Vers une ontologie globalisante : le DHRM	253
5.4.1 Modèle comportemental global d'usage de l'objet technique ancien idéalisé : situation d'usage VS situations de vie	253
5.4.2 Vers un modèle unifié	256
5.4.3 La notion de schème	257
5.4.4 Définition du schème et contribution à l'authenticité patrimoniale	258
5.4.5 Le Digital Heritage Reference Model	259
5.5 Synthèse	262
6. APPLICATION ET VALIDATION DU DHRM : CAS D'ETUDE DE LA MACHINE A LAVER LE SEL DE BATZ-SUR-MER	265
6.1 Un nouveau processus d'ingénierie	266
6.1.1 Le processus de conception classique	266
6.1.2 Le rétro-processus de conception contextualisé	267
6.1.2.1 Un schème multi-dimensionnel	268
6.1.2.2 Un schème multi-temporel	269
6.1.2.3 Une nouvelle temporalité : schème a priori et schème rationnel	270
6.2 Cas d'application du DHRM : la machine à laver le sel de Batz-sur-Mer	271

6.2.1	Le terrain archéologique : contexte général et but encouru.....	271
6.2.2	De l'objectum à l'artefact : la sauvegarde d'un objet patrimonial	273
6.2.2.1	Positionnement du schème étudié dans le DHRM et classes impactées.....	273
6.2.2.2	Découverte de l'objet et premiers relevés d'ensemble	274
6.2.2.3	Numérisation 3D et fouilles archéologiques	276
6.2.3	Etude mécanique internaliste via la modélisation 3D : vers un schème a priori	277
6.2.3.1	Positionnement du schème étudié dans le DHRM et classes impactées.....	277
6.2.3.2	Description technique générale du fonctionnement	278
6.2.3.3	Le moteur et l'arbre principal.....	280
6.2.3.4	La chaîne à godets.....	281
6.2.3.5	La trémie	282
6.2.3.6	Les bacs à laver.....	282
6.2.3.7	Le système de circulation de la saumure	284
6.2.3.8	Hypothèses internalistes nécessitant une étude externaliste	285
6.2.4	Le sel : histoire générale et usages	289
6.2.4.1	Positionnement du schème étudié dans le DHRM et classes impactées.....	289
6.2.4.2	Les origines.....	291
6.2.4.3	Un impôt sur le sel en France	292
6.2.4.4	Les différents usages du sel de nos jours	293
6.2.5	La production du sel : récolte et traitement selon sa provenance.....	295
6.2.5.1	Positionnement du schème étudié dans le DHRM et classes impactées.....	295
6.2.5.2	Généralités.....	296
6.2.5.3	Le sel gemme et son traitement artisanal	296
6.2.5.4	Industrialisation contemporaine du processus de minage du sel	298
6.2.5.5	L'eau de mer : composition chimique	301
6.2.5.6	Extraction et récolte du sel marin	302
6.2.5.7	Le travail annuel dans un marais salant.....	304
6.2.5.8	Le traitement du sel de mer aux 19 ^{ème} et 20 ^{ème} siècles.....	306
6.2.5.9	Le traitement du sel de mer au 21 ^{ème} siècle : une solution contemporaine similaire.....	308
6.2.6	Etude externaliste : industrialisation et gestion du lavage du sel dans les magasins Bertrand à Batz-sur-Mer.....	310
6.2.6.1	Positionnement du schème étudié dans le DHRM et classes impactées.....	310
6.2.6.2	La chaîne opératoire de lavage du sel dans les magasins Bertrand.....	311
6.2.6.3	La commercialisation du sel : conditionnement et transport.....	312
6.2.6.4	Le problème de la saumure : alimentation et vidage des cuves.....	314
6.2.6.5	Le site et le processus de production	315
6.2.7	L'entreprise Bertrand de négoce de sels marins	320
6.2.7.1	Positionnement du schème étudié dans le DHRM et classes impactées.....	320
6.2.7.2	Les origines de l'entreprise	321
6.2.7.3	Un patrimoine familial : l'entreprise Bertrand.....	322
6.2.7.4	Usage courant et maintenance	323
6.2.8	Le sel en Bretagne : un contexte socio-économique changeant	324
6.2.8.1	Positionnement du schème étudié dans le DHRM et classes impactées.....	324
6.2.8.2	L'après révolution française : des conséquences difficiles sur la première moitié du 19 ^{ème} siècle.....	325
6.2.8.3	Un déclin en chute libre.....	326
6.2.8.4	Une renaissance progressive : la Société Coopérative Agricole.....	328
6.2.9	Bilan d'utilisation du DHRM et schème rationnel de la machine étudiée.....	330
6.3	Enrichissement du DHRM par l'apport de la numérisation 3D	333
6.3.1	Le contexte de la numérisation 3D des objets patrimoniaux	333
6.3.2	Caractérisation des bribes des vestiges archéologiques.....	333
6.3.3	Critères de numérisation 3D et arbre décisionnel.....	334
6.3.4	Positionnement et enrichissement du DHRM	336
6.4	Cas d'application de numérisation 3D et étude mécanique approfondie : la machine à laver le sel de Batz-sur-Mer	338
6.4.1	Numérisation 3D de la laverie dans son intégralité	338
6.4.2	Numérisation 3D de détails de composants de la laverie	339
6.4.3	Etude mécanique internaliste approfondie de la capacité de production de l'entreprise Bertrand.....	342
6.4.3.1	Le moteur et l'arbre principal.....	342
6.4.3.2	La chaîne à godets et la première gouttière	343
6.4.3.3	La trémie	343
6.4.3.4	Les bacs.....	344
6.4.3.5	La gouttière finale et la brouette.....	345
6.4.3.6	Conclusion du rendement et validation par les données historiques.....	346
6.5	Synthèse et perspectives du cas d'étude	348

7. ENRICHISSEMENT DU DHRM ET INTERET DES MAQUETTES NUMERIQUES DE PATRIMOINE : CAS D'ETUDES.....	351
7.1 Le processus de patrimonialisation comme outil de valorisation	352
7.1.1 Vers une utilisation didactique des objets techniques anciens	352
7.1.1.1 Hypothèse : la spirale patrimoniale.....	352
7.1.1.2 Les projets tutorés universitaires : quels moyens pour quels objectifs ?	353
7.1.1.3 La culture technique : intérêt pédagogique des projets de sauvegarde du patrimoine industriel sous une forme numérique	353
7.1.2 Etude de cas : les Machines d'imprimerie.....	354
7.1.2.1 Contexte du projet	354
7.1.2.2 Presse à platine : Contextualisation par l'histoire des techniques	354
7.1.2.3 Presse à Cylindre : Contextualisation par l'histoire des techniques.....	355
7.1.2.4 L'objet technique comme point de départ.....	357
7.1.2.5 Gestion de projet et méthodologie de rétro-conception patrimoniale.....	358
7.1.2.6 Maquette numérique et découvertes techniques	359
7.1.3 Bilan : évolution du DHRM.....	361
7.2 Vers un nouveau processus coopératif d'ingénierie.....	363
7.2.1 Introduction : une problématique multi-points de vues.....	363
7.2.2 Contexte de l'étude de cas : le canot à vapeur de 1861	364
7.2.2.1 Définition du projet et de l'Objectum	364
7.2.2.2 Un projet interdisciplinaire : quelles interactions ?.....	366
7.2.2.3 Le processus de rétro-conception patrimoniale	367
7.2.3 Analyses des composants du canot à vapeur.....	370
7.2.3.1 La coque : reconception d'une pièce surfacique complexe	370
7.2.3.2 Le foyer et la chaudière	371
7.2.3.3 L'alimentation en eau et l'injecteur Giffard.....	372
7.2.3.4 Le réchauffeur et le ballon d'eau alimentaire	373
7.2.3.5 Transmission : machine à vapeur, arbre et hélice	375
7.2.4 Généralisation : Vers des équipes projets inter-disciplinaires pour la patrimonialisation	376
7.2.4.1 Conclusion et perspectives du projet canot	376
7.2.4.2 Les métiers du rétro-processus de conception	377
7.3 Synthèse	380
8. CONCLUSION GENERALE	383
8.1 Contribution des travaux de doctorat.....	384
8.1.1 Le constat sur la conservation du patrimoine technique et industriel aujourd'hui	384
8.1.2 Une méthodologie pour traduire le patrimoine technique et industriel	385
8.1.3 Quelle instrumentalisation pour la patrimonialisation ?	386
8.1.4 Vers une description conceptuelle du domaine étudié.....	387
8.2 Perspectives de valorisation du patrimoine technique et industriel.....	389
8.2.1 Reconstruire les objets d'autrefois ?	389
8.2.2 La maquette virtuelle comme médiateur	390
8.2.3 La Réalité Virtuelle rentre dans les Musées.....	391
8.2.4 La culture technique, un tremplin pour l'innovation	392
8.3 Synthèse générale	393
9. SOURCES IMPRIMEES ET BIBLIOGRAPHIE GENERALE.....	397
9.1 Valorisation des travaux de thèse	397
9.2 Sciences Pour l'Ingénieur	398
9.2.1 Sources et ouvrages généraux	398
9.2.2 Travaux universitaires, Master, Thèses et Habilitations à Diriger les Recherches.....	400
9.2.3 Sources périodiques scientifiques	401
9.2.4 Sources diverses	404
9.3 Sciences Humaines et Sociales	405
9.3.1 Sources et ouvrages généraux	405
9.3.2 Travaux universitaires, Master, Thèses et Habilitations à Diriger les Recherches.....	407
9.3.3 Sources périodiques scientifiques	407
9.3.4 Sources diverses	410

10. SOURCES DU CAS D'ETUDE PIGUET.....	411
10.1 Critique des sources.....	411
10.2 Bibliographie de la machine à vapeur.....	412
10.2.1 Suivi des correspondances.....	412
10.2.2 Rapports de contrôles.....	413
10.2.3 Documents techniques.....	413
10.3 Bibliographie de la chaudière et du système vapeur.....	413
10.3.1 Suivi des correspondances.....	413
10.3.2 Pièces comptables.....	413
10.3.3 Rapports de contrôles - chaudière.....	414
10.3.4 Rapports de contrôles – analyse d'eau.....	414
10.3.5 Documents techniques.....	414
10.4 Bibliographie sur les installations générales.....	415
10.4.1 Rapports de contrôles – installation électrique.....	415
10.4.2 Documents techniques – installations architecturales.....	415
10.5 Iconographie – Scierie Brunel.....	415
10.6 Sources imprimées et bibliographie générale.....	415
10.6.1 Sources et ouvrages généraux.....	415
10.6.2 Sources imprimées périodiques.....	416
10.6.3 Sources diverses.....	416
11. SOURCES DU CAS D'ÉTUDE DE BATZ-SUR-MER.....	417
11.1 Critique des sources.....	417
11.2 Documentation locale.....	418
11.2.1 Archives classées du Musée des Marais Salants de Batz-sur-Mer.....	418
11.2.2 Actes de propriétés - Archives non classées du Musée des Marais Salants.....	418
11.2.3 Actes de naissance et de décès - Archives non classées du Musée.....	419
11.2.4 Iconographies : Cartes postales - Archives du Musée.....	419
11.3 Sources imprimées et bibliographie générale.....	419
11.3.1 Sources et ouvrages généraux.....	419
11.3.2 Sources imprimées périodiques.....	420
11.3.3 Sources diverses.....	420
12. SOURCES DU CAS D'ÉTUDE DES PRESSES D'IMPRIMERIE.....	421
13. SOURCES DU CAS D'ÉTUDE DU CANOT A VAPEUR DE 1861.....	423
14. SOURCES ET BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE (CLASSEMENT ALPHABÉTIQUE)	425
ABREVIATIONS ET LEXIQUE.....	441
INDEX DES FIGURES.....	443

1. PRELIMINAIRES INTRODUCTIFS

En préliminaire à ce manuscrit de thèse, nous exposerons dans une première partie comment cette thématique de recherche interdisciplinaire est née. En effet, avant de présenter les travaux issus de trois années de recherche, il est nécessaire de mener une réflexion de fond sur les faits et le contexte général dans lesquels cette problématique est apparue. Cette dernière s'inscrit dans deux domaines :

- la Mécanique, le Génie Mécanique et le Génie Civil ; regroupés sous l'appellation Génie Industriel (60^{ème} section CNU).
- l'Epistémologie et l'Histoire des Sciences et des Techniques (72^{ème} section CNU),

Comme dans tout travail pluridisciplinaire, une sémantique conjointe doit être instaurée afin que les acteurs et les lecteurs aient une base de référence commune. Ce premier chapitre a pour vocation de sensibiliser le lecteur quant à la dualité des disciplines concernées. Certaines parties seront évidentes pour les uns ou une nouveauté pour les autres. *Par avance, milles excuses !*

Ainsi, comme la démarche de l'analyse du besoin de la méthode APTE¹, nous répondrons aux questions des *Qui ? Quoi ? et Comment ?* dans ce chapitre. La question du *Pourquoi ?* sera abordée dans le chapitre 2 lors de la définition de la problématique dans son contexte large.

¹ Méthode dite APpliquée aux Techniques d'Entreprise.

1.1 QUOI ?

1.1.1 UNE PREMIERE APPROCHE DU PATRIMOINE : LA CONNAISSANCE DE L'HUMANITE

Se simplifier la vie, inventer des objets pour toujours faire mieux, depuis la nuit des temps l'Homme² tente d'améliorer ses conditions de vie. Il façonne sa propre réalité qui n'est qu'une représentation partielle et artificielle du monde dans lequel il évolue et où l'environnement naturel est inaltérable. Issus de ce processus, les objets de sa vie quotidienne font désormais partie de notre patrimoine *présent* mais également *passé*. Conserver ces objets afin de les analyser et les comprendre peut devenir une source de connaissances pour anticiper notre futur et aider à mieux créer les objets de demain.

Néanmoins, dans un contexte industriel où tout s'accélère et doit être plus rentable, les hommes et leurs savoir-faire sont transférés, les environnements industriels sont transformés, abandonnés... Les systèmes industriels locaux sont arrêtés puis démantelés, les machines ferrillées, au mieux stockées. Comme un puzzle dont les pièces s'usent ou disparaissent, les données techniques et les compétences associées s'effacent au fur et à mesure de l'écoulement du temps. C'est toute la connaissance technique de l'humanité qui disparaît progressivement.

Depuis quelques années, la capitalisation des connaissances est devenue une application à *la mode* dans le milieu industriel actuel. Comme le dit Tom STEWART, journaliste pour Fortune [STEWART 1997] :

"L'actif le plus précieux des entreprises est son capital intellectuel".

Pour faire rapidement face à cette perte de données, les entreprises reconsidèrent leur point de vue et se sont lancées dans le vaste chantier du *Knowledge Management* (KM). Devenu, dans le privé, un réel business en soi, il n'est généralement capitalisé que les connaissances implicites des métiers (le savoir-faire) [AMIDON 2002] [LAROCHÉ 2004]. Dès lors, la question de la capitalisation de la connaissance liée au patrimoine local, national, voire mondial se pose.

Ne rentrant plus dans la ligne des priorités industrielles, il convient alors aux universitaires, en collaboration avec les conservateurs de Musées, les historiens et les experts en patrimoine d'apporter des éléments de réponse et de mettre en œuvre des moyens pour *immortaliser*³ ce savoir-faire.

Mais de quel savoir est-il question ?

² On entend par Homme, la dénomination de l'Homme dans son cadre général de l'Evolution, voir chapitre 2 [DARWIN 1969]

³ On entend par *immortaliser* l'action de capitaliser, comprendre, valoriser ou transmettre.

1.1.2 LA SCIENCE ET LA TECHNIQUE

La situation du patrimoine technique et industriel pose aujourd'hui question : tant du point de vue de sa gestion et de sa valorisation dans les Musées et les sites que du vieillissement intrinsèque de l'information technique contenue dans les collections, les archives et les lieux de patrimoine [COTTE 2004a]. Cette connaissance intrinsèque aux objets physiques, témoignage du passé, vieillit très rapidement. Aussi, pour protéger ce patrimoine, nous devons nous interroger quant aux méthodes à utiliser pour le capitaliser et le valoriser. En effet, depuis 200 ans, les objets étant devenus de plus en plus complexes, de nouvelles méthodes et de nouveaux outils sont à implémenter pour cette muséologie du 3^{ème} millénaire.

Tout comme la population mondiale, son patrimoine culturel croît exponentiellement, sans limite aujourd'hui perceptible. L'enjeu pour notre génération et les générations à venir consiste alors à mettre en œuvre les moyens et les outils nécessaires pour sauvegarder cette connaissance en perpétuelle expansion. Mais, affrontant un temps qui ne peut s'arrêter, il faudra redoubler d'efforts et d'intelligence pour rattraper les années de capitalisation perdues et faire face à cette accumulation de savoirs.

Zoologiste et philosophe de formation, le britannique Julian HUXLEY (1887-1975) est le premier directeur général de l'UNESCO⁴ en 1946. Il prend par la suite la fonction de vice-président de la Commission internationale pour l'histoire du développement scientifique et culturel de l'humanité à l'UNESCO. Humaniste dans l'âme, Sir HUXLEY crée dans le contexte de l'après-guerre (1957) le concept de *transhumanisme*. Une notion que l'on retrouve au siècle des LUMIERES mais également chez les SAINTS-SIMONIENS au 19^{ème} siècle.

C'est à la veille de sa mort que Sir HUXLEY lance un défi aux générations futures [HUXLEY 1970] :

« Au cours du siècle passé, une extraordinaire explosion scientifique a produit une somme de données, d'idées, et de principes plus grands que tous les millénaires précédents de l'histoire réunis avaient réalisé... Il est évident que la science ou plutôt la coopération scientifique, doit jouer un rôle dirigeant dans la tâche prodigieuse qui consiste à synthétiser cette masse énorme de connaissances sous forme d'un modèle intelligible, signifiant et chargé d'efficacité humaine. »

⁴ Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture

Patrimoine d'infrastructures matérielles enrichissant notre vie, c'est dans la science et la technique que l'essence même de notre imagination puise pour agrémenter notre quotidien de nouveaux produits. Ces objets sont issus d'un processus de *création* que l'on peut décrire en quatre étapes :

1. intelligibilisation (recherche d'idées),
2. conception,
3. matérialisation (phase de fabrication),
4. utilisation.

Il s'agit donc d'un processus industriel où le produit final est lui-même caractérisé de produit industriel. Ce schème⁵ définit ce que nous appelons le *patrimoine industriel*, objet de notre étude. Notre hypothèse de départ a donc été d'envisager une ré-utilisation des outils du monde industriel pour comprendre ces objets passés (objets issus eux-mêmes de l'industrie).

L'approche développée ici consiste à *renverser l'axe des temps de la conception* et à proposer, à partir de l'objet technique et des informations dont on dispose (objets, photos, textes, plans 2D, systèmes hors d'état d'usage, vestiges archéologiques) et grâce à l'utilisation d'outils (numérisation 3D, CAO⁶ et imagerie, Réalité Virtuelle...), une modélisation multi-points de vue des organes, des flux de matières et de fluides, des interactions homme/système, de l'environnement manufacturier dans son ensemble, en vue d'une remise en situation d'usage virtuelle.

1.2 QUI ?

1.2.1 DES RENCONTRES ET UNE IDÉE...

Alors historien des techniques au CNRS et expert pour l'ICOMOS⁷, Michel COTTE est nommé Maître de conférences d'Histoire des Sciences et des Techniques à l'Université de Technologie de BELFORT-MONTBELIARD⁸. Malgré l'originalité du profil d'historien dans le monde des technologues, le domaine de l'ingénierie ne lui est pas si inconnu. Physicien de formation, il appréhende le milieu industriel lors de ses travaux de thèse en histoire dans lesquels il étudie les archives des frères SEGUIN (1820-1830). Très vite, il se rend compte de la complexité des milieux industriels et des limites liées aux difficultés de la conservation du patrimoine technique et industriel.

C'est lors d'une visite des aciéries de LINZ en AUTRICHE que l'idée lui vint de détourner les outils de la conception mécanique à des fins de conservation [COTTE 2005a]. L'usine se

⁵ Employé par PIAGET dans les années 1950-60 pour le domaine des sciences de la cognition et des neurosciences, nous nous réapproprions le terme de *schème* et le redéfinissons dans le chapitre 5.

⁶ CAO = Conception Assistée par Ordinateur

⁷ ICOMOS = International Council On MONuments and Sites. ONG travaillant pour le patrimoine mondial de l'UNESCO.

⁸ Ecole d'ingénieur dans le Territoire de Belfort (90) – www.utbm.fr

devait d'être agrandie et les anciennes machines détruites. L'entreprise a alors investi dans une capitalisation vitale pour sa survie : les trains de laminoirs et donc l'intégralité du process industriel furent redessinés en CAO. Cette simple action lui permit de sauver ce qu'elle avait accumulée depuis plusieurs générations : son savoir-faire.

Quelque temps plus tard, Michel COTTE fait la rencontre de Samuel DENIAUD, enseignant-chercheur en Génie des Systèmes de Production à l'UTBM. Bénéficiant du cadre de la formation des élèves-ingénieurs et de plusieurs laboratoires de recherche, ils proposent d'approfondir cette idée de réutilisation des outils de la CAO dans un cadre pédagogique : au lieu d'apprendre à utiliser CATIA⁹ en démontant une perceuse BLACK & DECKER, les élèves travaillent sur des vieilles machines [COTTE & al 2005a]. En terme de problématique de recherche et d'objectif didactique, la finalité visée est l'étude et la compréhension de machines parfois centenaires. La rigueur scientifique attendue apporte alors l'exactitude de leur fonctionnement technique. Cette approche rigoureuse du patrimoine technique et industriel par les outils des sciences de l'ingénieur offre de nouvelles potentialités de développement pour les domaines du patrimoine et de l'histoire.

1.2.2 UNE PREMIERE EXPERIENCE : LA PRESSE BLISS

Créés en 1778, les établissements JAPY de FESCHES-LE-CHATEL (90) fabriquent des casseroles, des horloges... et emploient jusqu'à 800 personnes sur son site [LAMARD 1988]. Dans les années 1902-1906, ils s'équipent de deux presses à double-effet. Initialement destinées à la fabrication de casques de pompiers, elles furent utilisées pour produire les casques des soldats de l'armée française durant la Grande Guerre. L'une d'elle est actuellement installée sur un rond-point à l'entrée de la ville pour témoigner de sa vocation industrielle.

La figure 1 illustre cette antinomie entre la Réalité Réelle et sa Réalité Virtuelle :

- photographie de la machine sur son piédestal,
- maquette numérique CAO.

⁹ Logiciel de CAO édité par la société française DASSAULT SYSTEMES – www.3ds.com. CATIA a originellement été créé par Dassault Aviation pour ses propres besoins. CATIA est un acronyme de Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée.

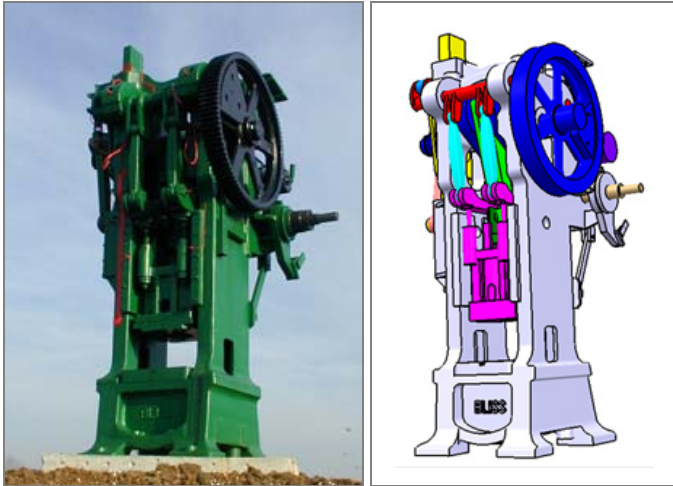


Figure 1 : PRESSE BLISS – MACHINE REELLE ET MODELE VIRTUEL

L'idée de départ du projet était triple :

- restituer les mouvements de la machine en fonctionnement,
- apporter la qualité technique et la fidélité des sciences de la mécanique et de la conception à la restitution de l'objet,
- donner une dimension pédagogique à la restitution par les possibilités des logiciels de CAO (zoom, changement de point de vue d'observation, transparence, fausses couleurs...).

L'approche générale dégagée de deux démarches consistant à réaliser :

- une étude documentaire (recherche des plans et des documents historiques),
- une étude de terrain de la machine (photos, prise de cotes).

Malheureusement, aucun document d'archives historiques ne fut retrouvé et c'est uniquement grâce au bloc machine non démonté qu'il fut possible de le reconcevoir malgré le manque de plusieurs accessoires. L'intégralité des mesures s'est réalisée grâce à un mètre ruban et un pied à coulisse.

Ces études aboutirent à :

1. la compréhension cinématique du fonctionnement de la machine,
2. la réalisation d'un modèle filaire puis d'un modèle cinématique,
3. l'habillage 3D pour obtenir un modèle volumique.

En 2003, après six mois de travail, un groupe de recherche Franc-comtois¹⁰ produisit une maquette numérique 3D de cette presse en fonctionnement avec débattements réels sous

¹⁰ Ce groupe est composé de laboratoires de l'UTBM dont RECITS (Histoire des techniques et de l'industrie) et M3M (composante Conception innovante distribuée) ainsi que le parc scientifique du PRE-LA-ROSE à MONTBELIARD (25) et la CAPM. Voir partie ci-après sur les éléments administratifs de la thèse.

CATIA V5. Le modèle est constitué de 17 composants et de 23 liaisons cinématiques [COTTE & al 2005a] [FERRAZZI & al 2003].

Ce travail de recherche, auquel j'ai participé en tant qu'élève ingénieur, a permis de me montrer la pertinence de l'utilisation des outils des SPI¹¹ pour cette typologie de patrimoine. Malgré tout, cette expérimentation a également fait apparaître de nombreuses lacunes quant à la prise de cotes et la démarche à mettre en œuvre pour identifier et capitaliser le savoir-faire nécessaire dans le cadre d'une rétro-conception.

Il est à noter que, depuis ce premier cas d'étude, l'UTBM continue ses expérimentations didactiques mais dans le cadre d'objets à caractères plus scientifiques [LAMARD 2005].

1.2.3 VERS UN CADRE DE RECHERCHE INTER-DISCIPLINAIRE

Ayant accepté un nouveau poste à NANTES, Michel COTTE partit pour le Grand Ouest. Dès lors, la thématique des maquettes numériques de patrimoine a pris une dimension élargie. Elle se devait de pouvoir identifier et rassembler de nombreux acteurs à une échelle désormais nationale. Fédérée sous l'appellation du pôle O.S.TIC¹², elle s'est donnée les objectifs suivants [COTTE & al 2004]:

- promouvoir un pôle de rencontres et d'échanges pour différents chercheurs engagés dans des voies similaires ou voisines, mais développées par chacun dans des contextes, des référentiels et des approches différents.
- accueillir ou aider des projets de recherche et de *recherche – action* en partenariat avec des collectivités, des institutions ou des entreprises.
- examiner les questions de la formation liées à l'usage des TIC dans des champs professionnels spécialisés.

S'agissant de rassembler des compétences et des partenaires d'horizons différents, tant dans le champ de la recherche (sciences humaines et sciences pour l'ingénieur, fournisseurs de technologies) que dans celui des institutions et associations concernées par la mise en œuvre et la valorisation possible de maquettes numériques (musées, sites de patrimoine, collectivités territoriales, services de la Culture, universités et écoles

¹¹ Sciences Pour l'Ingénieur

¹² O pour Objets ; le thème des « objets » invite par exemple à une réflexion sur les collections, la muséographie ou encore sur celui de l'innovation, de la conception ou de la créativité technique. S pour Société ; le terme de « société » évoque bien entendu l'immense domaine des sciences humaines et sociales, sociologie incluse, mais aussi histoire et philosophie. TIC pour Technologies de l'Information et de la Communication ; les « TIC » couvrent aujourd'hui un champ devenu très large, celui des nouvelles technologies de l'information et de la communication, des images numériques, de la CAO...

d'ingénieurs), lors de la 1^{ère} journée d'étude nationale le 5 mars 2004 au CENTRE FRANÇOIS VIETE à NANTES, de multiples expériences de précurseurs furent exposées :

- Reconception de machines industrielles, UTBM (voir ci-avant),
- GANTOM : Projet de Génération Assistée de Numérisation et Texturation d'Objets Muséographiques, Centre de robotique de l'ECOLE des MINES, PARIS,
- Projet de conservation de machines textiles et du savoir-faire métier, Musée de CALAIS...

Fort de rencontres diverses et variées avec les milieux aussi bien artistique que technique, un besoin émergeait : celui de renouveler la conservation du patrimoine et de le rendre plus *attractif* pour les nouvelles générations ; et ce, dans une finalité double :

- la fiabilité d'une restitution de l'état original,
- l'interactivité de la restitution avec la volonté de *faire vivre ce patrimoine*.

La rencontre des Sciences Humaines et Sociales avec les chercheurs en Génie Industriel a alors renforcé cette dichotomie des approches et a permis une prise de conscience bjective des enjeux. Alain BERNARD, Professeur en Génie Industriel à l'ECOLE CENTRALE de NANTES, est responsable d'une équipe de recherche ayant pour intitulé IVGI¹³ et basée à l'institut de recherche IRCCyN¹⁴ à NANTES.

L'analyse de cette problématique du patrimoine industriel du passé par des experts de l'industrie contemporaine permet alors de mettre en exergue cette ambivalence de temporalité s'exerçant sur un même sujet : les produits industriels [COTTE & al 2005b]. Que ceux-ci appartiennent au passé, au présent ou au futur, il apparaît certain qu'un lien les unit et que les couches des Systèmes d'Information du passé, du présent ou du futur, ne forment en réalité qu'un seul et même modèle de description [BERNARD & al 2007a].

Réunir les domaines de l'Histoire des Techniques (72^{ème} section CNU) et le Génie Industriel (60^{ème} section CNU) semble dès lors une évidence. L'exemple précédemment cité de la presse JAPY a démontré les limites de la démarche empirique jusqu'alors utilisée. Un besoin de formalisation de ce processus de *reverse-engineering* est nécessaire : depuis la capitalisation des connaissances jusqu'à l'immersion dans les systèmes de Réalité Virtuelle en passant par la numérisation 3D et la modélisation CAO. Avec le souhait du CNRS de développer des pôles de recherches pluridisciplinaires depuis l'année 2003, cette problématique des maquettes numériques de patrimoine marque l'ouverture d'un nouveau champ de recherches inter-disciplinaires.

1.2.4 UN PARCOURS ATYPIQUE POUR UN TRAVAIL DE RECHERCHE FONDAMENTALE PEU COMMUN

Scientifiques, industriels, historiens, conservateurs de Musée... au vu de leurs ambitions, ce projet prend tout son sens. Le cadre de l'étude est posé : il s'agira d'un travail de recherche fondamentale.

¹³ Ingénierie Virtuelle pour le Génie Industriel

¹⁴ Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes

Pour ce faire, une allocation au MINISTERE de la RECHERCHE est demandée ; un crédit de subventionnement d'une étude de doctorat est obtenu en août 2004 pour une durée de trois ans.

Les deux responsables scientifiques, devenant par voie de faits les deux co-directeurs de la thèse et montrant un intérêt commun pour cette thématique, sont :

- Alain BERNARD, pour la 60^{ème} section,
- Michel COTTE, pour la 72^{ème} section.

Il ne manque plus qu'un candidat ?

Diplômé de l'UTBM en 2003, j'ai acquis une formation d'ingénieur généraliste avec spécialisation en Génie Mécanique et Conception. Durant mes études, la CTI¹⁵ imposant un ratio conséquent de formation en Culture Générale, outre les compétences techniques et scientifiques, j'ai majoritairement étudié les disciplines historiques. Cette spécialisation supplémentaire m'a permis de m'initier aux dimensions socio-économiques et historiques de la créativité technique. Elle se sanctionna par des enseignements spécifiques et des travaux de recherche personnels :

- histoire industrielle du 19^{ème} siècle et du 20^{ème} siècle,
- histoire des ingénieurs,
- histoire des techniques : matériaux et énergies en EUROPE,
- culture technique : genèse et évolution des objets,
- initiation à l'innovation et au design industriel.

Dans ce cadre, l'opportunité m'a également été donnée de contribuer à la réalisation de l'étude et de l'écriture du dossier du *Train Jaune des Pyrénées Orientales* en vue de sa candidature au patrimoine mondial de l'UNESCO pour la région LANGUEDOC-ROUSSILLON [COTTE & al 2000]. Cette étude m'a fait prendre conscience de la valeur des objets industriels dans notre vie de tous les jours et du contexte socio-économico-technique complexe dans lequel ils évoluent.

C'est ainsi que j'ai également obtenu en 2003, le diplôme du mineur intitulé *histoire des techniques en sciences humaines* me permettant de valoriser une spécialisation complémentaire dans ce domaine.

Pour terminer mon cursus d'ingénieur, j'ai réalisé mon projet de fin d'étude à ALSTOM TRANSPORT SA¹⁶. La notion de KM¹⁷ n'étant pas encore largement diffusée au sein du monde industriel, mon sujet de stage restait flou mais j'ai rapidement cerné l'enjeu de ce qu'il m'était demandé. Les anciens concepteurs mécaniques, piliers de la technologie ALSTOM, partaient en retraite ; les jeunes embauchés ne restant que quelques années dans l'entreprise, une perte rapide des connaissances et des compétences techniques s'en

¹⁵ CTI = Commission des Titres d'Ingénieur

¹⁶ <http://www.alstom.com>

¹⁷ Knowledge Management

suivait. Or le site d'ALSTOM ORNANS a été créé en 1884 (entreprise OLIVIER) et dès 1919, il équipe les premières locomotives électriques françaises sur la ligne PARIS-ORLEANS. Devant un savoir-faire unique fort de 90 ans d'expériences, ma mission consistait à *encapsuler*¹⁸ l'ensemble de la connaissance nécessaire à la conception d'un moteur de traction. Jonglant entre les bureaux d'études mécaniques, les bureaux d'études électriques, le bureau des méthodes, la fabrication, les achats... le GDI¹⁹, les brevets, les normes AFNOR, NF, ISO, CEI, les spécifications techniques internes à l'entreprise... et de nombreux entretiens... j'ai donc fait du KM sans savoir moi-même que cela existait ! Au bilan, le document de 200 pages redéroule l'analyse fonctionnelle externe et interne d'un moteur asynchrone de traction [LAROCHÉ 2003]. Quelques années plus tard, suite à cette étude, un département R&D à ALSTOM TRANSPORT ORNANS a été créé sous la direction de Dominique JAMET. Dans le cadre de la conférence IFToMM 2007, il a récemment rappelé l'intérêt de ces premiers travaux qui sont devenus la base de travail de son service [JAMET 2007].

Soucieux d'enrichir mes compétences et de me confronter à de nouvelles disciplines et à de nouveaux domaines quelques peu éloignés de l'ingénierie, j'ai continué mes études par un DEA en Conception de Produits et Innovation à l'ENSAM de PARIS dans le laboratoire CPNI²⁰. Outre les enseignements dispensés dans les domaines de l'évaluation perceptive, l'innovation ou le prototypage rapide... il nous a été donné l'opportunité de mener, en interne, des projets pluridisciplinaires dans lesquels plusieurs métiers n'ayant pas la même formation ni les mêmes méthodes avaient un objectif commun. Ces métiers étaient :

- des technologues issus d'écoles d'ingénieurs,
- des technologues issus d'IUT et de licences,
- des ergonomes,
- des designers.

Très vite, il est apparu des difficultés liées essentiellement à cette notion de pluridisciplinarité pour laquelle chacun utilisait son propre vocabulaire et aucun dictionnaire n'existait. Se créer une sémantique commune et une démarche de conception en innovation transversale sont alors devenues des priorités.

Enfin, j'ai effectué mon projet de recherche au sein de la société PSA PEUGEOT CITROËN²¹ à la Direction de l'INnovation et de la Qualité (DINQ/DSIN/SIPP/PGQD/SDOQ/OMIC). Le projet débuté par PSA en 2001 se continue encore en 2007. L'objectif est de créer de

¹⁸ Le terme d'encapsulation est utilisé dans le domaine de la modélisation d'entreprise pour définir l'action de capitalisation aboutissant à un corpus de connaissances structuré.

¹⁹ Guide du Dessinateur Industriel

²⁰ CPNI = Laboratoire Conception de Produits Nouveaux et Innovation, ENSAM PARIS

²¹ <http://www.psa-peugeot-citroen.com>

l'innovation de rupture²² en utilisant les connaissances [LAROCHE 2004]. Peu avant mon DEA, il avait été prouvé la possibilité d'innover en rupture en utilisant les connaissances capitalisées en interne à la société (le savoir-faire automobile). Lors de mon DEA, la problématique a été élargie aux connaissances externes. Je devais prouver que l'utilisation des connaissances aussi bien internes qu'externes permettaient également d'innover en rupture mais en utilisant la méthode TRIZ²³. Fort de notre réussite, PSA s'est, depuis, appliquée à déployer la démarche dans l'ensemble de la DINQ²⁴ afin de créer une plateforme de tests pour ensuite vulgariser le programme à l'ensemble des bureaux d'études (DPTA²⁵).

1.3 COMMENT ?

C'est fort de ces expériences et de l'appréhension de nouveaux domaines n'étant pas en lien direct avec l'ingénierie industrielle que j'ai réalisé ce doctorat.

Au vu de la complexité et de la diversité de ces travaux, les lecteurs ayant des profils différents, il nous a semblé préalablement nécessaire d'explicitier la démarche que nous avons suivie. En effet, la dualité des disciplines en jeu a fait apparaître, dès le début, des différenciations :

- dans le séquençage temporel du déroulement des activités de réalisation d'une thèse,
- dans les outils et les méthodes à employer,
- dans les objectifs attendus et le contenu du manuscrit de thèse.

Aussi, soucieux d'une lecture aussi fluide que possible de ce document, nous terminerons ce premier chapitre par des préconisations de lecture.

1.3.1 LA REDACTION D'UNE THESE EN GENIE INDUSTRIEL

Rédiger une thèse en GI²⁶ résulte d'un processus éminemment complexe. La définition même du Génie Industriel couvre l'intégralité des champs de la conception d'un produit à sa

²² L'innovation est dite de *rupture* lorsqu'elle modifie profondément les conditions d'utilisation par les clients et/ou qu'elle s'accompagne d'un bouleversement technologique [NEAU 2004]. Exemple : passage de la cassette VHS au DVD. *A contrario*, l'*innovation incrémentale* ne bouleverse pas les conditions d'usage et l'état de la technique, mais y apporte une amélioration sensible. Elle est autrement appelée amélioration de produit [NEAU 2004]. Exemple : passage du téléphone fixe à fil au téléphone fixe mais sans fil.

²³ Développée en ex URSS à partir de 1946 par G. ALTSHULLER, la *Teorija Reshenija Izobretateliskih Zadatch* est utilisée dans le monde entier sous l'intitulé TIPS en anglais *Theory of Inventive Problem Solving* et en français sous le nom de *Théorie de Résolution des Problèmes Inventifs*. ALTSHULLER envisage la créativité sous l'angle d'une science exacte, et entend développer des outils qui permettent de détacher l'invention des aptitudes humaines individuelles de l'inventeur. S'étonnant de ne pas trouver d'ouvrages destinés au génie de l'invention, ALTSHULLER postule qu'il existe des principes permettant de solutionner tous les problèmes. Ses collaborateurs et lui-même ont alors analysé plus de 2 000 000 brevets pour mettre au point la théorie. [ALTSHULLER 1996] [ALTSHULLER 1999]

²⁴ Direction de l'Innovation et de la Qualité - PSA PEUGEOT CITROËN

²⁵ Direction des Plates-formes et Achats - PSA PEUGEOT CITROËN

²⁶ Génie Industriel

fin de vie en passant par sa fabrication et son (ses) usage(s). La thèse en GI est un processus où évoluent conjointement la définition de la problématique et les solutions à mettre en place. Se basant usuellement sur un problème concret avec un support industriel, la démarche de recherche est telle que présentée par la figure 2 :

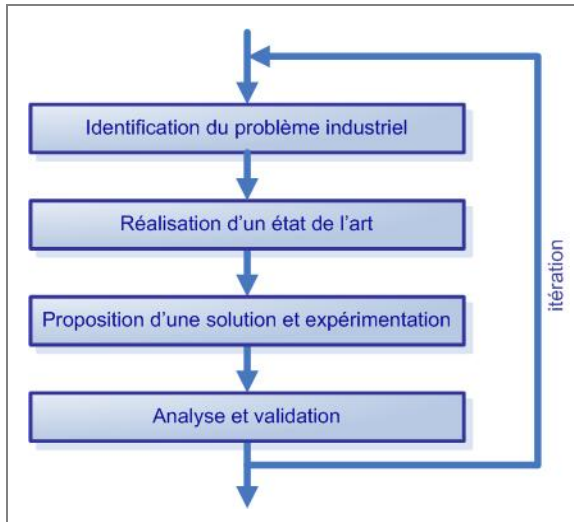


Figure 2 : LA DEMARCHE DE RECHERCHE EN GI

La première phase s'effectue par une analyse de terrain puis est complétée par une recherche bibliographique. A cette vision industriocentrée²⁷ se rajoute une couche de recherche où la reformulation du problème industriel en une problématique de recherche permet d'en déduire une première hypothèse qui sera ou non validée par une expérimentation. Puis, de nombreuses itérations sont nécessaires pour parfaire la situation afin d'arriver à une proposition viable aussi bien pour le problème industriel que pour l'aspect scientifique de la thèse.

HATCHUEL, cité par WEIL [WEIL 1999], propose un processus similaire en quatre étapes. Le point de départ est une situation de malaise qui va être étudiée selon une méthode éprouvée : l'analyse du besoin. Cependant, HATCHUEL met l'accent sur la nécessité d'une modélisation conceptuelle de la situation afin de cerner l'ensemble des acteurs impliqués (moyens humains, matériels, processus temporels) en ciblant leurs actions et leurs limites. Un aspect que nous développerons dans les prochains chapitres.

La thèse en GI s'apparente donc à une démonstration où la recherche de preuves permet la déduction d'hypothèses qu'il faudra valider par de nouvelles preuves. Au fur et à mesure de l'avancement des travaux, la problématique s'affine et le champ des solutions également. Selon MILLET, la figure 3 synthétise le cheminement de la recherche scientifique à effectuer durant les trois ans de doctorat [MILLET 2004].

²⁷ On entend ici une vision centrée sur l'industrie et l'entreprise au même titre que l'anthropocentrisme se veut orienté vers l'Homme.

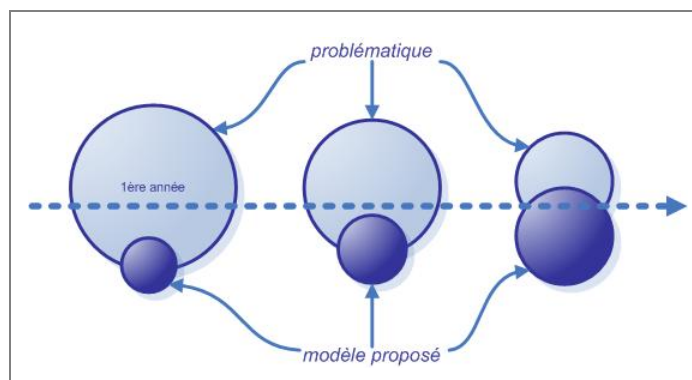


Figure 3 : LE SCHEMA GLOBAL DU PROJET DE RECHERCHE SELON MILLET

On observe deux mouvements de progression convergents : celui de la problématique et celui des solutions. La concordance finale doit permettre d'avoir à la fois une réponse éprouvée correspondant à la question et une question construite correspondant à la réponse.

Pour le doctorant, la chronologie des trois ans de thèse est en général répartie de la façon suivante :

1. les deux premières années et demie sont consacrées au travail de terrain, de compréhension, de recherche de solutions et d'expérimentations,
2. les derniers six mois sont consacrés à la rédaction du manuscrit de thèse.

1.3.2 LA REDACTION D'UNE THESE EN HISTOIRE

Comme nous allons le voir ici, la réalisation d'une thèse en histoire propose un processus relativement différent. En effet, le travail de terrain et la problématique démarrent très tôt dans le projet de recherche.

Les données et les informations que l'historien va traiter et analyser pour les convertir en connaissances sont des documents d'archives ou des traces découvertes sur un terrain de fouille archéologique. Dès l'appropriation de ce corpus documentaire, il se doit de mettre en corrélation cet ensemble complexe et va donc, très tôt, penser à une architecture de rédaction de sa thèse. Il réalise une première version qu'il affine en différentes versions successives de son manuscrit. La finalité idéale étant la publication de sa thèse sous la forme d'un livre diffusé à grande échelle.

Malgré le cadre réglementaire des trois ans, les thèses d'histoire ont souvent tendance à s'allonger. En effet, la nécessité de justifier chaque fait annoncé requiert une quantité importante de sources à traiter. Aussi, ces analyses approfondies se doivent d'être toutes mentionnées dans le manuscrit final qui dès lors se présente sous la forme de un à plusieurs volumes d'au moins 500 pages chacun. Il faut également noter que ces travaux minutieux sont usuellement réalisés par des gens exerçant une profession par ailleurs (enseignants notamment).

Malgré tout, la chronologie usuelle d'un doctorant en Histoire s'y consacrant à plein temps est complexe. En effet, durant les six premiers mois, il s'approprie les archives. Puis,

il rédige de multiples notes de synthèses en dépouillant les sources. Ce n'est qu'à l'issue des deux ans et demi que la problématique émerge et qu'un plan de manuscrit provisoire est établi : l'assemblage des textes déjà rédigés débute. Cette phase nécessite alors de multiples itérations afin de pouvoir cerner le sujet dans son intégralité et obtenir un ensemble homogène et cohérent. Suite à un échange avec Michel COTTE, nous avons formalisé cette démarche de recherche par la figure 4.

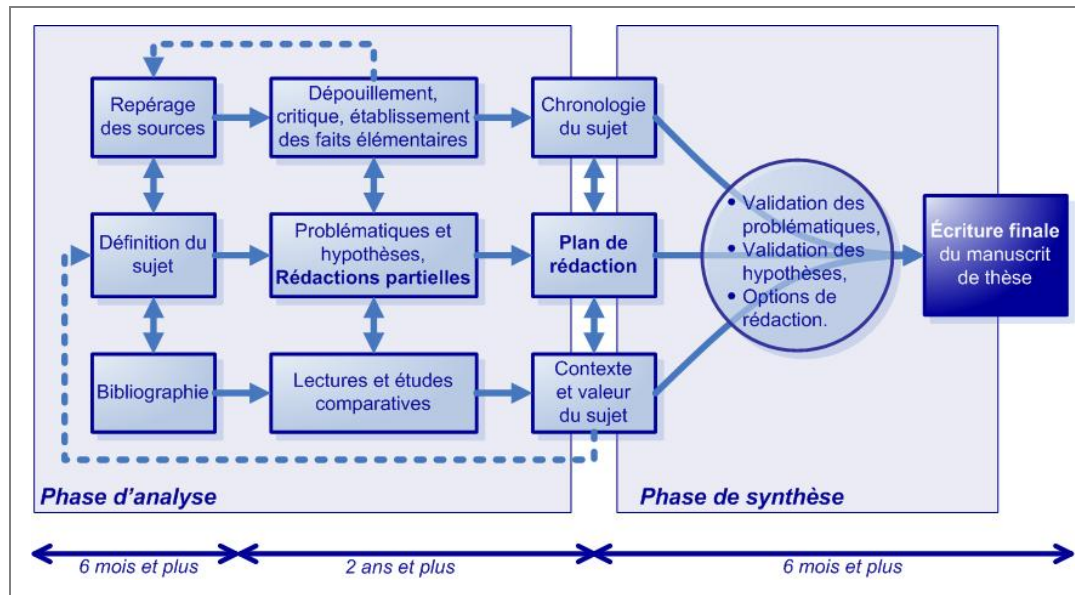


Figure 4 : LA DEMARCHE DE RECHERCHE EN HT

1.3.3 LA REDACTION D'UNE THESE INTERDISCIPLINAIRE EN GENIE INDUSTRIEL ET EN HISTOIRE

Comme vu précédemment, les terrains d'études associés aux sources utilisées ainsi que la répartition temporelle du travail de recherche diffèrent nettement entre les deux disciplines. Aussi, la méthodologie que nous avons développée pour mener à bien nos travaux était en perpétuelle adaptation durant ces trois ans. Elle est issue des *best practices*²⁸ des deux process.

Détaillons ici le cadre et les limites de notre étude, le planning général et la démarche de recherche bibliographique. Ces éléments nous permettront de justifier le découpage du plan de ce manuscrit.

²⁸ Le terme de *best practices* est couramment employé dans le domaine du KM. Il désigne la meilleure façon de procéder pour arriver à l'objectif fixé. Exemple : les *best practices* du métier de projeteur-dessinateur-concepteur mécanique sont regroupées dans le GDI.

1.3.3.1 Le terrain d'expérimentation

Très vite, le terrain d'expérimentation s'est élargi et étendu à d'autres disciplines que celles du Génie Industriel et de l'Histoire des Techniques²⁹. La liste ci-dessous n'est pas exhaustive :

- la mécanique technique,
- la thermodynamique,
- la conception et l'innovation,
- la métrologie,
- le design industriel et l'ergonomie,
- l'informatique – base de données et interopérabilité,
- l'imagerie virtuelle et la Réalité Virtuelle,
- l'architecture,
- l'archéologie,
- la sociologie et l'anthropologie,
- la macro-histoire, la micro-histoire et le patrimoine,
- la muséographie et la muséologie,
- les bibliothèques et les archives,
- ...

Ainsi, dans la suite de ce document de nombreux domaines seront abordés mais ceux-ci ne relevant pas des deux disciplines mères dans lesquelles s'inscrivent ces travaux, *les portes seront ouvertes mais nous n'y entrerons pas* laissant la possibilité à de nouvelles perspectives pour des thématiques de recherches émergentes.

1.3.3.2 La démarche globale de la recherche

GINGRAS définit deux façons d'effectuer ses recherches [GINGRAS 1997]:

- de la théorie vers l'expérimentation puis rebouclage à la théorie,
- ou de l'expérimentation vers la théorie puis rebouclage par l'expérimentation.

Notre thématique étant en pleine émergence, nous avons choisi d'effectuer de nombreux essais afin de délimiter la typologie de recherche, de déterminer la ou les problématiques associées et d'en réaliser les états de l'art correspondants. Ainsi, durant ces trois années, nous avons mené de front plus de 25 projets appartenant aux domaines cités en préliminaire de cette partie 1.3.3.1 sur le *Comment ?*. Parfois monodisciplinaires, parfois pluridisciplinaires, parfois interdisciplinaires³⁰, ces projets ont permis de cerner les besoins implicites et explicites de notre thématique. En effet, considérée comme de la recherche fondamentale, aucun support industriel ou question vitale à la pérennisation d'une entreprise

²⁹ Dans la suite de ce document, nous utiliserons les abréviations GI pour le Génie Industriel et HT pour l'Histoire des Techniques.

³⁰ La différence entre interdisciplinaire et pluridisciplinaire est abordée dans le chapitre 5.

ne nous a été posé. Aussi, il était de notre devoir de transcrire les besoins et de formuler les problématiques associées soumises à évolution durant ces trois ans.

Chaque mini-projet possède son propre processus interne représenté par la figure 5.

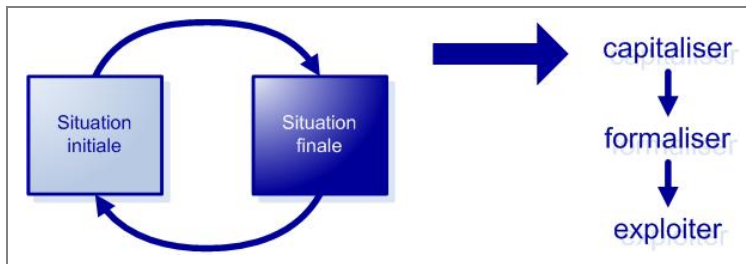


Figure 5 : LE PROCESSUS D'EXPERIMENTATION D'UN MINI-PROJET

Ce schéma global intervient à un niveau méso-scopique. Les résultats se situent à un niveau inférieur tel qu'il est possible de le modéliser par le cycle en V³¹ (figure 6).

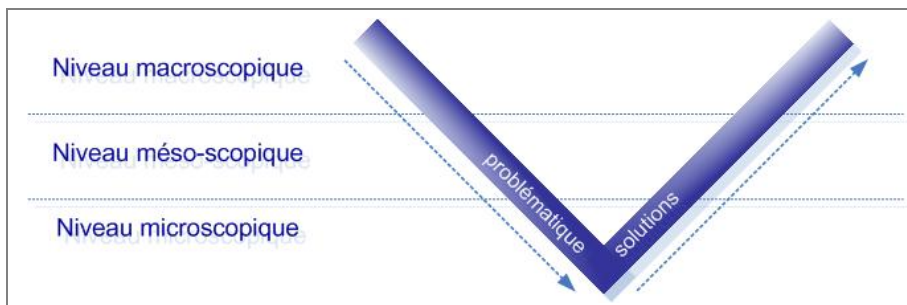


Figure 6 : LE CYCLE EN V STANDARD UTILISE EN GESTION DE PROJETS

Cependant, le niveau méso-scopique produit lui aussi des résultats exploitables. L'analyse qui en découle peut être remontée au niveau supérieur et permettra à son tour, par effet d'étude rétroactive, d'en déduire le modèle générique. Ce macro modèle statue sur le contexte du cadre générique du mini-projet. Ce modèle *produit-processus* est ensuite ré-appliqué au niveau inférieur du cycle en V sur un nouveau mini-projet. En prenant comme paramètre principal le temps, le cycle en V modifié se déroule alors comme un cycle en Racine Carrée. Nous pouvons schématiser cette démarche par le processus de la figure 7.

³¹ Le Cycle en V est une méthode utilisée dans la démarche de projet pour définir, concevoir et valider le produit.

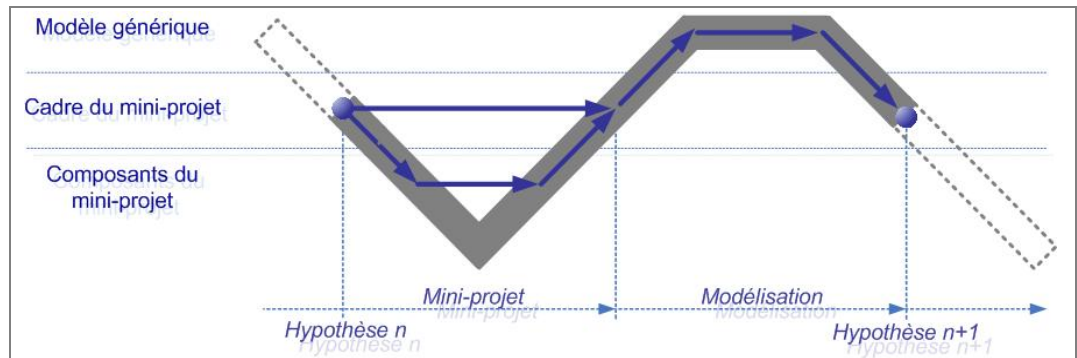


Figure 7 : LE CYCLE EN V MODIFIÉ : METHODE EN RACINE CARREE POUR LA CONDUITE DE PROJETS PATRIMONIAUX ET POUR L'ASPECT RECHERCHE DE LEURS MODELISATIONS CONCEPTUELLES ASSOCIEES

Enfin, l'intégralité de ce cycle en Racine Carrée tel qu'explicité précédemment peut être couplé avec d'autres cycles en Racines Carrées comme une figure fractale.

Chaque cycle en Racine Carrée s'identifiant par une hypothèse déterminée, l'ensemble à multi-échelle de ces cycles en Racine Carrée permet de :

1. composer un *méta-modèle* qui sera construit dans le chapitre 5,
2. et l'orienter selon une vision *produit-processus* comme validée dans le chapitre 6.

La figure 8 illustre cette démarche globale : la boucle d'itération assurant un rôle primordial.

Il est alors obtenu une méthodologie robuste que nous avons utilisée dans ces travaux de recherche pour : déterminer les hypothèses, les valider et itérer sur de nouvelles hypothèses qui ont été validées à leur tour... C'est la démarche

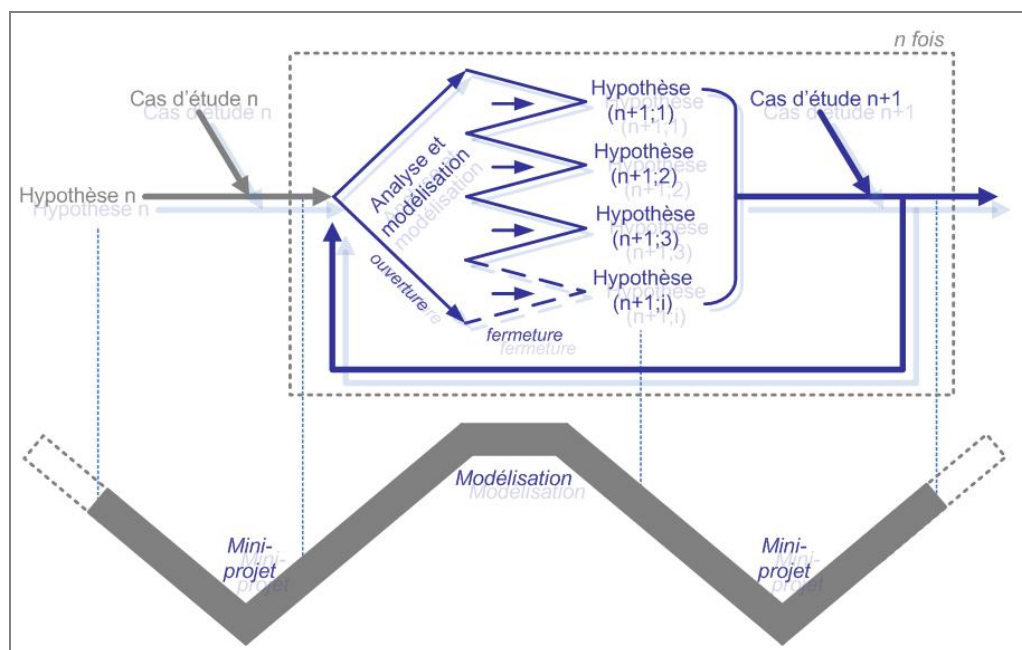


Figure 8 : LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE DE NOTRE PROJET DE RECHERCHE DEVELOPPEE SUR LA BASE DE CYCLES EN RACINES CARREES

1.3.3.3 L'outil de modélisation conceptuel déployé

Précédemment, nous faisons état de phases de modélisation ponctuant ce manuscrit.

En quoi consiste cette modélisation ?

Notre démarche globale est caractéristique d'une pensée synthétique et conceptualisante. En effet, les outils dits *mathématico-physico-scientifiques* ne sont que très peu abordés dans l'intégralité de ce manuscrit : nous ne présenterons pas d'équations ou de formules mathématiques ! Sauf quelques calculs de volumes et de débits dans le chapitre 6.

D'une façon générale, à chaque propos énonçant un état, un fait, ou une idée, un schéma conceptuel en établit la synthèse. A ces fins, les bases du langage de la modélisation conceptuelle UML³² sont utilisées.

Du strict point de vue de l'UML, l'outil a été développé dans les années 1990 pour aider à la programmation informatique. L'objectif initial était de définir une méthode unifiée prenant en compte, notamment, les travaux de BOOCH, JACOBSON et RUMBAUGH. Aussi, avant de travailler sur une méthode ils ont tout d'abord commencé par unifier les notations : c'est ainsi que le langage UML est né, *Unified Modelling Language*.

La documentation officielle contient plus de 700 pages. Encore difficile à appliquer, même les experts se doivent parfois de définir des extensions au langage afin de recourir aux manques induis par la notation UML pour définir ce qu'ils souhaitent représenter. Aussi, cette méthode ne faisant pas partie de notre culture de mécaniciens mais de celle des informaticiens, l'UML étant extrêmement riche, son application est en extrêmement complexe et requiert de nombreuses années d'expériences comme les experts de cette spécialité nous l'ont témoigné lorsque nous avons confronté nos modèles [BIGAND & al 2006].

Un modèle définit une frontière entre la réalité et la perspective de l'observateur qui construit l'ontologie³³. Ce n'est pas la réalité, mais une vue très subjective de la réalité. Aussi, dans le cas de notre recherche, deux strates de modélisations conceptuelles à partir d'études de cas ont été identifiées :

1. la *conceptualisation du cas d'étude* : un modèle d'information instancié,
2. une *généralisation conceptuelle* applicable sur plusieurs domaines : un méta-modèle.

Suite à des discussions et débats animés avec les historiens, nous nous sommes mis d'accord pour affirmer qu'il n'est pas possible de réaliser une abstraction de l'Histoire tant celle-ci est riche et complexe car fonction des contextes d'évolutions passées ainsi que de la grille de lecture de l'expert. La complexité de notre domaine d'étude nous a alors confronté à une impossibilité d'établir le premier niveau conceptuel. Aussi, il fut nécessaire d'acquérir une sémantique encore plus large et atteindre le stade de méta-modèle.

³² Unified Modelling Language

³³ Une ontologie est un schéma conceptuel représentant une abstraction de la réalité ; terminologie utilisée en UML pour désigner les diagrammes objets, les diagrammes de classes...

Pour ce faire, nous n'avons pas utilisé toutes les notations UML telles que préconisées par les spécifications ; d'ailleurs remarquons que UML n'est pas considéré comme une méthode mais comme un formalisme ou une notation. Nous avons uniquement abordé ici l'aspect structurel : ce sont les *diagrammes de classes*. En effet, UML est très généraliste et permet, de ce fait, de représenter de nombreux concepts ; aussi nous avons pris soin de sélectionner les outils dont nous avons besoin. De plus, afin d'enrichir la sémantique de la modélisation pour l'adapter à notre domaine, nous avons proposé des extensions / simplifications de la notation pour prendre en compte les inflexions intrinsèques à l'Histoire.

L'annexe 1 présente les principaux éléments de ce langage ainsi que la sémantique que nous avons utilisée pour nos besoins. Résumons les formalismes principaux :

- UML est avant tout une modélisation de type entité-relation orientée *objet*. Le premier *diagramme* est donc celui des *objets* définissant des modèles à un instant donné pour une situation de la réalité. Les *objets* étant conformes à des *classes*, il est possible de définir un niveau supérieur de modélisation permettant l'*instanciation des objets* : ce sont les *diagrammes de classes*. Dans notre cas, nous avons majoritairement utilisé des *diagrammes de classes* car notre objectif est de permettre la généralisation des *objets*.
- Dans le langage UML, il est possible de représenter les *relations* liant les *classes*. Nous avons donc utilisé les différentes formes symboliques proposés par le langage comme détaillés dans l'annexe : association, agrégation, composition et généralisation.
- De plus, sur chaque lien/relation est mentionné les *attributs de multiplicités* (0, 1, n) des *classes*. Par convention dans UML, si ceux-ci sont absents, cela signifie 0..n
- Quant au bouclage interne d'une relation sur une *classe*, appelé *association réflexive*, cette pratique est courante en UML. Dans notre cas, elle permet d'enrichir fortement les modèles en limitant la complexité des schémas.
- Enfin, les listes *d'attributs* et *d'opérations* ne sont quasi jamais mentionnées car, ne visant pas une finalité informatique dans un premier temps³⁴, les restrictions induites par ces annotations auraient considérablement appauvries les modélisations et donc n'auraient plus été représentatives de la réalité des cas d'études.

³⁴ A l'issue de ces trois années de doctorat, il est envisageable de réaliser une application informatique du méta-modèle produit *sous réserve* de l'adapter à chaque cas d'études considérés.

De plus, afin d'enrichir la notation pour permettre de modéliser un domaine encore peu transposé à UML, le Passé et l'Histoire, nous avons simplifié, par un procédé mnémotechnique, les *classes d'associations* positionnées sur des *relations* entre les *classes*. Ainsi, cette notation permet de ne pas être restrictif et permettre une meilleure gestion de la diversité.

- La *multi-dimensionnalité* pour exprimer la notion de contexte à plusieurs niveaux hiérarchisés ou non ; c'est une relation de type *père-fils*,
- La *multi-temporalité* pour indiquer les notions temporelles d'évolution ; il s'agit là non pas d'établir une liste de dates mais de pouvoir prendre en compte un ensemble temporel déterminable (exemple : vision processus, cycle de vie d'un produit ou d'un site industriel, succession des générations humaines...).

Muni du langage de représentation UML, nous sommes désormais en mesure de pouvoir synthétiser nos cas d'études et créer un méta-modèle d'information. Notons toutefois que celui-ci n'est qu'une proposition. En effet, remarquons que, si d'une manière générale l'UML peut être appliquée dans de nombreux domaines scientifiques, ceci est dû au fait que seule la micro-histoire est prise en compte. Il s'agit là du pré-requis de base de l'UML : la validité d'un modèle n'est assuré que par ses conditions initiales et il doit être utilisable/applicable. C'est pourquoi les informaticiens emploient souvent le *cycle de développement en spirale* où les modèles sont construits par l'expérience.

Aussi, intégrer la méso-histoire ou la macro-histoire peut parfois conduire à des difficultés stratégiques et épistémologiques : cela signifierait que l'Univers peut être modélisé (!) Beaucoup se sont déjà heurtés à ces difficultés mais sans succès³⁵. Notre proposition est donc un premier essai utilisant une version réduite du langage. Même si ce ne sont pas les caractéristiques les plus *raffinées* ou les plus *orthodoxes* qui sont employées, l'objectif est d'explorer les compatibilités ou incompatibilités de la démarche.

On se souvient du premier SPOUTNIK lancé en 1957. C'était un objet dit de *haute technologie* pour l'époque avec sa petite taille de 58 cm de diamètre ! Essai réussi ou échec, cette première tentative a semé le doute chez les scientifiques de l'époque. Et pourtant, il s'agissait là d'un évènement précurseur d'une longue lignée de satellites...

1.3.3.4 La chronologie globale de la recherche

Similaire à un puzzle dont on découvre les pièces au fur et à mesure, la vision globale du tableau n'est possible qu'à l'issue des travaux. Mais est-il possible de savoir à quoi ressemble cette œuvre d'art ? L'objectif est-il atteint ?

³⁵ On se souvient de GOOGLE qui souhaitait, en 2003, créer un web sémantique basée sur l'UML. Idée intéressante, le résultat n'est pas pourtant toujours pas disponible sur internet ! Pourquoi ?

La métaphore ci-dessus illustre la façon dont le processus explicité dans la partie ci-avant agit. Nous espérons que cette méthodologie permettra de satisfaire aussi bien aux exigences des SPI³⁶ qu'à celles des SHS³⁷.

A l'issue de la première année, nous avons été en mesure de produire un premier document intermédiaire. Afin de répondre aux spécificités des SPI, ce rapport établit un premier état de l'art et la formulation des premières problématiques de la conservation du patrimoine technique et industriel [LAROCHE 2005].

En fin de deuxième année, nous avons également écrit un deuxième document renouvelant la dimension internaliste des objets du passé en donnant du sens aux études contextualistes, dans une perspective plus historique. L'étude réalisée respectant la déontologie de l'HT a augmenté sa valeur ajoutée par l'apport de la vision du technologue sur les fonctions, les usages et les techniques employés dans la période temporelle de l'étude menée [LAROCHE 2006]. Le chapitre 3 de ce manuscrit intitulé *Etude historique linéaire* retrace en partie cette étude.

Implémenté avec ces deux rapports et les nombreux projets réalisés, à l'issue de ces trois années, ce document final que nous présentons ici n'est qu'une première étape dans cette nouvelle problématique de recherche. Il s'agit d'un état intermédiaire qui a permis de mettre en exergue de nouvelles perspectives tant la problématique étudiée requiert des compétences et des innovations dans de nombreux domaines connexes.

Il reste tellement de pièces du puzzle à découvrir qu'une seule vie ne suffirait pas pour y arriver !

1.3.3.5 La démarche de recherche d'informations et la bibliographie

La démarche de recherche bibliographique s'appuie sur les expériences passées et les expériences actuelles vécues.

Le champ d'application de notre recherche étant très vaste du fait d'un besoin latent et non exprimé clairement de la part d'acteurs potentiels, un premier état de l'art permit de cerner les domaines concernés (chapitre 2).

La problématisation de notre recherche nous a alors conduit à une deuxième recherche bibliographique dans laquelle nous exposons les états de l'art de chacun des domaines identifiés au préalable (chapitre 3).

Un des objectifs de cette thématique de recherche étant de tester l'interopérabilité³⁸ du GI et de l'HT, nous ne sommes pas allés jusqu'aux outils... Ainsi, le chapitre 3 sur la chaîne

³⁶ Sciences Pour l'Ingénieur

³⁷ Sciences Humaines et Sociales

numérique présentera globalement les solutions logicielles et/ou matérielles ; à titre d'exemple, nous n'aborderons pas dans cette thèse les problématiques liées à la reconstruction automatique de nuages de points numérisés en 3D³⁹ et laisserons le soin aux experts du domaine de contribuer à ce projet plus global.

Notons également que beaucoup d'hypothèses sont posées et que peu de critères d'évaluation des modèles sont proposés. *Etre juge et partie* découle souvent d'une perte de neutralité et peut aller jusqu'à infirmer les modèles proposés. C'est pourquoi il nous paraît essentiel d'être le plus objectif possible en prenant toujours en considération l'ensemble des contraintes des systèmes étudiés. L'inconvénient réside alors dans l'exhaustivité des sources et de la recherche bibliographique qui fut extrêmement complexe mais riche et diversifiée. Cette thèse va dès lors tenter de mettre en corrélation l'HT et le GI. Or, chacune des disciplines utilise son propre langage, son propre vocabulaire, ses propres méthodes de travail. Une des difficultés essentielles consista alors à faire converger ces deux domaines vers une interopérabilité la plus complète possible à travers une sémantique commune dont ce document est, on l'espère, l'un des prémisses de futures collaborations (manuscrit répondant au cahier des charges fixé par le Ministère de la Recherche, voir partie 1.2.4 ci-avant).

La table bibliographique présente donc plusieurs entrées classées selon une typologie orientée SHS ou SPI. Avec cependant, un sous-découpage commun :

- les sources et les ouvrages généraux,
- Les sources issues de travaux universitaires,
- les sources périodiques scientifiques (incluant les congrès actes imprimés ou non),
- les sources diverses.

Afin d'organiser la recherche d'informations, nous nous sommes appuyés sur une cartographie telle que représentée à son niveau macroscopique dans l'annexe 2. Celle-ci fait progresser conjointement la bibliographie des SPI et la bibliographie des SHS en plaçant au centre des préoccupations l'Homme⁴⁰, la société et les objets à caractère industriel.

Cependant, les sources utilisées pour les études historiques présentent des bibliographies supplémentaires. Celles-ci sont également listées en fin de manuscrit. Le classement est propre au travail des historiens et une critique des sources au regard du sujet analysé est proposée.

³⁸ Se dit des langages informatiques, capacité à communiquer. Par extension, de nombreuses recherches sont menées actuellement pour rendre interopérable les entreprises (réseau d'excellence européen Interop www.interop-noe.org)

³⁹ 3D = les 3 Dimensions (x,y,z)

⁴⁰ La notion de l'Homme au sens large du terme est explicitée dans le prochain chapitre lors de la définition du triptyque du patrimoine.

1.3.3.6 Découpage du manuscrit et prescriptions de lecture

Comme vu précédemment dans la partie 1.3.3.2, notre démarche de recherche s'appuie sur un cycle en V modifié – le cycle en racine carrée – alternant théorie et pratique. Ainsi, le découpage de ce manuscrit répond à cette démarche globale en s'appuyant sur de nombreux projets synthétisés dans quatre cas d'études principaux :

1. Etude historique linéaire classique, étude technique et présentation de la valorisation d'une machine à vapeur des 19^{ème} et 20^{ème} siècles (chapitre 4),
2. Etude socio-économico-technique d'une machine à laver le sel de BRETAGNE du 20^{ème} siècle (chapitre 6),
3. Etude de presses d'imprimerie du 20^{ème} siècle dans un cadre didactique de conception mécanique (chapitre 7),
4. Etude interdisciplinaire d'un canot à vapeur du 19^{ème} siècle par application du rétro-processus de conception en vue de sa patrimonialisation (chapitre 7).

Chaque cas d'études permet de passer à un niveau conceptuel plus élevé afin d'établir ou d'enrichir la théorie. L'apport scientifique de cette thèse de doctorat est alors détaillé dans des chapitres insérés entre les exemples. Les quatre analyses successives présentées forment la base du plan de la thèse :

1. Phase d'analyse du besoin (chapitres 2 et 3),
2. Etat de l'art et hypothèses de premier niveau (chapitre 3),
3. Analyse et réalisation du méta-modèle conceptuel (chapitre 5),
4. Validation et itération du modèle générique (chapitres 6 et 7).

Cependant, l'état de l'art du chapitre 3 permettant de valider le postulat de base formalisé à l'issue du chapitre 2 (hypothèse n°0), il peut également être considéré comme un cas d'étude du terrain scientifique à part entière. De plus, pour une meilleure compréhension du *méta-modèle* orienté *produit-processus*, l'instanciation et la validation du modèle générique par des cas d'études sont confondus dans les chapitres 6 et 7.

Enfin, l'ensemble du manuscrit est encadré par un préliminaire (chapitre 1) et un bilan amenant à la discussion pour envisager de nouvelles perspectives de recherche (chapitre 8).

Le graphique de la figure 9 illustre notre démarche globale et la structure de ce manuscrit.

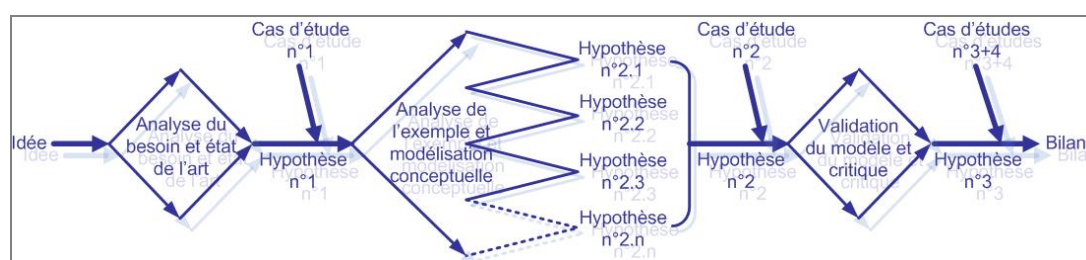


Figure 9 : DECOUPAGE DU MANUSCRIT ET APPORT SCIENTIFIQUE

1.4 SYNTHÈSE ET HYPOTHÈSES DES APPORTS SCIENTIFIQUES

Ce premier chapitre nous permet d'identifier ce pourquoi cette recherche a été initiée. Les données d'entrées et de sorties sont alors proposées par la figure 10, inspirée du formalisme SADT⁴¹. Cette méthode, utilisée couramment dans les entreprises, est expliquée dans l'annexe 3.

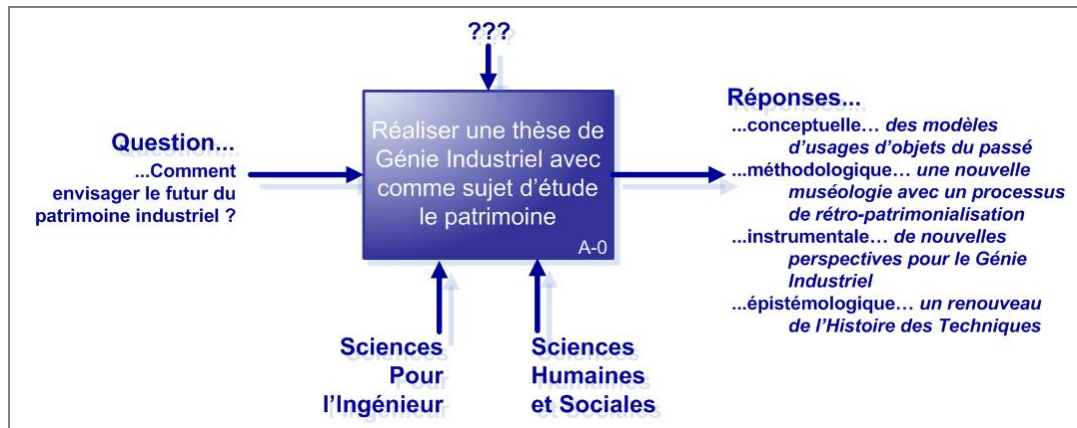


Figure 10 : POSITION ET CONTENU DE MA RECHERCHE SADT VERSION 1

Outre la validation de l'interopérabilité de l'Histoire des Techniques et du Génie Industriel comme nous le démontrerons dans les chapitres 2 et 3, nos apports scientifiques visés sont identifiés dans le SADT par plusieurs réponses thématiques se déclinant en cinq contributions :

- la *création d'un méta-modèle de données* pour décrire une situation de type *patrimoine industriel et technique* dans son intégralité complexe aussi bien *internaliste qu'externaliste* mais également *multi-temporelle et multi-dimensionnelle*,
- la *mise en place d'un nouveau processus de conception* pour guider la patrimonialisation d'un *objet technique ancien* en insistant sur la nécessité de créer une *équipe projet inter-disciplinaire collaborative*,
- un *renouveau de l'Histoire des Techniques et des pratiques muséologiques* en terme de conservation et de valorisation muséographique du patrimoine technique et industriel.
- la *mise en exergue de manques* dans les outils du Génie Industriel,
- l'*enrichissement sémantique de la méthode de modélisation UML* par l'introduction d'un domaine encore jamais transféré à cet outil conceptuel : le patrimoine technique et industriel.

⁴¹ Structured Analyse Design Technique. Méthode de modélisation d'un process selon une vue en actigramme ou en datagramme [JAULENT 1993] [MILLET 2003] [ROSS 1977].

Afin de rendre ces travaux aussi didactiques que possible, nous avons choisi de réaliser ce manuscrit de thèse dans l'esprit de synthèse des SPI tout en considérant le point de vue des SHS et réciproquement.

Aussi, pour valider l'ensemble de nos travaux et permettre une lecture des apports conceptuels plus aisée, trois chapitres sont intégralement dédiés à des cas d'études (chapitres 4, 6 et 7).

Nos démarches systémiques issues des SPI qui sont mises en œuvre dans ces exemples permettant alors d'orienter nos analyses SHS dont le contenu demeure fidèle aux pratiques des historiens, nécessitant ainsi de déployer ce manuscrit en deux volumes.

Sur le SADT précédent, on notera toutefois la présence d'incertitudes dans les éléments de contrôle représentés par le symbole ????. En effet, comme expliqué dans la partie 1.3.3.4 ci-avant, s'agissant d'un projet en recherche fondamentale, il n'existe pas de moyens de vérification.

Peut-être la seule façon de faire appel à une expertise pour un domaine non existant serait d'envisager une nouvelle étude de doctorat sur l'anti-thèse tel qu'il était de coutume de le faire il y a quelques décennies pour valider les théories scientifiques ?

En effet, souvenons-nous que lorsque GALVANI découvrit l'influx nerveux, personne dans le milieu de la biologie n'osa le contredire et lui-même ignorait que sa découverte allait changer le monde de la médecine moderne. Il faudra attendre plusieurs années pour qu'en 1791 le physicien du nom de VOLTA démentisse son hypothèse. S'en suivirent de nombreuses années de querelles par communications scientifiques interposées... lorsque en 1800, faisant intervenir une grande part de hasard, VOLTA créa le premier générateur électro-chimique. Nos ancêtres étaient loin d'imaginer que la domestication de l'électricité allait être une des origines du développement de notre société actuelle.

*La seule chose que l'on est sûr de ne pas réussir, c'est celle que l'on ne tente pas.
[Paul-Émile VICTOR]*

2. LA SITUATION DU PATRIMOINE AUJOURD'HUI

Dans ce chapitre, nous allons étudier :

1. Dans un premier temps, la définition du *patrimoine* afin d'en appréhender ses multiples dimensions aussi bien à l'échelle nationale qu'internationale. Nous pourrions ainsi cerner au mieux ce qu'il est entendu par *patrimoine industriel et technique*.
2. Dans une deuxième partie, nous étudierons les préconisations de sauvegarde et les tendances actuelles quant à sa conservation.

L'ensemble de ce chapitre n'est qu'une *porte ouverte* vers cette notion de *patrimoine* devenue sujet de mode aujourd'hui. Ne pouvant être exhaustif tant le domaine à prendre en compte est complexe, les experts reconnaîtront que les analyses faites ici ne sont que des prémices.

L'objectif de ce chapitre consiste donc uniquement à donner des éléments sur notre sujet de recherche pour un lecteur non averti de ces questions de définition et de capitalisation des connaissances patrimoniales.

Même si s'inscrivant dans une logique floue que nous avons tenté de clarifier au mieux, l'analyse problématisée de ce contexte nous permettra de déduire les questionnements principaux de notre thématique de recherche. La définition de notre sujet d'étude amènera alors des interrogations quant à la mise en place de la sauvegarde de ce patrimoine : il s'agit d'hypothèses de premier niveau que nous formulerons à l'issue du chapitre 2. Elles seront vérifiées par l'état de l'art théorique du chapitre 3 et un cas d'étude d'objet patrimonial dans le chapitre 4.

2.1 DEFINITION DU PATRIMOINE

Phénomène de mode ou de sentiment d'appartenance intellectuelle, le patrimoine culturel est désormais considéré à sa juste valeur. Il permet de justifier sa place et de s'affirmer vis-à-vis des autres. Sauvegarder son patrimoine devient une action prioritaire pour les villes, les communautés urbaines, l'ÉTAT... Au niveau local, c'est une course

quantitative à qui sauvegardera le plus dans son proche voisinage. Que ce soit les grands moulins de PARIS, la filature des établissements BLIN à ELFBOEUF, le Lieu Unique à NANTES... [USINE NOUVELLE 2006], ces lieux chargés d'histoire industrielle sont reconvertis en centres culturels ou en logements de quartiers [ANDRE 2006].

Dans ce chapitre, nous définirons ce qui est désigné par le terme de *patrimoine* et déclinons ses différents domaines d'applications.

2.1.1 LE PATRIMOINE SELON L'UNESCO

A l'échelle internationale, l'UNESCO fait autorité en la matière. Grâce à son programme de classement des sites et monuments, cet organisme certifie la valeur exceptionnelle par l'authenticité et l'intégrité du patrimoine naturel et culturel. La Convention de 1972 [UNESCO 1972] et son guide de mise en œuvre [UNESCO 2005] permettent alors aux Etats Parties⁴² souhaitant inscrire un bien sur la liste du patrimoine mondial d'être aidés dans leurs démarches :

- définition d'un bien au titre du patrimoine mondial naturel et culturel,
- processus d'inscription et critères d'évaluation,
- protection et gestion,
- structures de soutien et aspect financier.

Ainsi, lors de sa ratification par 20 pays en 1975, la convention de l'UNESCO est devenue le texte fondateur définissant ce qu'il est entendu comme patrimoine. Elle spécifie deux typologies de patrimoine :

- *Le patrimoine naturel,*
- *Le patrimoine culturel.*

Même si le nombre de biens inscrits sur la liste du patrimoine naturel est minoritaire par rapport au nombre de biens appartenant au patrimoine culturel (dans un rapport de 1 pour 3.5 environ), les critères régissant ce qu'il est entendu comme naturel sont quasi-universels. En revanche, le patrimoine dit culturel amène plus d'interrogations.

De plus, 32 ans après cette proposition de classification, on observe de nombreuses déclinaisons où chaque pays définit lui-même ce qu'il entend par patrimoine. On notera ainsi que l'introduction d'une typologie supplémentaire définissant un *patrimoine de biens mixtes* est apparue, nous approfondirons cette notion dans la partie 2.1.3.

Remarquons également que le concept de patrimoine est bien plus ancien dans un pays comme la FRANCE et remonte au 19^{ème} siècle comme nous le développerons ci-après dans la partie 2.2 dédiée à la macro-histoire de la capitalisation des connaissances patrimoniales.

⁴² Le terme d'Etats Parties est utilisé par l'UNESCO pour définir les Gouvernements ayant ratifié la convention ou concourant pour une inscription.

Dans le contexte tel qu'énoncé ici, l'ACADEMIE FRANÇAISE définit la culture comme suit :

*Ensemble des acquis littéraires, artistiques, artisanaux, techniques, scientifiques, des mœurs, des lois, des institutions, des coutumes, des traditions, des modes de pensée et de vie, des comportements et usages de toute nature, des rites, des mythes et des croyances qui constituent le patrimoine collectif et la personnalité d'un pays, d'un peuple ou d'un groupe de peuples, d'une nation.
C'est l'ensemble des valeurs, des références intellectuelles et artistiques communes à un groupe donné ; état de civilisation d'un groupe humain.*

La *culture* est la source du développement d'une société. Elle contribue à l'épanouissement de l'existence humaine sous toutes ses formes et dans sa plénitude. Liberté, créativité, il est difficile de définir un processus culturel tant la diversité des domaines d'actions est grande. La *culture* se crée à l'intérieur de chaque société et lui est propre. Dès lors, vouloir instaurer la notion de *patrimoine culturel* n'est-ce pas antinomique dans les deux termes la composant ? Cette conception des relations interculturelles ne traduirait-elle pas le principe perversif de *cultures dominantes* formellement condamné par l'UNESCO ? [PRESSOUYRE 1993]

Ainsi, comment définir ce qu'est le *patrimoine* et ce qu'il peut englober ?

Analysons en détails comment l'UNESCO définit le patrimoine matériel et dans quel cadre s'inscrit la thématique de l'industrie et de la technique.

2.1.2 LE PATRIMOINE MATERIEL : NATURE ET CULTURE

Le *patrimoine naturel* se restreint aux sites dont l'environnement est originel. En revanche, le *patrimoine culturel* prend naissance dans les liens établis entre l'homme et l'environnement naturel : c'est une domestication du terrain naturel aboutissant à une valeur ajoutée par rapport à la création de la nature.

D'après la Convention de l'UNESCO, sont considérés comme *patrimoine naturel* :

- *les monuments naturels* constitués par des formations physiques et biologiques ou par des groupes de telles formations qui ont une valeur universelle exceptionnelle du point de vue esthétique ou scientifique,
- *les formations géologiques et physiographiques* et les zones strictement délimitées constituant l'habitat d'espèces animale et végétale menacées, qui ont une valeur universelle exceptionnelle du point de vue de la science ou de la conservation,
- *les sites naturels ou les zones naturelles* strictement délimitées, qui ont une valeur universelle exceptionnelle du point de vue de la science, de la conservation ou de la beauté naturelle.

Sont considérés comme *patrimoine culturel* :

- *les monuments* : oeuvres architecturales, de sculpture ou de peinture monumentales, éléments ou structures de caractère archéologique, inscriptions, grottes et groupes d'éléments, qui ont une valeur universelle exceptionnelle du point de vue de l'histoire, de l'art ou de la science,
- *les ensembles* : groupes de constructions isolées ou réunies, qui, en raison de leur architecture, de leur unité, ou de leur intégration dans le paysage, ont une valeur universelle exceptionnelle du point de vue de l'histoire, de l'art ou de la science,
- *les sites* : œuvres de l'homme ou œuvres conjuguées de l'homme et de la nature, ainsi que les zones y compris les sites archéologiques qui ont une valeur universelle exceptionnelle du point de vue historique, esthétique, ethnologique ou anthropologique.

En utilisant un diagramme entité-relation, la figure 11⁴³ propose de mettre en corrélation les trois classes d'objets élémentaires sur lesquelles le patrimoine agit :

- L'*Homme* est défini dans son sens universel.
- La *Nature* représente le monde matériel dans lequel l'*Homme* évolue. Il s'agit de son environnement. Par distinction entre la *nature* et le *patrimoine naturel*, nous appellerons cette classe *Terre*.
- L'*Artefact*⁴⁴ représente ici un objet matériel, un *truc*⁴⁵ créé et utilisé par l'*Homme*.

Le Lien entre l'*Homme* et la *Terre* s'appuie sur une adaptation permanente de l'homme avec son environnement naturel ; un environnement inaliénable sur lequel il ne peut influencer.

Mais il arrive parfois que l'homme ne puisse agir directement sur la nature. Afin d'améliorer ses conditions de vie, il va utiliser un subterfuge pour domestiquer les éléments naturels : un artefact intermédiaire, artefact qu'il va façonner afin d'épouser au mieux les contraintes naturelles [LAROCHÉ & al 2007a].

⁴³ Ce diagramme entité-relation se base sur la méthode NIAM, Nijssen Information Analysis Method [LOMBARD 2006]. Cette méthode de modélisation conceptuelle est basée sur la linguistique. Elle permet ainsi de proposer des représentations formelles basées sur des modèles d'informations verbales/textuelles non structurées. Il s'agit d'une représentation graphique de concepts et de leurs relations. [HABRIAS 1988] [NIJSSEN & al 1989]. Sa schématique est transitoire entre la systémique (voir partie 3.2.4) et la notation UML (voir partie 1.3.3.3).

⁴⁴ Nous définirons le terme *Artefact* dans le chapitre 5.

⁴⁵ *Truc* est le terme utilisé dans la méthode APTE lors de la réalisation des bêtes à cornes de l'analyse fonctionnelle. Ce mot permet d'atteindre une généralité absolue où la solution est idéalisée. Cette large ouverture des possibilités sans *a priori* lutte ainsi contre l'inertie psychologique qui est en elle-même un frein à l'inventivité tel que ALTSCHULLER l'envisage [ALTSCHULLER 1988].

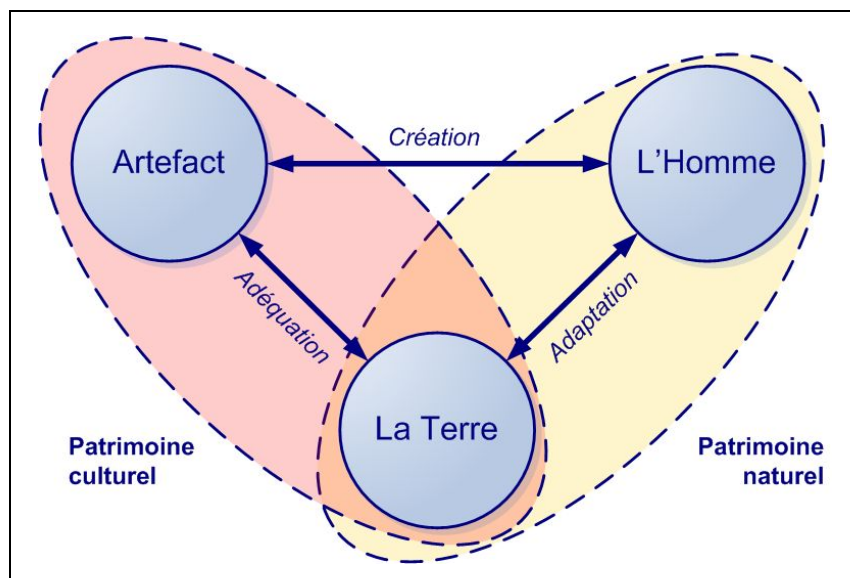


Figure 11 : LE TRIPTYQUE DU PATRIMOINE

L'analyse de la définition de la convention de l'UNESCO montre que :

- le patrimoine naturel est la relation entre les classes *Terre & Homme*,
- le patrimoine culturel se situe entre les classes *Artefact & Terre*.

Nuançons nos propos en précisant que, bien que la classe *Homme* soit indissociable du lien *Artefact / Terre*, la classe *Homme* ou bien les liens qu'elle établit avec le milieu extérieur ne sont pas au cœur des préoccupations lorsqu'un programme de sauvegarde patrimonial voit le jour.

Ainsi, dans la figure précédente, nous n'avons pas surligné le lien entre *Artefact* et *Homme* comme faisant partie intégrante du *patrimoine culturel*. En effet, selon la convention de l'UNESCO, le fondement de ce lien réside dans ce qu'il est dénommé *patrimoine immatériel*. Nous définirons cette notion de *culture immatérielle* dans la suite de ce chapitre.

On notera que cette typologie de classement des éléments afférant au patrimoine se rapproche de l'organisation de la structure associative gérant le site d'OKHRA à ROUSSILLON DE PROVENCE (84)⁴⁶. Afin de préserver ce lieu d'exploitation de l'ocre qui a fonctionné de 1912 à 1960, une organisation en trois départements (le lieu, les objets et les hommes) a permis de reconverter le site en un conservatoire des pratiques. [MARIOT 2006]

⁴⁶ <http://www.okhra.com>

2.1.3 LE PATRIMOINE TECHNIQUE ET INDUSTRIEL

Selon Léon PRESSOUYRE, l'examen critique des critères de validation de l'UNESCO⁴⁷ sur l'intégrité du *patrimoine naturel* ou sur l'authenticité du *patrimoine culturel* fait apparaître quelques faiblesses quant à l'interprétation limitative des textes suite à cette volonté de généralité [PRESSOUYRE 1993]. Ainsi, il conclut que les deux catégories de biens suivantes ne sont pas directement couvertes par la typologie proposée par la Convention mais sont sous-entendues :

- le patrimoine architectural contemporain,
- et le patrimoine industriel.

En effet, cette typologie de patrimoine peut être considérée comme du *patrimoine culturel*. Or, il ne s'agit ni de monuments, ni d'ensembles, ni de sites. La base est bien celle d'un patrimoine qui n'est pas d'origine culturelle mais il ne s'agit pas que d'éléments architecturaux s'intégrant dans un paysage, ces éléments sont plus complexes qu'une église ou une pyramide. Ainsi, PRESSOUYRE souligne que certains cas particuliers pourraient être classés comme *patrimoine* aussi bien *naturel* que *culturel* ; il cite pour illustration le processus industriel de type *rizières en terrasses* ou *culture du sel en œillets* qu'il interprète comme paysage témoin d'une activité humaine spécifique ayant profondément modifié un paysage naturel. C'est ce qu'il est dénommé *patrimoine de biens mixtes*⁴⁸.

La notion du patrimoine scientifique, technique et industriel est une idée relativement récente. C'est au ROYAUME UNI, dans les années soixante, qu'est née ce que les anglais dénomment l'*archéologie industrielle*.

Le premier objet technique classé au *patrimoine culturel* de l'UNESCO est l'IRONBRIDGE⁴⁹ en ANGLETERRE (figure 12) [ROLLAND-VILLEMOT 2001]. Ce fut la première expérimentation de capitalisation et de valorisation de patrimoine technique et industriel à l'échelon international.

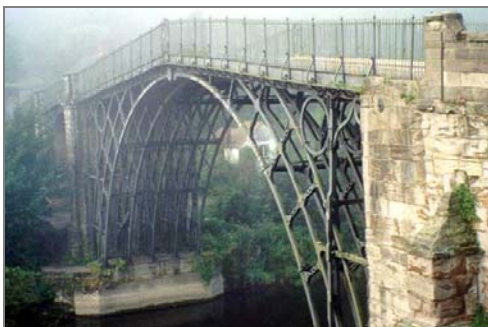


Figure 12 : IRONBRIDGE, COALBROOKDALE, SHROPSHIRE, ANGLETERRE

⁴⁷ Voir en fin de ce chapitre 2 les critères de valeur du patrimoine mondial.

⁴⁸ On entend par *patrimoine de biens mixtes* les espaces aménagés et encore exploités par l'Homme ainsi que les espaces naturels qui ont été modifiés puis sont retournés à l'état naturel faute d'activité humaine.

Jusqu'à nos jours, les Musées ont su conserver le patrimoine de multiples domaines et ce, jusqu'à la période de la Révolution Industrielle. Pourquoi ?

Pour répondre à cette question il nous faut définir ce qu'il est entendu par *patrimoine industriel*. Deux points de vue se proposent :

- celui de la macro-histoire,
- et celui de l'entreprise industrielle.

2.1.3.1 Vers une approche globalisante : entre Génie Industriel et Histoire des Techniques

Le sujet traité dans cette partie ne consiste pas à comprendre comment les technologies se sont développées ou à effectuer un bilan de leurs évolutions mais à réaliser une cartographie d'ensemble dans une pensée synthétique et conceptualisante des contextes dans lesquels elles ont évoluées. Il ne s'agit pas de réaliser de la macro-histoire ou de la micro-histoire mais de prendre en compte la stabilité et l'instabilité des systèmes socio-techniques ayant conduit à faire de la matière *Histoire Industrielle* ce qu'elle est.

Du point de vue du technologue ou de l'industriel contemporain, un aspect chronologique est rarement considéré. Traduisant l'ambivalence entre les concepts historiques établis jusqu'alors et l'approche globalisante des systèmes techniques vue par le Génie Industriel, la figure 13 propose une cartographie ne possédant, volontairement, aucune dimension :

- ni de temporalité : les deux catégories principales ont toujours existé,
- ni de niveau de complexité : quel qu'il soit, sa raison d'être est le métier et non les moyens mis en œuvres.

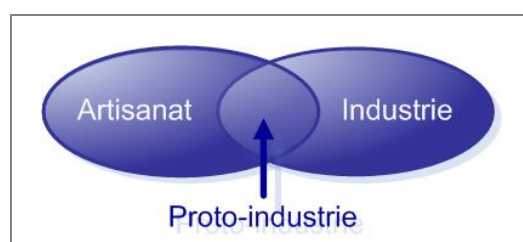


Figure 13 : VERS UNE CARTOGRAPHIE GLOBALISANTE DE L'ARTISANAT ET DE L'INDUSTRIE

⁴⁹ C 371 sur la liste des bien inscrits au patrimoine mondial [UNESCO 2004]. L'IRONBRIDGE est le premier pont en fer construit au monde en 1708. Il a été classé au patrimoine mondial de l'UNESCO en 1986.

Le terme *d'artisan* apparaît au 16^{ème} siècle. Il dérive du mot *art*, lui-même beaucoup plus ancien.

Artisan⁵⁰ :
Personne installée à son compte pour exercer un métier manuel. L'artisan se justifie par une qualification professionnelle mettant en œuvre une habileté, un métier.

Quant au terme *industrie*, il est bien plus ancien et remonte au 14^{ème} siècle. Il prend ses racines dans le mot latin *industria* signifiant *application, activité, assiduité*.

Industrie⁵¹ :
Métier manuel, mécanique ou mercantile qui comporte une certaine ingéniosité. Se dit de toute sorte d'activité concourant à la production et à la circulation des richesses. L'industrie désigne aujourd'hui l'ensemble des activités ayant pour objet l'exploitation des richesses minières et des sources d'énergie, la transformation des matières premières en produits fabriqués ainsi que chacune des branches du secteur économique concerné.

Paradoxalement, le terme *d'artisanat*, dérivé *d'artisan*, est seulement défini au 20^{ème} siècle pour répondre au besoin de décrire les modes de productions des *artisans* qui diffèrent désormais de ceux de *l'industrie*.

En effet, rappelons qu'avant le 18^{ème} siècle, seules les énergies naturelles étaient mises en œuvre comme l'eau, le vent, la force animale ou humaine. De nos jours, contrôler l'énergie signifie nucléaire, pétrole, charbon...On observe alors qu'une transition s'est effectuée lorsque les *industries* ont massivement mécanisé leurs usines grâce, entre autre, à la machine à vapeur : c'est la Révolution Industrielle.

Mais, fort de constater qu'aujourd'hui *l'artisanat* et *l'industrie* existent en parallèle, le postulat d'une barrière temporelle serait donc une erreur.

Toutefois, nuancions nos propos en précisant qu'une large période de l'évolution humaine correspond à cette croissance de l'organisation où, pour s'intégrer dans un système capitaliste, les *artisans* se sont tout d'abord regroupés dans de petits ateliers familiaux et ruraux ; puis les manufactures ont rassemblé des compétences en un seul lieu afin de rationaliser l'organisation de la production.

De plus, il n'est pas non plus question d'établir une dimension de complexité sur les deux domaines mis en relation. Par exemple, certains horlogers pratiquent actuellement leur métier comme un art : il s'agit d'un *système artisanal contemporain*. La valeur ajoutée du produit et une haute technologie ne sont pas synonymes de catégorisation. Aussi, d'un point de vue synthétique, il n'est donc pas nécessaire d'établir une classification mais plutôt une cartographie.

⁵⁰ Définition du dictionnaire de l'ACADEMIE FRANÇAISE.

⁵¹ Définition du dictionnaire de l'ACADEMIE FRANÇAISE.

Notons cependant qu'à l'intersection des deux domaines, il existe une forme primitive d'industrialisation : la *proto-industrie*. Il s'agit là d'une typologie où les éléments mécanisés apparaissent, soit dans *l'artisanat*, soit dans les manufactures.

En effet, avec la croissance des énergies mécaniques - comme les moulins à eaux ou à vent et la machine à vapeur plus tardivement - et donc la démultiplication de la force énergétique, les objets ont commencé à être manufacturés. L'homme ne travaille plus seul avec sa machine ; cette dernière est placée dans un atelier ; lui-même implanté dans une usine. La démocratisation des *systèmes proto-industriels* a également fait apparaître une complexité croissante des objets industriels et donc des équipes en charge de leurs développements [LAVOISY 2000]. La nécessité de nombreuses compétences dans des équipes pluridisciplinaires a alors contribué à créer des objets complexes s'inscrivant dans ce que les historiens dénomment désormais un Système Technique⁵².

Aujourd'hui, l'industrie a atteint un extremum où, pour optimiser sa création de valeur, l'entreprise adapte sans cesse son mode de fonctionnement et ses outils de production. La différence majeure entre *artisanat* et *industrie* réside alors dans l'organisation et la capacité à savoir s'adapter le plus rapidement possible au marché en créant des objets de grandes séries. Les outils, les machines et la gestion de production doivent être aussi flexibles que possible.

Les ST complexes sont donc caractérisés par :

- Une mécanisation des machines et des productions,
- Un renouvellement de l'offre en profondeur par une croissance du nombre des objets, de leur complexité et de leur nature (phénomène de standardisation),
- Un découplage du système énergétique et donc un possible éloignement des sources et des cycles de la Nature.

Afin de démontrer la pertinence de cette cartographie globalisante non hiérarchisable du *patrimoine technique et industriel*, nous avons choisi deux cas d'études majeurs pour illustrer notre recherche :

- Un objet industriel des 19^{ème} et 20^{ème} siècles : la machine à vapeur PIGUET (chapitre 4),
- Un objet proto-industriel du 20^{ème} siècle construit artisanalement mais intégré dans un ST industriel complexe : la machine à laver le sel de BATZ-SUR-MER (chapitre 6).

2.1.3.2 Quelques exemples considérés comme patrimoine industriel

Pour illustrer nos propos précédents, cette vision conceptuelle de *l'artisanat* et de *l'industriel* doit être mis en corrélation avec la réalité des faits par ce qu'il est entendu et

⁵² Dans la suite de ce document, nous emploierons le terme ST pour désigner les Systèmes Techniques.

conservé comme par *patrimoine technique et industriel*. Les exemples cités ici ont été choisis non pas en fonction de leur appartenance géographique ou temporelle mais de façon dispersée dans l'histoire générale [WORONOFF 1994]. Le but de cette partie 2.1.3.2 étant uniquement de mettre en lumière cette pensée socio-économique industrielle pour un lecteur non spécialiste de cette question.

D'une manière générale, la définition du *patrimoine technique et industriel* se traduit par l'analyse de l'expansion architecturale d'un site (voir PRESSOUYRE ci-avant).

En effet, le terme de manufacture apparaît très tôt. Ces complexes proposent des logements à l'intérieur de l'usine ; tout d'abord réservés aux propriétaires, ils sont rapidement ouverts aux spécialistes et aux ouvriers de l'usine. Au milieu du 18^{ème} siècle, ces lieux austères ressemblant fort étrangement à des monastères deviennent des villes-usines. Ces sites s'imagent à des châteaux-forteresse. La notion de fonctionnalité liée à l'organisation des bâtiments en fonction de la production apparaît progressivement.

Au 19^{ème} siècle, les sites de production deviennent totalement autonomes et se dotent de moyens de génération d'électricité, de systèmes de gestion de l'eau puis de voies ferrées pour le transport des matières premières et des produits finis. Une des plus belles réussites caractérisant cette période est celle du familistère de Jean-Baptiste GODIN installée à GUISE (02) et spécialisée dans la mécanisation. [DOREL-FERRE 2006]

C'est ainsi que de nombreux sites ont été classés sur la liste de l'UNESCO. Ce fut le cas de la MANUFACTURE ROYALE des Salines d'ARC-ET-SENANS⁵³ (25). Elle fut conçue à la fin du 18^{ème} siècle par l'architecte Claude-Nicolas LEDOUX sous le règne de LOUIS XV.

Même si ARC-ET-SENANS est reconnu au titre du patrimoine mondial de l'UNESCO par la valeur de son architecture et non du process industriel qu'il déployait, ce site industriel est une exception. En effet, d'une manière générale, les sites industriels *plus contemporains* ne font pas partie des priorités de conservation et de valorisation.

Nuançons nos propos en mentionnant que le site de VOLKLINGEN en ALLEMAGNE a été classé au titre des biens culturels de l'UNESCO⁵⁴. Il s'agit d'une aciérie construite fin du 19^{ème} siècle et qui demeurera le plus grand site de production sidérurgique d'ALLEMAGNE durant un siècle. Avec ses six hauts-fourneaux, sa grande soufflerie et sa machinerie unique au monde, ce symbole de l'âge d'or de l'industrie du fer et de l'acier est actuellement un Musée de l'industrie et le lieu de nombreuses manifestations et festivals aussi bien culturels qu'artistiques.

Au bilan, l'analyse menée précédemment sur une taxonomie des sites industriels en deux classes d'équivalence fait apparaître une discrimination dans les Etats Parties pouvant

⁵³ C 203 sur la liste des bien inscrits au patrimoine mondial [UNESCO 2004]. Classée en 1982, cette manufacture était destinée à extraire le sel contenu dans la saumure.

présenter des biens à caractères industriels comme PRESSOUYRE le décrit [PRESSOUYRE 1993]. Selon lui, cela signifierait que seuls les pays développés ou industrialisés qui ont été au cœur des préoccupations lors de la première ou de la seconde révolution industrielle possèderait des sites industriels. Se refusant à établir une telle distinction entre les pays, l'UNESCO décida de prendre en compte les candidatures sans limitation d'époque ni de lieu en admettant alors les propositions de type *proto-industrielles*, *artisanales* ou *traditionnelles*. Mais le revers de la médaille ne se fit pas attendre et eut l'effet inverse : peu voire pas de candidatures de *sites industriels contemporains* furent proposées et ce, à cause de la difficulté à définir ce qu'il est entendu par le terme de *patrimoine industriel*.

2.1.3.3 Définition

Pour réfuter à la question posée cette partie 2.1.3 sur la problématique de la non capacité des Musées à conserver ce *patrimoine technique, artisanal et industriel complexe a-temporel*, nous pouvons désormais y répondre de la façon suivante :

Les objets et les sites étudiés dans un cadre patrimonial se sont complexifiés dans leurs natures intrinsèques tout aussi bien que dans leurs contextes socio-économico-techniques. Ainsi, les outils et méthodes classiques de l'histoire et de la muséographie doivent être revisités car inefficients sur cette nouvelle forme de connaissance du 19^{ème} et 20^{ème} siècle.

C'est ainsi qu'en juillet 2003, TICCIH⁵⁵ proposa à l'UNESCO une charte pour définir le patrimoine industriel [TICCIH 2003] :

Le patrimoine industriel comprend les vestiges de la culture industrielle qui sont de valeur historique, sociale, architecturale ou scientifique. Ces vestiges englobent : des bâtiments et des machines, des ateliers, des moulins et des usines, des mines et des sites de traitement et de raffinage, des entrepôts et des magasins, des centres de production, de transmission et d'utilisation de l'énergie, des structures et infrastructures de transport aussi bien que des lieux utilisés pour des activités sociales en rapport avec l'industrie (habitations, lieux de culte ou d'éducation).

Ainsi, afin de ne pas émettre de jugement de valeur sur une classification hâtive, nous proposons un premier modèle UML statuant sur la classe *patrimoine industriel* à partir de cette définition, (figure 14). On distingue trois attributs :

- la description du bien industriel devenu bien patrimonial par la *raison d'être* de l'entreprise industrielle,
- la *typologie* du patrimoine représenté,
- la *valeur* que l'ensemble patrimonial transmet.

⁵⁴ C 687 sur la liste des bien inscrits au patrimoine mondial [UNESCO 2004].

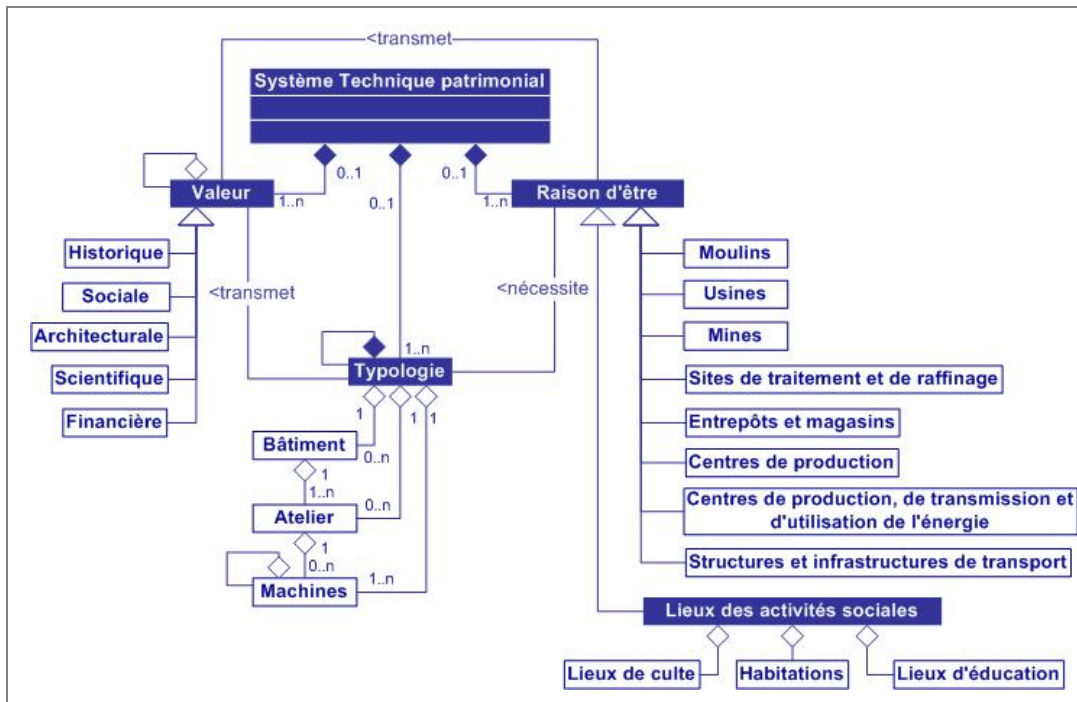


Figure 14 : DIAGRAMME DE CLASSES DE LA CLASSE SYSTEME TECHNIQUE PATRIMONIAL

La taxonomie de la classe *typologie structurante* du patrimoine physique sera définie dans le chapitre 5. La classe *valeur* peut aider à caractériser le critère d'authenticité préconisé par l'UNESCO ; la *valeur* sera elle aussi définie par la suite. La *raison d'être* n'apparaîtra plus en l'état actuel et sera déclinée dans la taxonomie de *l'entreprise* supportant l'objet technique ancien.

Dans la suite de ce document, nous considérerons cette première définition du *patrimoine industriel* comme acquise. Cependant, nous viendrons en compléter la description. En effet, les conventions acceptées ou à l'état de proposition ne font en aucun cas état des actions à mener quant à la sauvegarde du patrimoine que l'on ne peut palper : le *patrimoine immatériel*. Une notion que nous allons maintenant définir.

2.1.4 UNE PROBLEMATIQUE SOUS-JACENTE : « ET LE PATRIMOINE IMMATERIEL ? »

Comme dans toute approche de type projet, avant sa mise en place, il est nécessaire de réaliser un cahier des charges et de fixer les buts à atteindre. Malheureusement, lorsqu'il est question de sauvegarde de patrimoine, il semble évident de conserver cette connaissance (le but) mais en revanche la finalité (l'objectif) n'est jamais déterminée au lancement du projet. Le domaine des connaissances concernées n'est donc pas déterminé et il est nécessaire de capitaliser tout ce qui pourra l'être. Nous avons vu, dans la première partie de ce chapitre, que les *connaissances matérielles* représentent un axe de travail pour les

⁵⁵ TICCIH = comité international pour la conservation du patrimoine industriel

Organisations Internationales ; nous verrons par la suite que cette priorité l'est également en France.

Cependant, la classe *typologie* du *patrimoine industriel* fait apparaître une complémentarité du *contenant* et du *contenu*. Il est possible de les identifier par un axe bijectif comme illustré par la figure 15. Cette approche multi-échelle est similaire à celle utilisée dans les analyses de RDM⁵⁶ ou dans le calcul par éléments finis [HAIDAR 2002] [PEYRAUT & al 2007].

Nous développerons ce concept des *poupées russes* dans le chapitre 5.

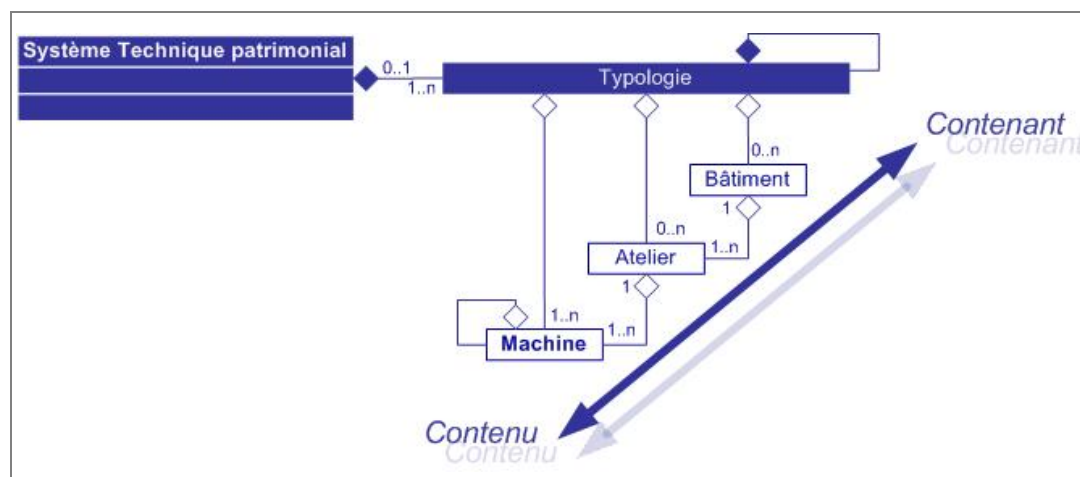


Figure 15 : DU CONTENANT AU CONTENU DE LA CLASSE TYPOLOGIE

Lorsque le *but* à atteindre est la sauvegarde d'un objet patrimonial, il existe également un rapport de réciprocité et de complémentarité entre le *fond* et la *forme* qui le caractérise d'un point de vue muséographique. En effet, Daniel THOULOZE, directeur du MUSEE DES ARTS-ET-METIERS (PARIS) précise que :

Un objet est un témoin de notre société.

Il définit un objet par deux composantes [THOULOZE 2006] :

- l'objet lui-même,
- le savoir-faire et l'environnement associé.

L'*objet* lui-même est donc le *contenu* : c'est le *patrimoine matériel*. Nous définirons dans le chapitre 5 la typologie de la classe *objet* ou *artefact*.

Ce qu'il est dénommé *environnement* n'est autre que le contexte tel que défini par la classe *Terre*. Quant au savoir-faire, THOULOZE fait allusion à ce que le GI désigne sous le nom de *Connaissance*⁵⁷. En terme patrimonial, cette notion de *Connaissance* se restreint à

⁵⁶ RDM = Résistance Des Matériaux

⁵⁷ De nombreuses recherches sont menées sur la capitalisation et la gestion des connaissances dans le monde industriel. Voir partie ci-après dans le chapitre 3 (classification des connaissances et méthodes de KM).

la mémoire vivante et n'inclut pas les *traces* matérielles et immatérielles telles que nous l'entendons ici à la lumière des SPI et des SHS.

2.1.4.1 Définition

La convention de l'UNESCO de 1972 et les recommandations suggérées par les ONG nous amènent à constater que celles-ci ne permettent pas de sauvegarder cette nouvelle typologie de patrimoine. Aussi, en 2003, lors de sa 32^{ème} session, l'UNESCO crée une nouvelle convention pour la sauvegarde du *patrimoine culturel immatériel* [UNESCO 2003]. Celle-ci s'applique aux domaines suivants :

- les traditions et expressions orales, y compris la langue,
- les arts du spectacle,
- les pratiques sociales, rituels et événements festifs,
- les connaissances et pratiques concernant la nature et l'univers,
- les savoir-faire liés à l'artisanat traditionnel.

La convention précise que le *patrimoine culturel immatériel* constitue un ensemble vivant et en perpétuelle recréation de pratiques, de savoirs et de représentations. Il permet aux individus et aux communautés, à tous les échelons de la société, d'exprimer la façon dont ils conçoivent le monde à travers leurs systèmes de valeurs et leurs repères éthiques.

Malheureusement, en France, seule la définition suivante du Ministère de la Culture est en vigueur. Celle-ci appauvrit considérablement le champ d'investigation.

Traditions, coutumes et rituels constituent le patrimoine immatériel qui trouve sa place aux côtés du patrimoine matériel dont la notion s'est élargie à certains sites naturels.

2.1.4.2 La science et la technique : un patrimoine immatériel ?

Coutumes, traditions... au bilan, la démarche est la même : il s'agit de l'action de conservation [HERREMAN 2004]. Il est entendu par *sauvegarde* les mesures visant à assurer la viabilité du *patrimoine culturel immatériel*, y compris l'identification, la documentation, la recherche, la préservation, la protection, la promotion, la mise en valeur et la transmission, essentiellement par l'éducation formelle et non formelle, ainsi que la revitalisation des différents aspects de ce patrimoine.

Dans le cas du *patrimoine industriel*, cette connaissance dite ethnologique est la complémentarité indispensable à la bonne compréhension d'un objet technique.

Comme explicité dans le chapitre 1, Sir HUXLEY nous interroge sur la question de la conservation de cette *masse de connaissances*. Mais la sauvegarde du savoir-faire est-elle justifiée dans le cadre d'objets patrimoniaux à caractère technique ?

Les historiens attachent une place essentielle à la place de l'homme entre le contexte et la production intellectuelle. Pourquoi, une fois mûre, la pomme tombe-t-elle de l'arbre ? La mise en évidence de la gravité par Isaac NEWTON est LA connaissance qui permet d'expliquer ce phénomène physique.

Prenons un exemple des plus marquants : Gustave EIFFEL et l'histoire de l'aérodynamique.

EIFFEL s'est acquis une renommée internationale grâce à sa Tour, ses ponts et les multiples structures métalliques qu'il a construites comme celle de la statue de LA LIBERTE (figure 16 [GENIE CIVIL 1883]). En revanche, il est moins connu pour être le père de la théorie de l'aérodynamisme.

De nombreuses tentatives sont menées depuis bien longtemps à travers le monde pour faire voler des objets. Le concept de portance est déjà opératoire mais personne ne l'a encore démontré par l'expérimentation scientifique.

Grâce à son appareil de chute installé au 2^{ème} étage de sa Tour puis à l'invention et la construction de ses souffleries, Gustave EIFFEL arriva à la conclusion que *la pression de l'air est plus faible au dessus de l'aile qu'au dessous* [EIFFEL 1909]. Il sera le premier à mettre en évidence les principes de la sustentation de l'air et à poser les équations de base de son fonctionnement [LEE 2005].

En moins de 100 ans, la maîtrise de cette théorie révolutionnaire a permis l'émergence d'un nouveau mode de domestication de notre environnement naturel. Aujourd'hui, la principale conséquence des travaux d'EIFFEL, du savoir-faire acquis et de ses théories en résultant, est la création d'un nouveau business extrêmement complexe et fructueux : le transport aérien.

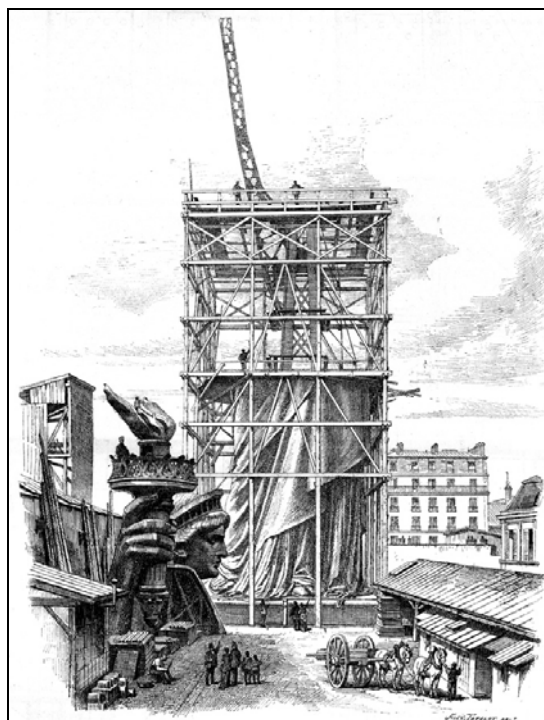


Figure 16 : MONTAGE DE LA STATUE DE LA LIBERTE DANS LES ATELIERS DE MM GAGET, GAUTIER ET CIE

Ces découvertes scientifiques et les théories en résultant sont la base de l'intelligibilité de ces objets à haute valeur ajoutée technologique. En conclusion, la science et la technique peuvent être caractérisées de *patrimoine immatériel*. Comme Louis BERGERON l'illustre en conclusion de la journée d'étude sur les possibilités de reconquête économique du patrimoine industriel qui s'est déroulée en 2006 à l'UTBM [BERGERON 2006] :

Le patrimoine industriel, ce n'est pas que des bâtiments architecturaux, c'est aussi du patrimoine matériel et immatériel, c'est aussi de la mémoire humaine.

2.1.5 SYNTHÈSE

La définition du *patrimoine immatériel* va donc plus loin que celle de la culture traditionnelle et populaire. L'ontologie du domaine du *patrimoine industriel* se définit alors comme illustré par la figure 17. La lecture peut s'effectuer pour définir la classe *patrimoine* (du haut vers le bas) ou pour définir la classe *patrimoine industriel* désormais enrichie de cette nouvelle définition du *patrimoine immatériel* (du bas vers le haut).

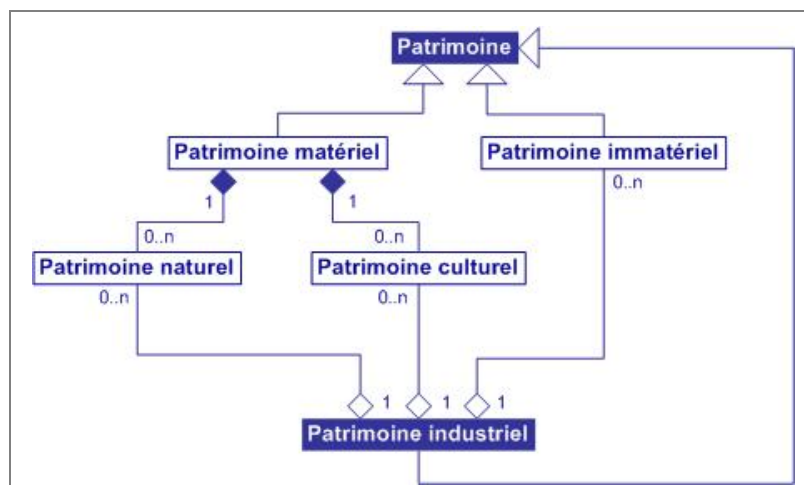


Figure 17 : DIAGRAMME DE CLASSES DU PATRIMOINE ET DU PATRIMOINE INDUSTRIEL

Le *patrimoine industriel*, par ses caractéristiques intrinsèques de l'architecture propre, est considéré comme du *patrimoine culturel* ; cependant, il nécessite également un savoir-faire pour pouvoir être expliqué. Une machine à vapeur exposée dans un Musée mais pour laquelle on ne connaît ni sa provenance, ni son constructeur et encore moins la raison de son utilisation, est-il utile de la conserver ? C'est un beau *meuble*⁵⁸, c'est certain ! De plus, dans la dérive actuelle où tout objet patrimonial se doit d'être sacralisé ou exposé dans un Musée, que faire avec les sites industriels complets ?

Le *patrimoine immatériel* va dès lors prendre une place centrale dans la suite de nos travaux de recherche car il constitue le cœur et la raison d'être des *objets techniques anciens*.

⁵⁸ La question de la classification des objets patrimoniaux pose également de nombreuses questions en terme de finalités et de possibilités de valorisation. Nous verrons dans la suite de ce chapitre, l'impact que de tels actes peut avoir sur l'avenir d'un objet patrimonial.

2.2 COMMENT CAPITALISER CETTE CONNAISSANCE ?

Après avoir recentré le sujet de notre étude, voyons quelles actions sont actuellement mises en place pour sauvegarder ce *patrimoine*. Les experts reconnaîtront que les analyses faites ici ne sont que des prémices tant le domaine à prendre en compte est complexe. L'objectif de cette partie 2.2 est d'éclairer notre sujet pour un lecteur non averti des moyens de capitalisation des connaissances patrimoniales.

Les intérêts fondamentaux de la nation s'entendent au sens du présent titre de son indépendance, de l'intégrité de son territoire, de sa sécurité, de la forme républicaine de ses institutions, des moyens de sa défense et de sa diplomatie, de la sauvegarde de sa population en France et à l'étranger, de l'équilibre de son milieu naturel et de son environnement et des éléments essentiels de son potentiel scientifique et économique et de son patrimoine culturel.

Cette citation est issue de l'article 410-1 du Code Pénal⁵⁹ [LEGIFRANCE 2006]. Il s'agit avant tout de la DST⁶⁰ qui recherche les informations puis, si la sécurité du territoire est menacée, elle en informe les autorités compétentes. L'objectif premier étant bien entendu de préserver les idées et les valeurs de la FRANCE. Le terme *sauvegarde du patrimoine culturel* est généralement associé à la défense liée à l'espionnage et/ou au vol répréhensible par les Douanes. Malheureusement, les termes du Code Pénal ne sont pas tous interprétés comme les experts du patrimoine l'entendent ou comme nous l'envisageons dans le cadre de cette problématique de recherche.

Autant de contradictions qui tendent à prouver que dans les faits, peu, voire pas de méthodes ou d'outils formalisés existent pour aider à sauvegarder notre *patrimoine* dans son aspect général. Les actions menées pour sauvegarder le patrimoine font souvent l'objet de communications et c'est dans ces conditions où l'aspect publicitaire joue un rôle prépondérant que les actions de sauvegarde du patrimoine sont ciblées. C'est donc une reconversion économique où, comme le précise Robert BELOT [BELOT 2006] :

Il faut transformer de l'inutile en culturel.

Un des exemples les plus marquants de cette année 2007 est celle de la candidature de l'œuvre de VAUBAN sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO. 300 ans après sa mort, 14 sites censés être les plus représentatifs de l'œuvre du bâtisseur VAUBAN ont été sélectionnés⁶¹. Les 14 villes françaises ont pour beaucoup profité de cet événement en proposant toute l'année des manifestations dans leurs citadelles ou leurs fortifications afin d'accueillir les experts de l'ICOMOS dans les meilleures conditions possibles. Mais cet engouement sera-t-il pérenne après 2007 ?

⁵⁹ Titre 1 : Des atteintes aux intérêts fondamentaux de la nation.

⁶⁰ DST = Direction de la Surveillance du Territoire

⁶¹ <http://www.sites-vauban.org>

Pour comprendre la situation dans laquelle le patrimoine français fait actuellement parler de lui si occasionnellement, nous devons retourner quelques temps en arrière.

Nous débiterons par les origines de la création du mot patrimoine en FRANCE à l'époque de la REVOLUTION. Après avoir analysé comment le *patrimoine immatériel* a été transmis grâce aux écoles d'ingénieurs sous NAPOLEON, nous terminerons à l'époque d'André MALRAUX lors de la création du MINISTERE FRANÇAIS de la CULTURE et des associations scientifiques internationales, comme TICCIH ou l'ICOMOS, missionnées par l'UNESCO pour cerner tous les enjeux liés à la problématique de *conservation* de sites de *patrimoines matériels*. La *valorisation* du *patrimoine matériel* sera, quant à elle, abordée à travers les structures de l'ICOM et de l'OCIM. Enfin, les critères d'évaluation de l'UNESCO et le Code français du patrimoine permettront de caractériser la classe *valeur* définie précédemment.

2.2.1 HISTOIRE DE LA CULTURE ET DU PATRIMOINE EN FRANCE PUIS A L'INTERNATIONAL

2.2.1.1 La loi de 1792 pour la protection du patrimoine français

Quelques mois après la prise de la BASTILLE, il est décidé par décret de l'Assemblée constituante le 2 novembre 1789 que les biens de l'Eglise sont mis à la disposition de la Nation.

Les archives nationales sont créées le 7 septembre 1790 et c'est le 13 octobre de la même année que Charles de TALLEYRAND intervient à l'Assemblée constituante pour défendre la conservation de ce qui est dénommé à l'époque les *chefs d'oeuvre des arts*. L'Assemblée crée alors la Commission des Monuments qui est en charge d'étudier le sort des *monuments des arts et des sciences*. Dans les faits, cette commission a pour objectif d'inventorier et de gérer le produit artistique des confiscations des biens de l'Eglise, de la couronne et des émigrés. Quelques années plus tard, en 1837, cette commission se transforme en Commission des Monuments Historiques et s'inscrit dès lors dans la grande tradition de l'inspection et de l'inventaire du patrimoine culturel architectural français. Un statut qui n'a pas évolué depuis 170 ans...

En complément du décret de 1789, une instruction du 22 novembre 1790 ordonne que les manuscrits, les monuments, les statues, les tableaux, les dessins et les autres objets provenant du mobilier des maisons ecclésiastiques soient conservés et désormais considérés comme faisant partie des biens nationaux.

Mais il est ordonné par décret du 14 août 1792 de détruire tout symbole afin de ne laisser aucune trace de l'Ancien Régime. Cependant, le 16 septembre 1792, l'Assemblée législative revient sur sa décision et vote une loi pour la conservation des *chefs d'oeuvre des arts* menacés par la tourmente révolutionnaire. Un des premiers objectifs de sauvegarde est le Muséum, qui prendra par la suite le nom de Musée du LOUVRE. De même, afin de veiller à l'application de cette loi de conservation des chefs d'oeuvre de l'art il sera créé quelques temps plus tard la Direction Générale des Musées. [MERCIER 1989]

2.2.1.2 La création du Conservatoire des Arts-et-Métiers

Curé d'EMBERMESNIL (54) depuis 1782, Henri GREGOIRE est l'un des 291 représentants du Clergé aux Etats Généraux de 1789. Ouvert d'esprit et tolérant, il œuvre activement pour l'intégration des Noirs et des Juifs, la liberté des cultes, la diffusion et l'exploration des savoirs. Nommé évêque de BLOIS le 14 février 1791, il fonde, le 10 octobre 1794, le Conservatoire des ARTS-ET-METIERS, dans lequel il s'implique très activement comme démonstrateur entre 1798 et 1800. Le 25 juin 1795, il crée le Bureau des longitudes avant d'être élu, le 21 octobre, au Conseil des Cinq-cents, et reçu comme membre de l'Institut en 1796.

Adoré, détesté, controversé, *panthéonisé*... l'abbé GREGOIRE meurt en 1831 laissant derrière lui l'œuvre d'un grand penseur et d'un humaniste à l'esprit critique et à l'intelligence vive, ouvert à toutes les voies du progrès.

En effet, sa bataille pour l'instauration du Conservatoire des ARTS-ET-METIERS portera ses fruits puisqu'elle deviendra une base déterminante pour la formation des apprentis et des techniciens puis des ingénieurs en FRANCE. Pour illustrer les débuts du Conservatoire, voici l'extrait d'une correspondance de BERKHEIM dans laquelle il prend le point de vue d'un touriste aux ARTS-ET-METIERS en 1806⁶² [BERKHEIM 1809] :

Dans le nombre des choses remarquables réunies dans ce Conservatoire, on distingue une machine faite à Londres pour mesurer le cercle, d'une précision étonnante ; ainsi que dans les salles basses, des machines pour fileries en soie et coton, de l'invention du fameux Vaucanson. Une autre salle est destinée aux instrumen(t)s nécessaires pour l'économie rurale et pour l'agriculture. Cette collection, qui est portée au plus grand complet, augmente encore de jour en jour par les modèles de toutes les nouvelles inventions en fait d'arts, métiers et mécaniques qui y sont placés. Des professeurs attachés à cet Institut, donnent des leçons dans toutes les différentes parties de la technologie ; et pour ce qui est des machines de filatures, chaque ouvrier qui veut en apprendre le mécanisme et la manipulation, à la faculté de venir travailler aux modèles qui s'y trouvent, pour s'instruire.

2.2.1.3 La formation des technologues et les sociétés savantes d'ingénieurs

Jusqu'à la Renaissance, les hommes de la technique dédiés à la réalisation de machines ou de fortifications militaires mettent à profit des savoirs et des métiers très diversifiés. Léonard de VINCI et les premiers ingénieurs civils renforceront la définition de technologie [MOSCHEROSCH 1656] par laquelle il est désormais entendu comme :

Technologie = Ensemble des termes techniques propres aux arts, sciences et métiers.

Puis, après le programme des fortifications françaises de VAUBAN ou la réalisation du Canal du Midi par Pierre-Paul RIQUET et François ANDREOSSY [COTTE 2003], on note en

⁶² Cette lettre est exposée sur une plaque de verre dans la chapelle du Musée des ARTS-ET-METIERS.

FRANCE, la création d'un Corps des Ingénieurs des Fortifications en 1691. Au début du 18^{ème} siècle de nombreux autres Corps s'en suivront : Génie, Ponts-et-Chaussées...

L'ingénieur est celui qui ruse avec les matériaux, les machines et les hommes pour créer et gérer des projets qu'il n'aurait été possible d'imaginer. Paul RASSE [RASSE 1997] définit le terme d'ingénierie comme :

Ingénierie = La fonction visant à maîtriser un système complexe mais précaire.

Il s'agit d'utiliser la science et les découvertes scientifiques à des fins utiles pour améliorer les conditions de l'homme. Mais ces *techniques* ne peuvent s'inventer et de nombreuses écoles vont se créer depuis jusqu'à nos jours pour transmettre l'ensemble de ces *connaissances immatérielles*.

On notera ainsi, en FRANCE, la naissance de l'ECOLE CENTRALE en 1829. Toutefois, dès le début du 19^{ème} siècle, remarquons le cas particulier du Conservatoire National des ARTS-ET-METIERS⁶³ qui se distingue des autres structures également dédiées à la formation technique. Destinée à une vocation professionnalisante, sa formation transmet les bases académiques par des enseignements appliqués ; exemple : instauration des cours de géométrie descriptive vers 1820 [BOROWCZYK 2007]. Elargissant ses activités non plus qu'à la formation des ingénieurs, le CNAM apparaît au 20^{ème} siècle comme une école d'*arts appliqués* pouvant parfois créer un différent avec les grandes écoles traditionnelles proposant de multiples bases scientifiques théoriques.

Au bilan, on dénombre six écoles d'ingénieurs en France en 1800, une cinquantaine après 1900 et près de 200 après 2000 [LAMARD & al 2005].

Sur la longue durée de l'évolution des écoles d'ingénieurs, on observe que des fossés culturels se creusent entre les pays. Des stratégies très différentes dans le mode de fonctionnement des écoles d'ingénieurs font apparaître deux voies d'apprentissage :

- Apprendre les bases théoriques et les appliquer à des projets concrets,
- Appréhender le terrain pour en retirer les théories nécessaires à de futurs projets.

C'est le cas du modèle Français se voulant très intellectuel qui se heurte à la culture anglosaxonne souhaitant, elle, s'approprier une expérience à partir des grandes réalisations de ses pères. Quelques deux cents ans après, il est donc normal et nécessaire que tout ingénieur anglais ou américain se doive d'appartenir à la Société Savante de son métier. On citera : *Institution of Civil Engineers* de LONDRES, *American Society of Civils Engineers*⁶⁴ ou *Institution of Civil Engineers*⁶⁵ aux ETATS-UNIS... Rappelons que les ingénieurs ne pouvaient appartenir qu'à deux corps de métiers principaux : le militaire ou le civil. Cet héritage durera

⁶³ CNAM = Conservatoire National des ARTS-ET-METIERS

⁶⁴ <http://www.asce.org>

⁶⁵ <http://www.ice.org.uk>

jusqu'au début du 20^{ème} siècle : l'ingénieur civil pouvant alors aussi bien construire des ponts, des systèmes de transports d'eau que des bateaux ou des usines.

2.2.1.4 Quelques structures françaises d'aide à la valorisation des connaissances immatérielles

En parallèle de la formation des technologues, les connaissances fondamentales capitalisées grâce au patrimoine doivent également être diffusées dans les milieux professionnels.

Ainsi, on note des sociétés ou des associations ayant comme objectif la vulgarisation scientifique comme l'ANRT⁶⁶, le CNISF⁶⁷ ou encore les CCSTI⁶⁸ depuis 1981.

De plus, de nombreux groupes de recherche ou de congrès s'interrogent sur la rupture entre les *scientifiques* et les *littéraires* ou entre la *théorie* et la *pratique*. C'est le cas des congrès de l'AMCSTI⁶⁹ qui, depuis, 25 ans, cherchent à renouer des liens entre les citoyens et les acteurs de la culture scientifique et technique. Citons également le groupe ReForEHST⁷⁰ constitué depuis peu et rassemblant à l'origine essentiellement des enseignants-chercheurs d'IUFM français. Ils souhaitent réinjecter l'histoire des domaines de la science complexe dans la formation des maîtres afin qu'à leur tour, les enseignants puissent avoir une autre approche devant les élèves.

Notons le cas particulier du Comité des Travaux Historiques et Scientifiques créé en 1831 pour fédérer l'ensemble des sociétés savantes de FRANCE. Actuellement rattaché au ministère de l'Education Nationale, le CTHS⁷¹ organise chaque année, et depuis sa création, un colloque qui rassemble des scientifiques, des universitaires ou des historiens passionnés. Pas d'entreprises, pas d'ingénieurs ni de technologues lors de ces journées, cela ne traduirait-il pas un décalage entre le monde réel et une représentation imagée idéalisée ?

Cependant, afin de faire converger la recherche universitaire et le monde de la conservation du patrimoine, le Comité d'Information et de Liaison pour l'ArChéologie⁷² est fondé en 1978 par des institutions universitaires, des Musées et des Ecomusées ainsi que le Gouvernement. Son premier objectif est d'accueillir en 1981, la 5^{ème} conférence internationale sur le patrimoine industriel mais également de constituer à plus long terme une association de référence pour promouvoir cette typologie de patrimoine.

⁶⁶ Association Nationale de la Recherche Technique - <http://www.anrt.asso.fr>

⁶⁷ Conseil National des Ingénieurs et Scientifiques de France - <http://www.cnisf.org>

⁶⁸ Centre de Culture Scientifique, Technique et Industrielle

⁶⁹ Association des Musées et des Centres pour le Développement de la Culture Scientifique, Technique et Industrielle - <http://www.amcsti.fr>

⁷⁰ REcherche et FORMation en Épistémologie et Histoire des Sciences et des Techniques - <http://plates-formes.iufm.fr/ehst>

⁷¹ CTHS = Comité des Travaux Historiques et Scientifiques

⁷² CILAC = Comité d'Information et de Liaison pour l'ArChéologie - <http://www.cilac.com>

Aujourd'hui, le CILAC est composé d'historiens, de chercheurs, d'architectes, d'ingénieurs, de chefs d'entreprises, de professionnels du patrimoine, de Musées et d'Ecomusées industriels ou techniques, d'associations régionales ou locales et d'un grand nombre de personnes intéressées à titre individuel par le patrimoine industriel.

Ses missions principales sont :

- d'encourager, sur l'ensemble du territoire national, outre-mer inclus, l'étude, la sauvegarde et la mise en valeur du patrimoine de l'industrie, sans aucune limite chronologique ou catégorielle,
- de favoriser les échanges et la réflexion collective au sein du mouvement,
- de faire connaître le plus largement possible en France et à l'étranger, les initiatives développées à travers notre pays.

A l'initiative de la revue *Archéologie Industrielle* en France, le CILAC se veut non limitatif quant à sa définition du patrimoine industriel. Malgré tout, le renouveau de l'histoire des techniques n'est pas encore en marche et cette revue est grandement implémentée par des articles sur l'architecture ou les écomusées. Parler de vis, de boulons, de systèmes de crémaillères... serait un affront à notre culture et à l'idée même que les français se font du patrimoine !

En conclusion, à l'exception des Musées, le savoir-faire spécialisé issu d'un travail approfondi de capitalisation des connaissances du passé est peu connu ou mal mis à disposition des industriels susceptibles de l'utiliser.

En effet, sauvegarder, analyser et comprendre les objets du Patrimoine Passé peut permettre de les transformer en Capital Présent. Dès lors, cette culture technique s'avèrerait transposable à des domaines d'applications connexes et pourrait même devenir une source d'innovation pour anticiper notre futur et aider les industriels à créer les objets de demain.

Si ce n'est par les écoles ou par les associations, comment diffuser le savoir et le capitaliser à bon escient afin qu'il ne reste pas en boucle fermée comme nous l'avons vu ici dans le cas du CTHS ? Aussi, demandons nous si le Ministère Français de la Culture ne pourrait assumer ce rôle de diffusion en interagissant avec le Ministère de l'Industrie ?

2.2.1.5 Le Ministère Français de la Culture

A ces débuts en 1959, le Ministère de la Culture est rattaché au Ministère de l'Education Nationale. Il est né de la volonté d'André MALRAUX qui, avec des moyens initiaux limités souhaite professionnaliser ses fonctionnaires et augmenter les budgets en vue de grands travaux symboliques pour la culture en FRANCE. Selon lui, la culture doit déboucher sur une pratique et ne pas rester théorie scolaire :

"La connaissance est à l'Université ; l'amour est à vous."
[André MALRAUX]

Mais selon Hélène MATHIEU, les événements de mai 1968 vont bouleverser cette vision utopique. La mise à plat qui s'en suit décide que les professionnels de la culture doivent travailler avec des professionnels. Désormais, les prérogatives du Ministère de la Culture seront orientées vers la *création* au détriment de *la culture populaire*.

Cette décision va alors induire une divergence entre le monde institutionnel et le monde associatif qui s'observe encore de nos jours : lorsqu'une association demande une subvention à une quelconque instance de la culture au gouvernement, il en découle une lutte acharnée pour obtenir quelques fonds. [MATHIEU 2005]

2.2.1.6 Les aides aux Musées : OCIM et ICOM

Afin de palier à ce manque de *la culture populaire* et dans un objectif d'uniformisation de la valorisation des collections patrimoniales françaises, l'Office de Coopération et d'Information Muséographiques⁷³ est créé en 1985. Il s'agit d'un centre de ressources financé par le Ministère délégué à l'Enseignement supérieur et à la Recherche et rattaché en tant que service général de l'Université de BOURGOGNE. Ciblant les professionnels des Musées et des centres de vulgarisation scientifique, l'OCIM s'est fixé plusieurs missions :

- contribuer à la formation des professionnels du patrimoine,
- promouvoir la recherche en muséologie et en muséographie,
- proposer un ensemble de ressources nécessaires au développement des Musées et des centres de science,
- collecter l'information relative aux institutions muséales, et en assurer la diffusion,
- favoriser les coopérations entre institutions muséales européennes et extra-européennes.

En effet, au niveau international, les ONG font face dès le début du 20^{ème} siècle à cette difficulté de manque de méthodologie pour la conservation et la valorisation du patrimoine. C'est ainsi qu'est créée en 1946 une organisation non gouvernementale : l'ICOM⁷⁴. Il s'agit d'une association qui entretient des relations formelles avec l'UNESCO. Elle s'engage à préserver les collections muséographiques et à assurer le transfert à notre Société des valeurs, aussi bien actuelles que futures, du patrimoine culturel et naturel mondial conservé par les Musées. Les actions de l'ICOM rejoignent celles de l'OCIM, nous ne les détaillerons donc pas.

⁷³ Egalement dénommé OCIM - <http://www.ocim.fr>

⁷⁴ International COuncils of Museums ; Conseil International des Musées - <http://icom.museum>

2.2.1.7 Les structures internationales de sauvegarde

A plus large échelle, dépendant directement de l'ONU, l'UNESCO est une Organisation Internationale pour l'Education et la Culture. Elle s'appuie sur des structures autonomes au même titre que l'est l'ICOM.

La distinction effectuée au début de ce chapitre dans la taxonomie du patrimoine fait également apparaître deux typologies de structure : l'ICOMOS pour le *patrimoine culturel* et l'IUCN pour le *patrimoine naturel*.

L'IUCN⁷⁵ a été créée en 1948. Elle a pour rôle d'évaluer et d'assurer le suivi de l'état de conservation des biens présentant une valeur naturelle exceptionnelle.

En terme de patrimoine culturel, l'ICOMOS⁷⁶ fait autorité en la matière. Ce Conseil a été fondé en 1965. Comme spécifié à l'alinéa 34 du Guide de mise en oeuvre de la Convention du patrimoine mondial [UNESCO 2005], son rôle originel consiste à favoriser l'application de la théorie, de la méthodologie et des techniques scientifiques à la conservation du patrimoine architectural et archéologique.

Dans la pratique, après vérification auprès des compétences spécifiques de la complétude des propositions d'inscription reçues par l'UNESCO, les dossiers sont transmis à l'ICOMOS. Le panel d'experts à sa disposition a alors en charge d'évaluer et d'assurer le suivi de l'état de conservation des biens du patrimoine mondial possédant une valeur culturelle. Ces experts se distinguent en deux catégories :

- les universitaires spécialisés effectuant un travail de recherche documentaire pour se prononcer sur la *valeur universelle exceptionnelle* du bien,
- les experts ayant l'expérience pratique de la gestion et de la conservation de certains biens auxquels il est demandé d'effectuer des missions sur sites. Ces derniers proviennent de Comités scientifiques internationaux tel que le Comité TICCIH⁷⁷.

2.2.2 DES CRITERES POUR CERTIFIER LE PATRIMOINE

Au vu de l'analyse précédente sur les structures et les raisons de la mauvaise compréhension quant à l'interprétation de la définition du terme *patrimoine* en France, que penser du *patrimoine industriel* ? Ces *biens* qui ne sont pas particulièrement *beaux* comme des châteaux ou des églises... ? [FLON 2005]

Les structures de sauvegarde s'appuient sur des textes de lois, des aides à la certification d'objets patrimoniaux. Nous avons vu précédemment les éléments correspondants à la loi de 1792 ou ceux du code Pénal Français. Cependant, deux

⁷⁵ IUCN = Union mondiale pour la nature ; anciennement l'Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources - <http://www.iucn.fr>

⁷⁶ ICOMOS = Conseil International des Monuments et des Sites - <http://www.international.icomos.org>

prescriptions essentielles viennent en compléter la définition : le Code du Patrimoine Français et les critères proposés par l'UNESCO pour l'évaluation de la valeur universelle exceptionnelle des biens.

2.2.2.1 Le code du patrimoine : entre mobilier et immobilier

Le patrimoine s'entend, au sens du présent code, de l'ensemble des biens, immobiliers ou mobiliers, relevant de la propriété publique ou privée, qui présentent un intérêt historique, artistique, archéologique, esthétique, scientifique ou technique.

La définition du patrimoine décrite par le Code du patrimoine expose les bases de ce qui est entendu en FRANCE comme patrimoine. Cependant, on observe une dérive quant à l'interprétation des textes de lois pour la sauvegarde de tout objet mobilier ou immobilier portant la caractéristique *industrielle*. En effet, cette dérive du *patrimoine industriel* vers *l'architecture industrielle* induit la confusion entre :

- la forme = l'enveloppe architecturale,
- le fond = le processus technique ou industriel.

Le Code du patrimoine a été refondé en 2003 [LEGIFRANCE 2007]. Il propose cinq livres thématiques abordant successivement les problématiques liées :

- aux archives,
- aux bibliothèques,
- aux musées,
- à l'archéologie,
- aux monuments historiques.

Il comprend également deux livres supplémentaires contenant des dispositions transversales consacrées

- à l'acquisition et à la protection du patrimoine,
- à l'application à l'outre-mer.

Outre le classement *grand site*, lorsqu'il s'agit d'objets ou de lieux à caractère industriel, la seule catégorie dans laquelle ceux-ci peuvent s'inscrire est celle des monuments historiques. PRESSOUYRE fait remarquer que certains Etats parties établissent des distinctions juridiques absolues entre les sites, les immeubles et les meubles [PRESSOUYRE 1993]. C'est le cas en FRANCE où la section *monuments historiques* se découpe en deux sous-catégories :

- les immeubles,
- les objets mobiliers.

⁷⁷ Voir partie 2.1.3.3

On entend par *immeubles* tout objet ne pouvant bouger. Par conséquent, une machine industrielle, quelques soient ses dimensions, ne peut être classée que dans la catégorie mobilier. Cependant, si une machine a été construite dans une usine c'est pour répondre à un besoin précis. Elle interagit avec l'ensemble du processus industriel et le complexe industriel du site dans laquelle elle est installée. Or, son classement sur la liste nationale du patrimoine mobilier autorise, selon l'article L622-28 du Code du Patrimoine, son déplacement.

*Hors de son milieu et de son contexte, l'objet perd toute signification :
c'est un non-sens épistémologique !*

Un exemple...

En 2005, la grue TITAN 01 du quai WILSON à NANTES (figure 18) a été classée sur la liste du patrimoine national des monuments historiques au titre des objets mobiliers [KEROUANTON 2004]. Construite par les ateliers Joseph PARIS pour les chantiers DUBIGEON, elle fut mise en service fin 1966. Cette grue marteau à crinoline sur fût fixe et portique roulant asymétrique est basée sur un brevet belge. Voici sa carte d'identité :

- dimensions : 16 mètres de base, 47 mètres de hauteur, 70 mètres de longueur de flèche,
- poids total à vide : 352 tonnes,
- poids de levage : 30 tonnes (à 42 mètres) et 60 tonnes (à 24 mètres).

Le projet supporté par la DRAC⁷⁸ Pays de La Loire fut un succès relatif. Cette grue a bien été sauvegardée au titre des monuments historiques ; mais elle est considérée comme du patrimoine mobilier au même titre que la casserole n°12 de la cuisine n°2 au sous-sol du château de VERSAILLES ! Autrement dit, si pour une raison ou une autre, un Musée en FRANCE souhaite monter une exposition sur l'aménagement portuaire à la fin du 20^{ème} siècle, la Mairie de NANTES⁷⁹ (détenteur actuel de la grue) devra justifier avec ardeur et bon sens qu'un tel déplacement de ce mobilier de 352 tonnes est impensable.

L'annexe 4 est le plan original A0 réduit en A4 de cette grue dessinée le 29 décembre 1965.

[AYRAULT 2002]

⁷⁸ DRAC = Direction Régionale des Affaires Culturelles

⁷⁹ La mairie de NANTES est l'actuel détenteur de la Grue 01. Elle l'a rachetée au port autonome de NANTES dans les années 2000.

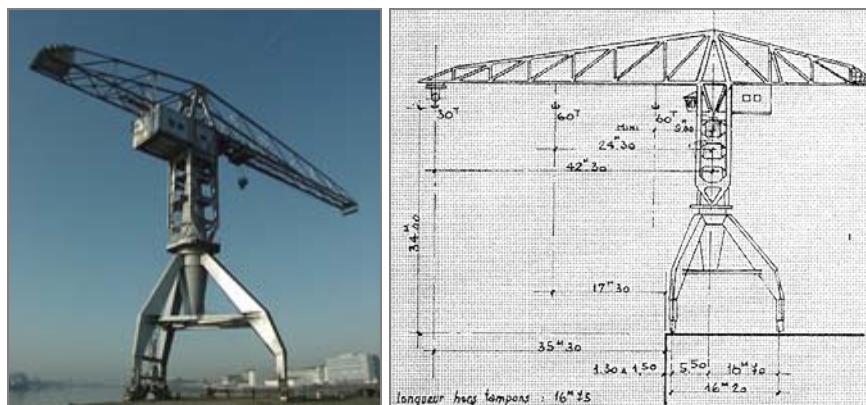


Figure 18 : GRUE TITAN 01 – PHOTOGRAPHIE EN 2006 ET CROQUIS ORIGINAL DE 1965

Notons de plus qu'en terme de distinction entre le patrimoine mobilier et immobilier, la convention de l'UNESCO fait état de différences dans le patrimoine physique : sites et monuments se distinguent des machines et des petits objets. Ne pouvant inclure le mobilier dans la classe immobilier, les expertises sont délicates et peuvent poser des problèmes.

Ce fut le cas lorsque nous avons réalisé le dossier d'étude en vue de la candidature du *Train Jaune des Pyrénées Orientales* au Patrimoine Mondial. En effet, seul l'environnement naturel ou modifié par l'homme (voie ferrée, ouvrages d'art, développement économique...) a pu être pris en compte au détriment du matériel roulant (le train lui-même) qui est pourtant au cœur de la valeur exceptionnelle de ce Système Technique. [COTTE & al 2000]

Ne pouvant se contenter d'une classification restreinte, les pratiques courantes des expertises internationales consistent alors à considérer le mobilier comme un élément supplémentaire d'appréciation positive.

2.2.2.2 Les critères d'authenticité et d'intégrité selon l'Unesco

Selon la 18^{ème} conférence de l'UNESCO à NARA (JAPON), la conservation du patrimoine historique trouve sa justification dans les valeurs qui lui sont attribuées [UNESCO 2005]. Nous reviendrons sur ces notions perceptives pour valider nos recherches du chapitre 5.

L'authenticité est tout d'abord celle du bien lui-même. Les sources d'informations supplémentaires intervenant dans la compréhension intrinsèque de l'objet ne sont qu'un élément d'appréciation parmi d'autres. Celles-ci peuvent être de types physiques, écrits, oraux ou figuratifs. Nous reviendrons sur la définition de ces sources dans le chapitre 3 de ce manuscrit.

De plus, tous les biens proposés pour inscription sur la liste du patrimoine mondial doivent répondre aux conditions *d'intégrité*. *L'intégrité* est une appréciation d'ensemble du caractère intact du patrimoine naturel et/ou culturel ainsi que de ses attributs le caractérisant.

Le *patrimoine industriel* est régi par six critères du *patrimoine culturel* définissant la valeur universelle exceptionnelle des biens. Pour être classé, le bien doit répondre à au moins l'un de ces critères :

1. représenter un chef-d'oeuvre du génie créateur humain,
2. témoigner d'un échange considérable d'influences pendant une période donnée ou dans une aire culturelle déterminée, sur le développement de l'architecture ou de la technologie, des arts monumentaux, de la planification des villes ou de la création de paysages,
3. apporter un témoignage unique ou du moins exceptionnel sur une tradition culturelle ou une civilisation vivante ou disparue,
4. offrir un exemple éminent d'un type de construction ou d'ensemble architectural ou technologique ou de paysage illustrant une période ou des périodes significative(s) de l'histoire humaine,
5. être un exemple éminent d'établissement humain traditionnel, de l'utilisation traditionnelle du territoire ou de la mer, qui soit représentatif d'une culture (ou de cultures), ou de l'interaction humaine avec l'environnement, spécialement quand celui-ci est devenu vulnérable sous l'impact d'une mutation irréversible,
6. être directement ou matériellement associé à des événements ou des traditions vivantes, des idées, des croyances ou des oeuvres artistiques et littéraires ayant une signification universelle exceptionnelle.

2.2.2.3 Synthèse

En admettant le postulat des six critères précédents, il est possible d'appliquer cette grille de lecture pour enrichir la définition conceptuelle du *patrimoine*.

Rappelons les trois classes d'équivalence principales définies par le triptyque du patrimoine au début de ce chapitre⁸⁰ : l'*Homme*, l'*Environnement* et l'*Artefact*.

Précisons que MONOD définit l'*Artefact* comme *le produit de l'activité d'un être vivant* [MONOD 1970]. La relation *Sujet/Objet* s'assimile alors à l'*Homme/Artefact* où les idées et concepts du sujet *Homme* se finalisent dans un *objet* : l'*Artefact*. Le *contexte* de la création quant à lui est lié à l'*Environnement*.

De plus, les six critères de l'UNESCO font également apparaître deux autres classes d'équivalence : le triptyque de l'*Homme* et de sa *civilisation* avec les liens établis vers ses *traditions/coutumes* (critère 3 et 6).

La figure 19 schématise les six critères mis en corrélation grâce à leurs classes d'équivalence. Notons que, outre que le triptyque de gauche de l'ontologie permet de définir

⁸⁰ Voir l'ontologie de la partie 2.1.2

le *patrimoine matériel*, l'aile droite de ce papillon des critères de l'UNESCO est la partie visible du *patrimoine immatériel*. En effet, chaque relation entre les classes d'équivalence trouve sa matérialisation dans les sources justifiant le bien patrimonial. Ces sources mises en corrélation génèrent des connaissances qui permettent en elles-mêmes de certifier l'*authenticité* et la *valeur universelle exceptionnelle* du bien.

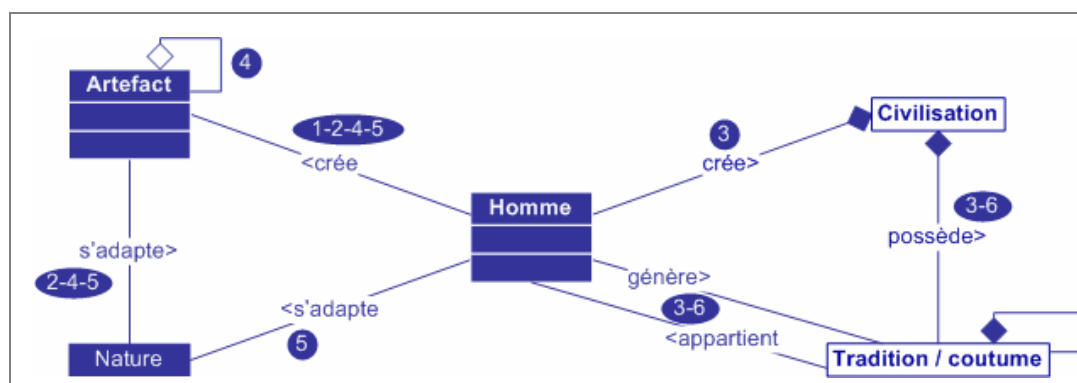


Figure 19 : DIAGRAMME DE CLASSES DE LA DEFINITION DU PATRIMOINE CULTUREL PAR LES CRITERES DE L'UNESCO

Remarquons qu'une notion supplémentaire et nécessaire n'a pu être représentée sur cette modélisation conceptuelle faute d'une sémantique adaptée : c'est la *période temporelle*. De par le caractère intrinsèque des classes modélisées, la temporalité est omniprésente. Nous proposerons au chapitre 5 un moyen de représentation du *Temps* en UML.

2.3 SYNTHÈSE

Pour définir la notion de *patrimoine*, il est obtenu une matrice à trois dimensions positionnant les biens dans un espace multi-dimensionnel comme illustré par la figure 20 :

- *La typologie de bien.* Dans la première partie de ce chapitre, nous avons défini ce qu'il est entendu par *patrimoine*. Comme le précise l'ontologie de la description du domaine considéré⁸¹, si le sujet de l'étude est le *patrimoine à caractère technique, scientifique ou industriel*, il se décline en :
 - un *patrimoine matériel*,
 - un *patrimoine immatériel*.
- *Zone d'influence culturelle et géographique.* Dans la seconde partie de ce chapitre, les objectifs des structures principales aussi bien nationales qu'internationales œuvrant pour le *patrimoine* ont été abordés. On observe que les textes officiels et les prescriptions de préservation du patrimoine trouvent difficilement application. Exemple : définition de la notion de patrimoine technique et industriel ainsi que de la notion de culture technique, problématiques de mise en œuvre de la conservation et de la diffusion de la connaissance, réinjection difficile du savoir-faire auprès des personnes averties ou des industriels spécialisés contemporains...
De plus, de par la culture propre à chaque pays, l'exhaustivité de la description d'une valeur universelle est très difficile ; même si les organisations internationales laissent une marge de manœuvre plus large que les textes de lois français.
- *Phase d'action.* Les instituts, les associations ou les ONG abordés dans ce chapitre se répartissent en deux catégories s'associant à une phase d'action déterminée. Deux types de démarches se proposent :
 1. œuvrer pour la sauvegarde et la conservation,
 2. favoriser la valorisation.

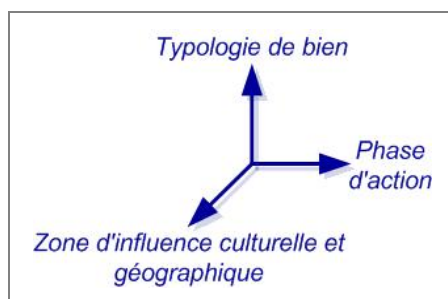


Figure 20 : L'ESPACE MULTI-DIMENSIONNEL DE POSITIONNEMENT DES BIENS PATRIMONIAUX

⁸¹ Voir partie 2.1.5

L'objet au temps présent étant considéré comme devenu patrimonial, nous faisons volontairement abstraction de son histoire dans nos modélisations. Cette première ébauche schématique ahistorique sera enrichie au chapitre 5 pour rendre à l'objet son vécu passé.

Réaliser une ontologie du domaine du *Comment sauvegarder le patrimoine ?* avec comme cible le caractère technique et/ou industriel est extrêmement délicate. Une approche systémique de l'ensemble des classes d'équivalence fait apparaître que beaucoup de relations n'existent pas entre les classes. Voici quelques exemples pour lesquels les dimensions de la matrice définie précédemment coïncident dans la théorie mais pas dans la pratique :

- Lien entre la formation des technologues et/ou les écoles d'ingénieur avec les Musées ?
- Liens entre les associations ou organisations gouvernementales œuvrant pour le transfert de technologies et les sociétés savantes ?
- ...

Dans le cas de notre problématique de recherche, le positionnement de l'étude illustré par le SADT de la synthèse du chapitre 1 faisait apparaître un manque dans les données de contrôle. L'analyse de la définition du *patrimoine* ainsi que les *structures* et les *prescriptions* quant à sa *sauvegarde/conservation/valorisation* peuvent désormais compléter ce schéma. Ce sont les éléments venant valider notre démarche (figure 21).

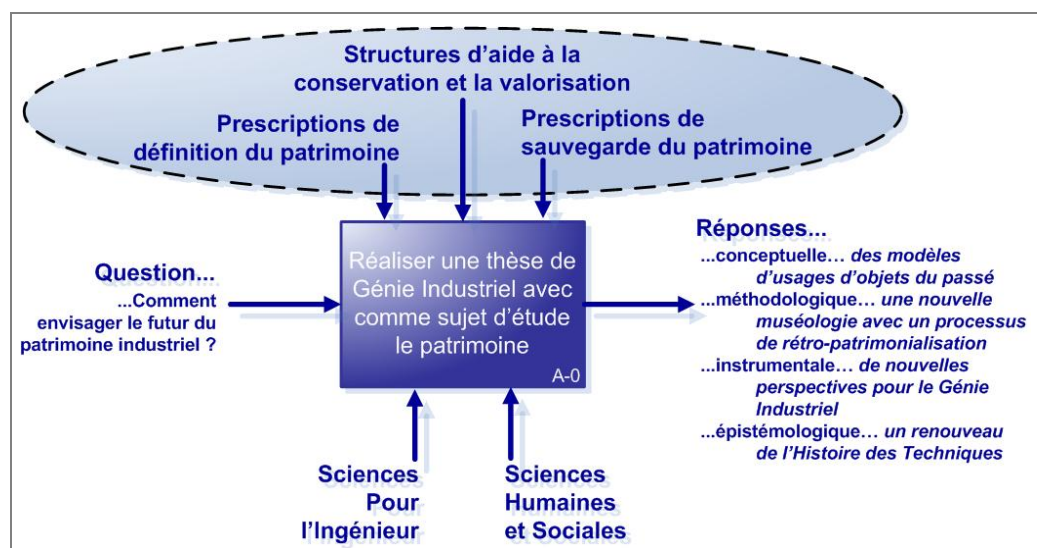


Figure 21 : POSITION ET CONTENU DE MA RECHERCHE SADT VERSION 2

3. L'ARCHEOLOGIE INDUSTRIELLE AVANCEE : ETAT DE L'ART ET PREMIERES HYPOTHESES

Nous avons vu, dans le chapitre précédent, les éléments de *contrôle* intervenant dans le processus SADT de notre projet de recherche : la contextualisation de la problématique a permis de décrire les prescriptions et les structures de sauvegarde du *patrimoine technique et industriel*.

La thématique étant définie, il convient désormais de s'interroger sur les raisons qui ont conduit à l'initialisation de cette recherche. Ce sont en réalité les ressources de notre recherche. Elles passent avant tout par un état de l'art des domaines concernés que nous présentons ici.

3.1 HYPOTHESE DE NIVEAU 1

Toute science est issue d'une suite logique où une donnée va être transformée en une autre donnée par l'intermédiaire d'une action déterminée. Si le patrimoine industriel est le sujet (la donnée de notre étude), quelle action va lui permettre d'être transformé ?

3.1.1 L'ARCHEOLOGIE INDUSTRIELLE

L'archéologie, discipline connue de tous, se propose d'étudier les traces et les faits d'une civilisation passée. S'il lui est adjoint la caractéristique de notre recherche, elle est nommée : *archéologie industrielle*, discipline reconnue mais peu diffusée.

La charte proposée par TICCIH pour une meilleure interprétation de ce qui est dénommé *patrimoine industriel* se propose également d'y adjoindre la définition de cette nouvelle discipline de recherche en pleine émergence [TICCIH 2003] :

L'archéologie industrielle est une méthode interdisciplinaire qui étudie toutes les preuves, matérielles et immatérielles, les documents, les artefacts, la stratigraphie et les structures, les implantations humaines et les paysages naturels et urbains créés pour ou par des processus industriels. Elle se sert des méthodes les mieux appropriées pour accroître la compréhension du passé et du présent industriel.

Des outils et des méthodes sont donc à établir pour décrire les domaines concernés et analyser les liens les interconnectant. Le domaine d'étude étant celui des manufactures, des usines, des industries... il convient de s'interroger sur la possibilité d'une adaptation des outils et méthodes issus du monde industriel au champ disciplinaire de la muséologie⁸². Notons cependant que cette hypothèse est bijective et que les résultats de cette démarche *Génie Industriel vers Patrimoine* pourront être réinjectés dans le monde industriel afin d'enrichir ses modèles et leurs sémantiques. C'est l'objet de l'état de l'art de ce chapitre 3 ainsi que de l'analyse conceptuelle du chapitre 5.

3.1.2 DES DIFFICULTES LIEES A LA SAUVEGARDE DU PATRIMOINE TECHNIQUE ET INDUSTRIEL

Dans ce contexte d'une volonté de compréhension des techniques et de leur histoire, il apparaît que la conservation du patrimoine technique ne va pas sans poser des difficultés. Comme vu dans le chapitre précédent, de nombreuses barrières doivent être surmontées : aussi bien au niveau interne qu'au niveau externe de l'objet industriel ancien.

Des difficultés internes :

- Une complexité intrinsèque des objets dans la société industrielle,
- Une complexité exponentielle du mode de production des objets (apparition de *Systèmes Techniques*),
- Et donc une difficulté humaine quant à la perte de la connaissance et du savoir-faire des utilisateurs et/ou des concepteurs des objets/machines.

Des difficultés externes :

- Une non-sensibilisation des industriels quant à la valeur de leur patrimoine technique et donc un intérêt *a priori* restreint quant à l'éventualité d'une sauvegarde de leur patrimoine,
- Des méthodes de KM peu diffusées,
- Une interprétation difficile des textes de lois et un flou juridique pour la préservation et la sauvegarde du *patrimoine industriel*,
- Mais également une diffusion difficile de la culture technique auprès des citoyens.

De plus, dans le cadre d'une conservation-restauration d'un objet technique ancien, des difficultés financières s'y adjoignent. En effet, le transport d'objets anciens est délicat et coûteux⁸³. De même, la remise en route où l'entretien est difficile suite à la perte partielle ou totale du savoir-faire des *anciens*. Par exemple, si un Musée souhaite refaire fonctionner une machine à vapeur, il faudra retrouver les pièces de rechange et assurer sa mise en

⁸² Le terme de *muséologie* est employé afin de ne pas restreindre le champ d'action de l'*archéologie industrielle*. Il inclut aussi bien la sauvegarde que la conservation ou la muséographie du *patrimoine*.

⁸³ Voir le chapitre 4 sur la phase de démontage de la machine à vapeur PIGUET par l'ECOMUSEE DU CREUSOT-MONTCEAU.

sécurité pour une présentation au public. Cependant, la chaudière fonctionnant à pression élevée, sa remise en conformité avec les règles en vigueur pour les appareils à pression serait problématique. Celle-ci pourrait alors s'avérer dangereuse car susceptible d'exploser si mal entretenue⁸⁴.

Dès lors, les outils et les méthodes utilisées en GI peuvent apporter une réponse à ce nouveau besoin : depuis la capitalisation des connaissances et la numérisation d'objets en passant par la modélisation numérique jusqu'à la virtualisation scénographique, la chaîne numérique est désormais devenue un processus acquis en GI.

Pour capitaliser les connaissances, de nombreuses méthodes existent : MOKA, MKSM, KADS, Retex... Cependant, une fois les connaissances extérieures capitalisées, demeure le problème de la conservation de l'objet physique. Afin de résoudre cette impasse technologique, les outils des sciences pour l'ingénieur peuvent apporter une solution via l'utilisation des outils du virtuel.

Notons d'ores et déjà que quelques failles existent dans cette chaîne numérique. En effet, les entreprises n'ont ni d'intérêt stratégique ni d'utilité pratique à dérouler l'intégralité de la chaîne numérique. Dès lors, il se pose des problèmes quant à l'interopérabilité des systèmes ou la numérisation, par exemple, d'objets multi-composants multi-matières⁸⁵...

De même, s'agissant de machines techniques, il convient d'introduire la notion de dynamique dans la sémantique⁸⁶ de l'objet étudié. Dès lors, la capitalisation des connaissances, entre autre géométrique de la machine fera intervenir une nouvelle dimension : la notion de *temps* ; et donc, par extension, la compréhension des systèmes techniques mis en jeu. *In fine*, un renouvellement des pratiques de valorisation des objets techniques anciens permettra *de le rendre plus attractif* pour les nouvelles générations ; et ce, dans une finalité double⁸⁷ :

- assurer la fiabilité d'une restitution de l'état original via un artefact fonctionnel,
- proposer une interactivité de la restitution avec la volonté de *faire vivre ce patrimoine*.

⁸⁴ Nous verrons également dans le chapitre 4 le rôle de l'APAVE suite aux nombreux accidents survenus quant à l'utilisation des machines à vapeur au 19^{ème} et 20^{ème} siècles.

⁸⁵ On entend par numérisation multi-composants, la capacité d'un système d'acquisition de données à pouvoir distinguer automatiquement les différentes pièces composants un objet : par analogie avec les capacités humaines, nous sommes capables de distinguer et d'interpréter automatiquement la différenciation entre deux objets de même matière et ce, sans contact (voir partie 3.3). Dans l'industrie, la digitalisation ne s'effectue en générale que sur une seule pièce (*a fortiori* lorsque la procédure est automatisée sur une ligne de production [DELPLACE 2004]). En revanche, dans le cas d'un objet ancien en bois composé de plusieurs éléments, comment les distinguer automatiquement ? Surtout lorsque le temps est intervenu et que l'objet est à l'état de ruine. (Voir chapitre 5 l'exemple de la machine à laver le sel de BATZ-SUR-MER)

⁸⁶ Le terme sémantique sera défini au chapitre 5.

⁸⁷ Nous développerons cet aspect valorisation dans la conclusion générale du chapitre 8.

3.1.3 SYNTHÈSE

Notre hypothèse de premier niveau se présente sous la forme d'une chaîne d'actions encapsulant les deux domaines dans lesquels s'inscrit notre projet de recherche : le Génie Industriel et l'Histoire des Techniques (figure 22).

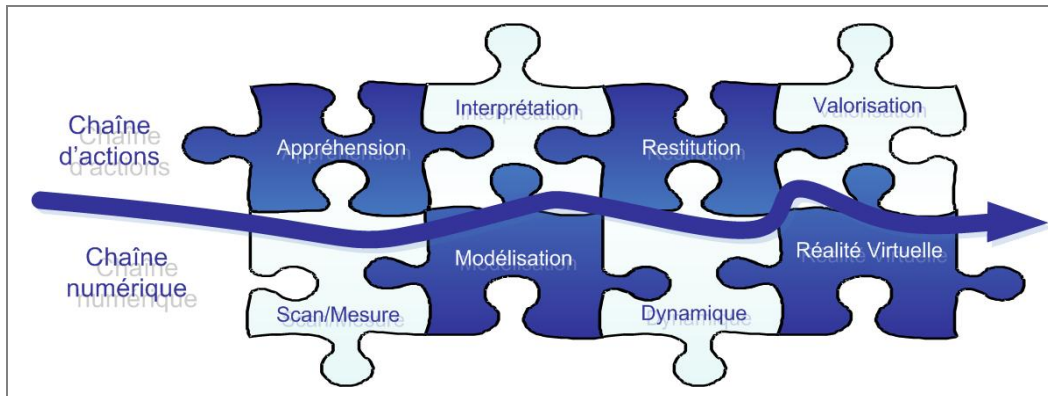


Figure 22 : LE MODELE DES DEUX CHAINES

La chaîne d'actions à mettre en place depuis la capitalisation des connaissances patrimoniales jusqu'à l'exploitation des modèles numériques consisterait en un processus en quatre étapes :

1. Appréhender = le fait de comprendre, de saisir,
2. Interpréter = action d'expliquer, de donner une signification claire,
3. Restituer = le fait de rendre quelque chose,
4. Valoriser = le fait de conférer une valeur plus grande à...

L'annexe 5 intitulée *Approche globale de la question des restitutions numériques de patrimoine technique et industriel* présente la première cartographie des liens entre les SPI et les SHS. Cette systémique⁸⁸ initie une modélisation des interactions entre les domaines concernés par notre thématique selon une organisation temporelle des interventions citées précédemment. Ainsi, nous allons étudier dans ce chapitre la première problématique de recherche qui découle de l'hypothèse de niveau 1. Cet état de l'art se découpe en trois parties :

1. La sauvegarde des connaissances concernées (appréhension),
2. La conservation sous une forme virtuelle (numérisation et modélisation dynamique),
3. La valorisation (muséographie et Réalité Virtuelle).

A l'issue de ce chapitre, nous serons en mesure de valider ou d'invalider l'hypothèse selon laquelle les outils et les méthodes des SPI peuvent apporter une solution à la sauvegarde et la valorisation du patrimoine technique et industriel ancien. Cet état de l'art

⁸⁸ Méthode de modélisation et de pensée qui prend ses origines chez DESCARTES mais qui est réellement formalisée par le MIT dans les années 1940 et vulgarisée à partir de 1970. Voir partie ci-après 3.3 sur la génétique.

deviendra alors une *ressource* pour nos futurs travaux (SADT niveau A0 de la figure 23) [LAROCHE & al 2006a].

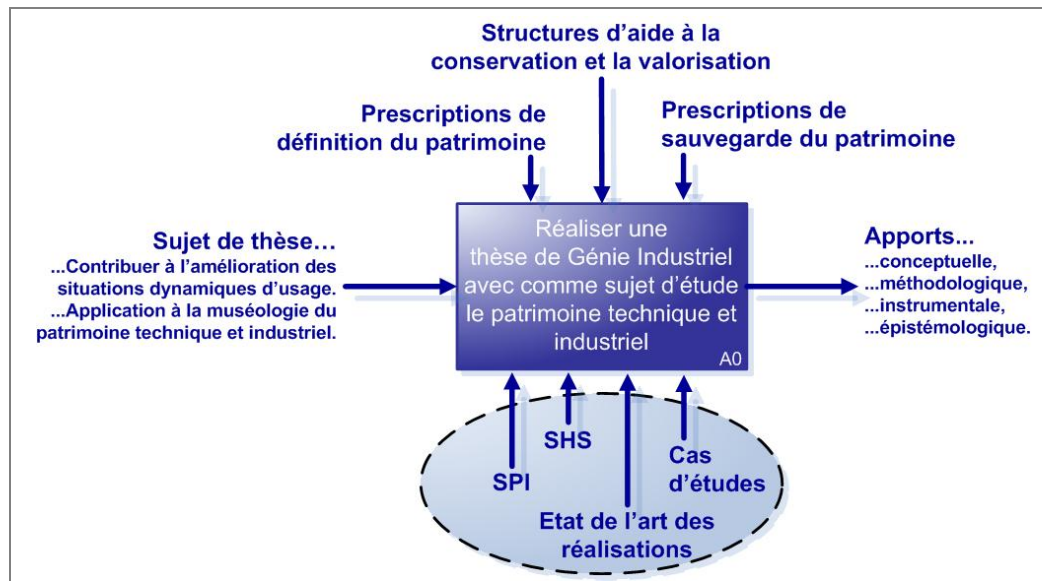


Figure 23 : POSITION ET CONTENU DE MA RECHERCHE SADT VERSION 3

L'art d'être tantôt très prudent, tantôt très audacieux est l'art de réussir
[NAPOLÉON 1^{er}]

3.2 LES CONNAISSANCES ET LES SOURCES

Lors du colloque international ICHIM qui s'est déroulé à PARIS en 2003, alors sous le thème des institutions culturelles et du numérique, Jean-Pierre DALBERA du Ministère de la culture et de la communication met l'accent sur la nécessité d'une capitalisation et d'une valorisation du patrimoine français [DALBERA & al 2003]. Depuis, on a constaté un accroissement du nombre de programmes liés à la sauvegarde du patrimoine français. Parmi les plus connus, nous pouvons citer :

- GALLICA⁸⁹, numérisation et mise en ligne sur internet d'ouvrages de la BIBLIOTHEQUE NATIONALE de FRANCE FRANÇOIS MITTERAND,
- CNUM⁹⁰, numérisation et mise en ligne sur internet d'ouvrages du Conservatoire National des ARTS-ET-METIERS,
- MINERVA⁹¹, partage d'outils et de méthodes pour la capitalisation et la valorisation du patrimoine,
- DIGICULT⁹², état de l'art des technologies du Web sémantique [ROSS & al 2004].
- ...
- Sans omettre l'inventaire général du patrimoine français par le Ministère de la Culture proposant un accès libre sur internet aux bases Architecture et Patrimoine⁹³.

Cependant, ces nombreux programmes de recherche sont centrés sur les documents historiques papiers, les iconographies, les objets d'arts, les monuments et l'architecture. Le patrimoine industriel en tant qu'étude et conservation des processus n'a pas encore été ciblé comme priorité de sauvegarde.

Toutefois, il est à noter qu'un premier projet a été initié par le Ministère de la Culture sous l'intitulé : *Mémoires de l'innovation scientifique et technologique du 20^{ème} siècle* [CUENCA 2000] [CUENCA & al 2005]. Celui-ci est piloté par Yves THOMAS, directeur de la cellule de valorisation de la recherche de l'UNIVERSITE DE NANTES, et par Catherine CUENCA, conservatrice nationale au CNAM. L'originalité du projet a été d'utiliser les NTIC⁹⁴ pour valoriser un patrimoine principalement scientifique ; il fut produit :

- 2 DVDs regroupant les parcours des chercheurs⁹⁵ et les objets créés, fruits de leurs recherches,
- ainsi qu'un site internet⁹⁶ permettant d'accéder à cette connaissance et de la partager tant du point de vue des experts que du point de vue ludique (modules de création de présentations, de création de jeux...).

⁸⁹ <http://gallica.bnf.fr>

⁹⁰ <http://cnum.cnam.fr>

⁹¹ <http://www.minervaeurope.org>

⁹² <http://cordis.europa.eu/ist/digicult>

⁹³ <http://www.culture.gouv.fr/culture/inventai/patrimoine>

⁹⁴ NTIC = Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication

⁹⁵ Il est entendu par parcours, le chemin ayant conduit le chercheur à son invention/sa création.

Mais ces éléments de valorisation ne sont que la partie visible du programme. L'essentiel des études réside dans une base de données de plus de 3000 objets issus de la recherche en PAYS de LOIRE. Récemment, le projet a été étendu au niveau national : MIDI PYRENEES, RHONE-ALPES, AUVERGNE, LANGUEDOC-ROUSSILLON, ALSACE, FRANCHE-COMTE, NORD PAS de CALAIS...

Notons également qu'un projet similaire a débuté à l'UNIVERSITE LOUIS PASTEUR à STRASBOURG (67) sous la direction de Sébastien SOUBIRAN. Après avoir sauvegardé les appareils de médecines devenus objets patrimoniaux, ce programme vise à inventorier puis exposer les objets afin de pouvoir diffuser cette culture scientifique et technique. [SOUBIRAN 2007]

Dans la suite de cet état de l'art, nous cernerons les méthodes de KM et les notions adjacentes à la thématique des connaissances ayant un lien potentiel avec le *patrimoine technique et industriel*. De nombreux travaux aussi bien publics que privés existent. Aussi, nous ne donnerons ici qu'un *aperçu* de la notion de connaissance et des méthodes de KM. Nous utiliserons essentiellement le KM comme une contribution à notre thématique, celui-ci ne constituant pas le cœur de notre recherche.

3.2.1 LE CYCLE DE VIE DES OBJETS ANCIENS ET LE PLC⁹⁷

Un objet patrimonial est dit technique (ou industriel) si celui-ci est placé dans un système socio-technique. Comme le montre l'annexe 6 présentant les différents éléments composant un système socio-technique selon un point de vue épistémologique de l'historien des techniques :

Un objet doit être contextualisé pour en cerner sa valeur et en comprendre son fonctionnement.

Tout comme les entreprises utilisent régulièrement le cycle de vie produit [GOMES 2002], les historiens des techniques replacent également les objets techniques dans leur cycle de vie. L'annexe 7 de ce manuscrit illustre *les différentes phases de l'histoire d'un objet* [COTTE 2004b]. Ce schéma propose d'aller plus loin que le PLC standard en rajoutant une phase pour l'objet rejeté ; étant alors *hors d'usage*, l'objet devient *mémoire, nostalgie ou déchet* mais peut également devenir *collection*, c'est un tremplin vers la patrimonialisation.

⁹⁶ <http://patrimoine.atlantech.fr>

⁹⁷ PLC = Product Life Cycle = Cycle de vie produit

Plus largement, on distingue alors plusieurs phases de vie de l'objet technique avec l'apparition d'une phase ultime⁹⁸ :

1. Conception,
2. Fabrication,
3. Commercialisation,
4. Utilisation,
5. Rejet, Destruction *ou* Patrimonialisation.

L'analyse de la vie du produit permet de mettre en exergue les causes ayant conduit à sa création et les conséquences de son utilisation. Ces *informations* dès lors devenues *connaissances*, sont issues de *données* que l'on appelle :

- Des *documents* dans le cadre du GI,
- Des *archives* ou des *sources* en HT.

Notons que, quelle que soit la discipline concernée, il existe également une autre source de *connaissances immatérielles* : le savoir-faire des métiers. La capitalisation de ces connaissances humaines se réalise dans l'entreprise sous la forme d'*interviews*, autrement appelées *enquêtes anthropologiques* en HT.

3.2.2 LES SOURCES EN HISTOIRE DES TECHNIQUES

Dans son ouvrage sur la *vie des objets*, l'anthropologue Thierry BONNOT [BONNOT 2002] nous confie que :

Un objet ne prend un sens que dans un contexte humain.

Une machine, une installation ne garde sa signification que si elle peut rendre compte d'un fait social total et servir la conservation d'une culture technique sous tous ses aspects, c'est-à-dire la matérialité des objets, mais aussi les éléments immatériels qu'ils contiennent : les gestes, les savoir-faire, les rapports sociaux⁹⁹.

L'étude de l'objet est donc inséparable de celle de son milieu (savoir-faire, contexte politique, social, économique...). Tout comme la photocopie restitue l'objet dans son cadre, tout comme la bande sonore sur laquelle l'informateur a consigné des informations indispensables à la compréhension de l'objet ou tout comme le rapport écrit de l'enquêteur qui a tenté de saisir le contexte de prélèvement de l'objet, ces éléments sont autant de documents qui permettent une recontextualisation de l'objet [ROLLAND-VILLEMOT 2001].

En fonction de la finalité de valorisation souhaitée, il conviendra de capitaliser les connaissances nécessaires pour atteindre l'objectif. Dans le cadre d'objets techniques

⁹⁸ Voir le chapitre 4, partie 4.1 pour le PLC étendu.

⁹⁹ Les rapports sociaux réunissent les thématiques de l'imaginaire, des représentations, des valeurs d'estime et des rôles symboliques.

anciens, une première analyse fait apparaître trois niveaux de connaissances mises en jeu :

- Au niveau macroscopique : l'environnement socio-technique,
- Au niveau méso-scopique : l'environnement équi-niveau objet¹⁰⁰, les objets qui l'entourent,
- Au niveau microscopique : environnement proche / interne objet ; les flux de conception¹⁰¹ en interaction avec un milieu extérieur.

De nombreuses sources sont utilisées en archéologie industrielle pour comprendre un système socio-technique. Les méthodes à utiliser pour la capitalisation et l'organisation des connaissances ne sont pas formalisées mais sont toujours dirigées par la méthodologie de la figure 24 :



Figure 24 : LE PROCESSUS DE LA CAPITALISATION DES CONNAISSANCES EN HISTOIRE

D'une manière générale, la liste standard des documents à capitaliser n'existe pas. Cependant, en 1999, des travaux ont été effectués par des historiens et des chercheurs en patrimoine industriel [MANIGAND-CHAPLAIN 1999]. Après analyse de multiples cas, ils ont produit une classification telle que détaillée dans l'annexe 8. Ils distinguent six grandes familles de sources pour l'étude du patrimoine industriel que nous enrichirons par la suite :

- Les cartographies, les répertoires topographiques et les séries statistiques,
- Les sources fiscales, les archives des administrations centrales et des tribunaux,
- Les actes notariés, les archives de l'enregistrement, les fonds relatifs aux biens nationaux et les archives privées,
- Les archives d'entreprises,
- Les sources iconographiques,
- Les fonds documentaires de certaines institutions publiques ou privées.

¹⁰⁰ L'environnement équi-niveau objet peut inclure les aspects stratégiques, économiques de la machine ou de l'entreprise. Voir le concept des *poupées russes* dans la partie 5.3.2.3.

¹⁰¹ On entend par flux de conception la définition des flux tels qu'ils sont utilisés dans le Bloc Diagramme Fonctionnel de la méthode APTE [AFNOR 1984] [AFNOR 1991].

Les documents techniques et les descriptions technologiques propres aux métiers ne figurent pas dans ces listes. Et pourtant : les cahiers des expositions universelles, les notes du dessinateur, les brevets, les plans... sont des savoir-faire indispensables à la compréhension de l'objet (figures 25 et 26). S'agissant d'un objet à caractère industriel, nous allons définir un corpus standard et normalisé.

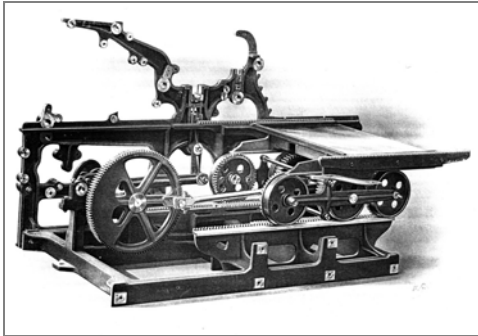


Figure 25 : EXEMPLE DE CONNAISSANCES CONSTRUCTEUR (PRESSE D'IMPRIMERIE VOIRIN, 19^{ÈME} SIECLE)

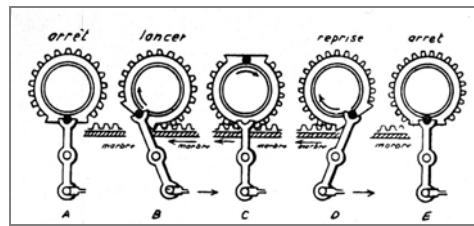
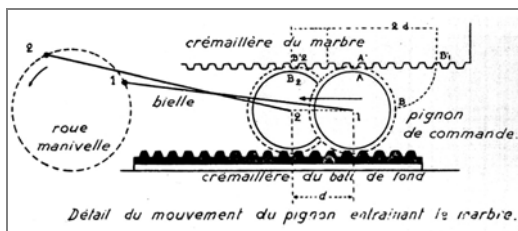


Figure 26 : EXEMPLE DE CONNAISSANCES TECHNIQUES (PRESSE TYPOGRAPHIQUE A ARRET DE CYLINDRE ET A CHEMIN DE FER, 19^{ÈME} SIECLE)

De notre point de vue, lors d'une démarche d'archéologie industrielle, les sources utilisées pour décrire un objet technique peuvent être les suivantes :

- les documents de proximité (connaissances internalistes et érudites) :
 - plans,
 - manuels techniques,
 - notes d'entretien,
 - guides de conduite,
 - correspondances,
 - ...
- les documents généraux et techniques,
 - technique :
 - normes techniques,
 - brevets,
 - articles techniques,
 - cahiers des expositions universelles,
 - catalogues constructeurs,
 - manuels et guides métiers,
 - les techniques de l'ingénieur,

- ...
 - réglementaire (la technique dans son environnement social proche) :
 - normes d'usage,
 - normes antipollution,
 - règlements sécurité,
 - ...
 - contexte de filière¹⁰² (intervention du paramètre *temps*) :
 - les objets de même classe à t donné,
 - évolution des classes d'objet,
- le contexte de proximité (permettant un éclairage sur les choix technologiques) :
 - l'usine,
 - la ville,
 - l'environnement naturel (eaux, rivières , reliefs...),
 - l'environnement structurel (routes, voies ferrées...),
 - ...

Le corpus de connaissances constitué, celui-ci prendra le nom de *dossier d'œuvre patrimonial* au sens archéologique du terme. Il permet de cerner l'objet dans son contexte et d'en comprendre le fonctionnement. Mais celui-ci ne peut pas encore restituer l'objet fonctionnant dans sa situation dynamique d'usage.

3.2.3 CONNAISSANCES ET KNOWLEDGE MANAGEMENT

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, les objets deviennent de plus en plus complexes ; et par conséquent, les *Systèmes Techniques* sont davantage élaborés.

Les scientifiques proposent de nombreuses classifications pour l'étude, sur la longue durée, des processus internes aux entreprises. Le point de vue strict du technologue crée alors un paradigme induisant une dichotomie des approches historiennes. Par exemple, EL MHAMEDI propose trois étapes pour caractériser l'évolution de notre société et tracer sa complexification [EL MHAMEDI & al 2005] :

1. société agraire, il y a 2000 ans,
2. société industrielle, il y a 200 ans,
3. société d'informations, il y a 20 ans.

Mais nuanceons nos propos en précisant que suite à une histoire longue et complexe des technologies de communication, cette prise de conscience a nécessité d'établir des théories de l'information dont SHANNON fut l'un des précurseurs au milieu du 20^{ème} siècle [SHANNON 1948].

¹⁰² Voir partie 3.2.4 sur la *génétique*.

Et, depuis les années 1990, prendre en compte les transformations de l'information pour s'adapter à notre nouvelle typologie de société est progressivement devenue une priorité pour les entreprises : c'est la *capitalisation des connaissances*. Couramment appelée Knowledge Management, KM, en annexe 9 figure l'histoire de cette méthode en FRANCE comme en EUROPE depuis sa naissance jusqu'à nos jours.

De nombreux travaux de recherche ont été initiés par des laboratoires et des entreprises sur la problématique de la pérennité des connaissances, surtout, celles des métiers : les savoir-faire. Ces connaissances implicites sont capitalisées à l'aide d'un processus identifié et sont transcrites en connaissances explicites utilisables par tous et valorisables pour tous. En ASIE, le KM est considéré comme une méthode anthropocentrée où la formulation et le stockage des connaissances est une opération extrêmement délicate : il s'agit du concept du *Ba* [NONAKA & al 1998]. Selon cette approche, les méthodologies du KM ne consistent pas qu'en un système de traitement de l'information mais dans la possibilité de création de connaissances collectives.

De nombreuses autres tentatives essaient d'expliquer le concept de KM mais la plupart des auteurs le définissent surtout en ce qu'il ne doit pas être.

MERCIER-LAURENT¹⁰³ propose alors que [MERCIER-LAURENT 1997] :

Le KM doit être considéré comme un système d'initiatives, de méthodes et d'outils, destinés à créer un flux optimal des connaissances pour le succès de l'entreprise et de ses clients.

3.2.3.1 Du document vers la connaissance

On observe alors une nouvelle chaîne de transformations de la connaissance pour définir notre société d'informations (figure 27) [GARDONI 1999].

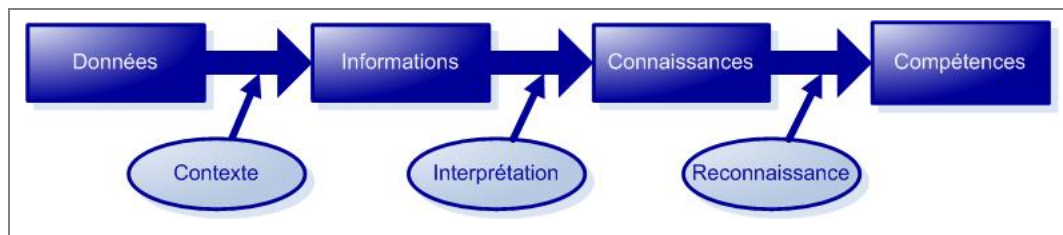


Figure 27 : LA CHAINE DE TRANSFORMATION DE L'INFORMATION

Comme le précise la figure précédente, la connaissance est issue d'un processus de formalisation se basant sur des sources propres à l'entreprise. Selon FONDIN [FONDIN 1998] :

Une information est une connaissance matérialisée selon un code.

¹⁰³ Cabinet d'études et de conseils en Management des connaissances - <http://emlconseil.free.fr>

La norme internationale ISO 15489 sur le Record Management définit cette source de connaissances comme un document [ISO 2001] :

C'est une information portée sur un support quel que soit sa forme ou ses caractéristiques.

Marie-Anne CHABIN¹⁰⁴ précise que les documents peuvent être de deux types :

- Les *records* : documents créés, reçus et préservés à titre de preuve ou d'information par une personne physique ou morale dans l'exercice de ses obligations légales ou la conduite de son activité (norme ISO 15489 [ISO 2001]),
- Les *archives* : ensemble des documents quels que soient leur date, leur forme et leur support matériel, produits ou reçus par toute personne physique ou morale ou par tout service ou organisme public ou privé, dans l'exercice de leur activité (loi du 3 janvier 1979 – code du patrimoine, titre 2 [LEGIFRANCE 2007]).

Qu'elles soient *records* ou *archives*, ces *traces* constituent un ensemble de *documents* qui n'est autre que le *corpus documentaire* tel que décrit dans la partie ci-avant sur les *sources* du patrimoine industriel. Ainsi, au même titre que l'historien considère un corpus de documents comme la base de son travail de transcription, il est également possible de lister les sources utilisées dans l'entreprise [DIENG-KUNTZ & al 2001] :

- Les documents personnels : notes et archives personnelles,
- Les documents liés à un projet : comptes rendus de réunions de projets, documents de spécification du produit à concevoir ou à fabriquer, documents de conception, documents de test, documents contractuels tels que le cahier des charges ou les rapports techniques contractuels,
- Les normes et standards internes à l'entreprise, les règles et les procédures, les textes réglementaires,
- Les *bibles* de référence sur un métier,
- Les fiches d'expertise,
- Les argumentaires de vente et les catalogues de produits,
- La documentation qualité,
- Les documents visuels tels que des photos, des plans, des documents iconographiques,
- Les rapports techniques ainsi que les articles scientifiques ou techniques,
- Les livres, les thèses,
- La documentation en ligne, les manuels de référence, les manuels utilisateurs,
- Les revues de presse utiles pour la veille technologique ou stratégique,
- Les échanges par courrier papier ou électronique aujourd'hui.

¹⁰⁴ Cabinet de conseil et d'expertise pour l'archivage et le Records management - <http://www.archive17.fr>

BALLAY classe ce corpus selon quatre types [BALLAY 1997] :

- Les documents textuels, exprimés en langage naturel, ils constituent la base la plus riche d'informations (notes de travail, mails...),
- Les documents formels, également exprimés en langage naturel, ce sont les bases de données, la CAO....,
- Les éléments physiques comme les maquettes, les prototypes,
- Les réunions et les discussions.

Cependant, la définition du KM va plus loin que la simple activité de compilation de documents réels. TOURTIER propose alors d'introduire la notion de mémoire pour classifier cet ensemble [TOURTIER 1995] :

- La mémoire métier,
- La mémoire société,
- La mémoire individuelle,
- La mémoire de projet.

En effet, il convient de prendre en compte l'intégralité des domaines sur lesquels la connaissance capitalisée a de l'influence. THEVENOT compare cette mémoire à de l'eau circulant entre plusieurs réceptacles. Cette cartographie de l'ensemble des connaissances se métaphore par l'image d'une fontaine telle que représentée dans l'annexe 10 [THEVENOT 1998] :

S'intéresser à la mémoire de l'entreprise, chercher à observer comment se fait, ou ne se fait pas, l'utilisation et la capitalisation des connaissances, c'est nécessairement s'intéresser aux processus de travail donc aux flux d'informations qui circulent dans et hors entreprise ; c'est chercher à comprendre quels canaux de communication fonctionnent bien ou non et pourquoi ; l'idée de les représenter par de l'eau qui s'écoule ou jaillit s'impose d'elle-même !

Dans le chapitre 5 de ce manuscrit, nous utiliserons ces typologies de sources et ces taxonomies de classements pour définir l'ontologie du corpus de connaissances du patrimoine industriel associé à un objet technique ancien.

3.2.3.2 Les méthodes de capitalisation des connaissances en Génie Industriel

Pour capitaliser ces documents, la norme sur le Record Management propose la méthodologie de la figure 28. Elle stipule également qu'à l'issue de ce processus, le *document* est alors considéré comme *archive* [ISO 2001].

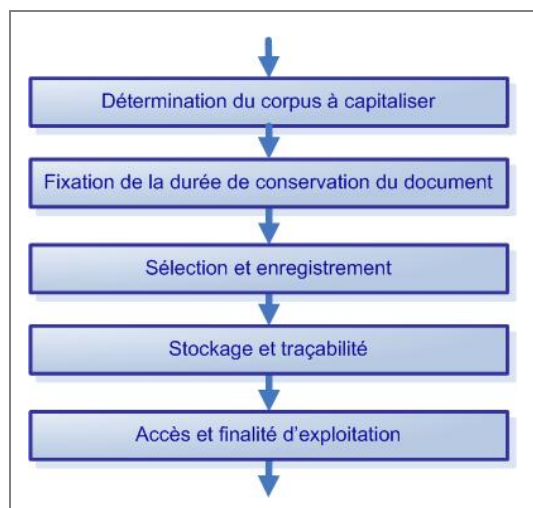


Figure 28 : LE PROCESSUS DE LA CAPITALISATION DES CONNAISSANCES EN GENIE INDUSTRIEL

Mais cette généralité de la méthode ne peut tenir compte de la diversité des sources à prendre en compte comme l'illustre la *typologie des mémoires* ou la *typologie des documents* [KERARON 2007]. En effet, plusieurs finalités peuvent être appliquées aux connaissances capitalisées :

- Constituer une cartographie des compétences de l'entreprise,
- Décrire les activités et tâches menées en explicitant le savoir-faire des experts à travers un bréviaire de connaissances ou une base de connaissances¹⁰⁵,
- Constituer une base des *best practices* afin d'envisager une application KBE¹⁰⁶ [GUILLET 2006].

Par conséquent, le chemin à parcourir est à chaque fois différent. De plus, le mode de transcription¹⁰⁷ tout comme la technique d'acquisition doit être en adéquation avec la finalité choisie. La figure 29 illustre ces paramètres intervenants dans le choix de la méthode de KM déployée dans les entreprises contemporaines.

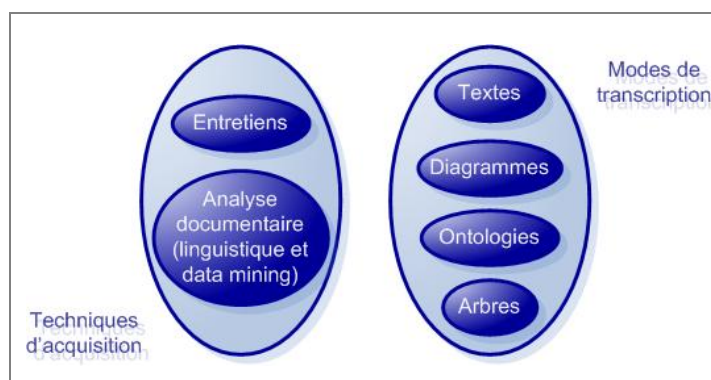


Figure 29 : LES TECHNIQUES D'ACQUISITION ET LES MODES DE TRANSCRIPTION DES CONNAISSANCES

¹⁰⁵ Une base de connaissance est une base de données informatiques.

¹⁰⁶ KBE = Knowledge Based Engineering. Le KBE est une application informatique permettant d'automatiser une tâche en utilisant un savoir-faire métier.

¹⁰⁷ Le mode de transcription est également appelé le niveau de formalisation en KM.

Ainsi, comme le montre le tableau de la figure 30, en fonction de la connaissance ciblée et de la finalité souhaitée, la méthode de capitalisation sera différente. Nous ne détaillerons pas ici toutes ces méthodes mais nous rappellerons les connaissances mises en jeu ainsi que leurs méthodes de captation associées.

Catégorie / Application	Méthode	Description
Connaissance métier	KRM	Décrire les connaissances associées à un processus de l'entreprise donnée
Connaissance produit	KOD	Méthode de développement des systèmes à base de connaissances
Connaissance produit	MKSM	Maîtriser la complexité dans les projets de gestion des connaissances
Retour d'expérience Usine	REX	Retour d'expérience
Connaissance métier	CYGMA, CONSUL	Méthode de recueil, de formalisation et de capitalisation des savoir faire de conception
Retour d'expérience Conception	MEREX	Démarche de capitalisation des solutions issues des meilleures solutions
Connaissance métier - Entreprise	KADS	Méthode de conception d'un système à base de connaissances
Retour d'expérience Conception	APTE-AVT	Traçabilité des choix de conception
Connaissance métier	MOKA	Méthode de formalisation des connaissances en vue de développement d'applications KBE, KBS
Connaissance métier	Ardans Make	Formalisation des connaissances avec génération automatique de bases de données, fichiers d'exploitation

Figure 30 : ETAT DE L'ART DES OUTILS ET METHODES DE KM [PSA 2005]

La définition de la connaissance selon LABROUSSE peut alors être appliquée [LABROUSSE 2004] :

La connaissance est le résultat d'une interaction entre des informations et un système d'interprétation dans un domaine d'applications donné.

Agissant essentiellement sur les connaissances métier implicites¹⁰⁸ [AMIDON 2002] [MICADO 2002] [LAROCHÉ 2004], quelques méthodes proposent de capitaliser les connaissances produit ou processus [POMIAN 1996] et ce, lors de la phase de conception ou de fabrication (exemple de génération automatique de gammes de fabrication [AMMAR-KHODJA 2007]).

Notons également que le projet ARDECO¹⁰⁹ du programme PROSPER du CNRS a abouti à un modèle pour représenter les connaissances afin de les réutiliser dans le processus de CAO ; cette étude fut également pluridisciplinaire entre les métiers du GI et des sociologues [CHAMPIN 2002].

¹⁰⁸ On entend par connaissances métier implicites le savoir-faire.

¹⁰⁹ ARDECO = Aide à la Réutilisation D'Episodes de COncption

3.2.4 LA GENETIQUE OU L'EVOLUTION DES OBJETS

Dans le cas du KM sur les objets, celui-ci intervient sur son processus de création mais il n'est pas encore question d'une capitalisation de l'objet physique ni d'une capitalisation de sa dynamique. Patrick BOUGE, lors des 13^{ème} journées francophones d'Ingénierie des connaissances [BOUGE & al 2002] précise pourtant que :

Dans la conception mécanique, il n'est pas habituel d'explicitier les connaissances fonctionnelles ; il peut cependant être possible, dans certains contextes réduits, de les déduire des connaissances structurelles explicitées.

BOUGE ouvre ainsi la porte à de nouvelles méthodes de KM en pointant l'importance de la fonction et du contexte des objets. De nouvelles méthodes qui pourraient prendre application dans le patrimoine technique et industriel.

En effet, l'approche historique semble être plus aboutie que les méthodes de capitalisation des connaissances des objets techniques utilisées dans l'industrie. En histoire, la démarche consiste à identifier tous les paramètres pouvant expliquer pourquoi la machine se trouvait ici, pourquoi elle se trouve là, pourquoi elle fonctionnait comme ceci puis comme cela... Les tâches principales des études historiques consistent à :

- D'un côté, déterminer par qui ou par quel fait, les lois ou les théories scientifiques ont été découvertes ou inventées,
- D'un autre côté, décrire et expliquer la quantité d'erreurs qui a ralenti la progression de l'homme ou des technologies.

Dans les années 1960-1970, un débat anima le monde des historiens : l'étude des changements techniques confrontant les théories de Maurice DAUMAS et Bertrand GILLE. Après la seconde Guerre Mondiale, on distingue deux courants de pensées : la FRANCE avec DAUMAS et les pays anglo-saxons avec SINGER. Malgré tout, l'étude systématique des évolutions techniques produit de nombreux ouvrages de références. Encore aujourd'hui, selon le journal américain *Technology and Culture*, ces ouvrages sur l'évolution des objets techniques sont les plus consultés par les étudiants américains en histoire des techniques et de l'industrie [COTTE 2007a]. Plus tard, en FRANCE, DEFORGES envisage les études de génétique technique pour rationaliser l'histoire et aider la technique moderne.

Par la suite, Michel COTTE contribue encore au renouvellement de ces idées après les travaux de DEFORGES et SIMONDON [SIMONDON 1989]. Ainsi, dans sa thèse sur l'histoire de la famille SEGUIN, il a appliqué ces concepts sur la systémique des objets et la modélisation des processus [COTTE 1995]. En effet, du point de vue du technologue, comme le suggère THEVENOT, la connaissance inclut le produit ; de plus, PRASAD insiste également sur la nécessité de capitaliser aussi bien la forme du produit que son process [PRASAD 1996] .

Cette approche de l'évolution des objets, déjà présente chez les SPI, ne l'était pas encore dans les SHS ; elle a, dès lors, créé un renouveau dans le domaine de l'histoire des

techniques. Appliquée aux objets techniques anciens, la systémique a introduit une nouvelle méthodologie pour la gestion des objets : la génétique. Celle-ci se rapproche des méthodes de KM développées en GI : c'est le cas de la méthode MKSM se basant sur le REX, le modèle historique ou modèle des lignées et la mémoire de projet [ERMINE & al 1996] [GABILLON & al 2002]. On notera un cas d'étude mené dans le cadre d'un projet avec PSA PEUGEOT CITROËN. Un livre retraçant 100 ans d'histoire de l'électricité et de l'électronique dans le monde automobile [LOUBET & al 2003] avait pour finalité de constituer une nouvelle source de connaissances pour les futurs innovations de PSA. Alliant histoire et ingénierie des connaissances, la méthode de capitalisation MASK¹¹⁰ fut adaptée sur le livre et le projet finalisé sous la forme d'un site web intranet pour aider les métiers électriques de PSA [ERMINE & al 2004].

¹¹⁰ Anciennement MOISE puis MKSM [ERMINE & al 2003].

3.3 LA CONSERVATION PAR LA VIRTUALISATION

3.3.1 L'AVANCEE DES TECHNIQUES NUMERIQUES

Nous avons vu précédemment que les taxonomies de BALLAY et TOURTIER prennent en compte la possibilité de capitaliser l'objet réel, celui-ci étant une source d'information pour la production de connaissances. Dans le cadre d'application de *l'archéologie industrielle*, un autre problème soulevé est celui de la matérialité de l'objet. La conservation physique de l'objet ne pourrait-elle pas être complétée par un autre artefact qui deviendrait une nouvelle possibilité de conservation ? Il s'agit de réfléchir à de nouvelles méthodes et de nouveaux outils de sauvegarde. Si l'on considère l'ensemble des productions humaines, il n'est pas possible de tout conserver. De plus certains matériaux ne se conservent pas à long terme. Ne peut-on pas envisager des enquêtes, des vidéos et ne conserver que des échantillons représentatifs¹¹¹ ? [ROLLAND-VILLEMOT 2001]

Comme Serge RENIMEL le propose [RENIMEL 1985] :

Il faut virtualiser les collections.

Pour répondre à cette problématique de conservation des objets techniques anciens, les outils du GI et par extension les outils du virtuel et de l'infographie peuvent y répondre. Mais comment ?

Olivier LAVOISY démontre dans sa thèse [LAVOISY 2000] que l'évolution du *dessin technique* pour lequel il préfère utiliser le terme de *graphisme technique* a montré des étapes certaines depuis plusieurs années. Ainsi, après de multiples analyses de terrain dont, entre autres, des études au CNAM, LAVOISY vint à la conclusion que le *graphisme technique* est plus qu'une trace écrite :

Le graphisme technique semble jouer un rôle dans la transmission des savoir-faire au sein des ateliers, des lieux de formation et dans les conservatoires.

Depuis la RENAISSANCE, le *graphisme technique* a subi de réelles évolutions vers une rationalité codée permettant de préciser la quantité d'informations croissante à des fins de production industrielle (exemple de la standardisation). Le passage du dessin plan à la perspective est un des sauts technologiques essentiels qui a introduit un langage universel.

¹¹¹ Voir partie 3.4.4.3

La naissance des outils de CAO 3D peut également être considéré comme une nouvelle phase de l'évolution du *graphisme technique* [COTTE & al 2007a]. A l'origine, deux principaux outils informatiques sont développés :

- Chez CITROËN, ce furent les travaux de De CASTELJAU en modélisation des surfaces avec application pour concevoir la carrosserie de la DS,
- Chez RENAULT, ce fut l'intégration des travaux de UNISURF de Pierre BEZIER dans le modeleur EUCLID inventé par le Professeur Jean-Marc Brun au CNRS,
- Chez DASSAULT, ce fut CATIA¹¹² pour la réalisation d'aéronefs.

A l'origine, la CAO est donc née en FRANCE et a été conçue pour être un outil intégré permettant *l'industrialisation, la visualisation et le calcul* [QUERE 2005].

VANDENDRIESSCHE de la société VOLVO IT récapitule les avancées dans le domaine de la CAO depuis sa création [VANDENDRIESSCHE 2005] (figure 31).

... - 1990	2D papier
1970 - 1995	DAO
1980 - ...	CAO
1990 - ...	PDM
2000 - ...	DMU
2005 - ...	VM
2008 - ...	Filière numérique

Figure 31 : L'EVOLUTION DU GRAPHISME TECHNIQUE

Le dessin sur papier a été transféré sur ordinateur avec le DAO¹¹³. La CAO¹¹⁴ utilise un PDM¹¹⁵ pour gérer l'ensemble des informations et des données rattachées à la DMU¹¹⁶. La conception s'effectuant virtuellement, il reste le problème de la fabrication qui se doit également d'être virtualisée. Le VM¹¹⁷ est un champ de recherche actuellement en plein essor grâce au VP¹¹⁸. Un jour raisonnerons-nous peut-être en cinq dimensions comme le proposent Patrick SERRAFERO et Samuel GOMES avec le modèle de conception 5D résumé dans la figure 32 [SERRAFERO & al 2007].

	CAO en 2D	CAO en 3D	CAO en 4D	CAO en 5D
Dénomination	CAO graphique	CAO géométrique	CAO cognitive	CAO apprenante
Automatisation	Génération 1D des hachures	Génération 2D des plans	Génération 3D des volumes	Génération 4D des compétences
Années de déploiement	1960-1990	1975-2005	1990-2020	2005-2035

Figure 32 : LES GENERATIONS SUCCESSIVES DES OUTILS DE CAO : DE LA 2D A LA 5D

¹¹² CATIA = Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée

¹¹³ DAO = Dessin Assisté par Ordinateur

¹¹⁴ CAO = Conception Assistée par Ordinateur

¹¹⁵ PDM = Product Data Management

¹¹⁶ DMU = Digital Mock-Up, la maquette numérique

¹¹⁷ VM = Virtual Manufacturing

¹¹⁸ VP = Virtual Prototyping

Désormais, la maquette numérique est utilisée pour remplacer la maquette physique. Elle permet d'effectuer des simulations fonctionnelles, d'essayer de nouveaux design... le monde virtuel prend une position centrale dans le monde des concepteurs. De plus, dans le domaine de la Réalité Virtuelle pour la conception mécanique, les outils se sont développés très rapidement et les simulations sont quasi-réalistes [MIKCHEVITCH & al 2005].

Ainsi, dans le cadre de sa thèse, Veronica CAMACHO étudie l'évolution des technologies numériques pour l'animation de synthèse [CAMACHO 2004]. Elle conte cette aventure dans le cadre d'une conférence en deux volets regroupés sous le nom d'*Odysée de la 3D* dans laquelle elle expose l'évolution des productions cinématographiques à base d'imageries de synthèse ainsi que les progrès des technologies de visualisation de 1971 à nos jours.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons détailler les différentes phases de la chaîne numérique (figure 33) depuis la numérisation d'un objet jusqu'à sa mise en valeur dans une dynamique virtuelle. L'étape intitulée *Capitalisation des connaissances*, que nous avons développée dans la partie 3.2 de ce chapitre, consiste dans la phase de KM utilisant la typologie des sources historiques et patrimoniales.

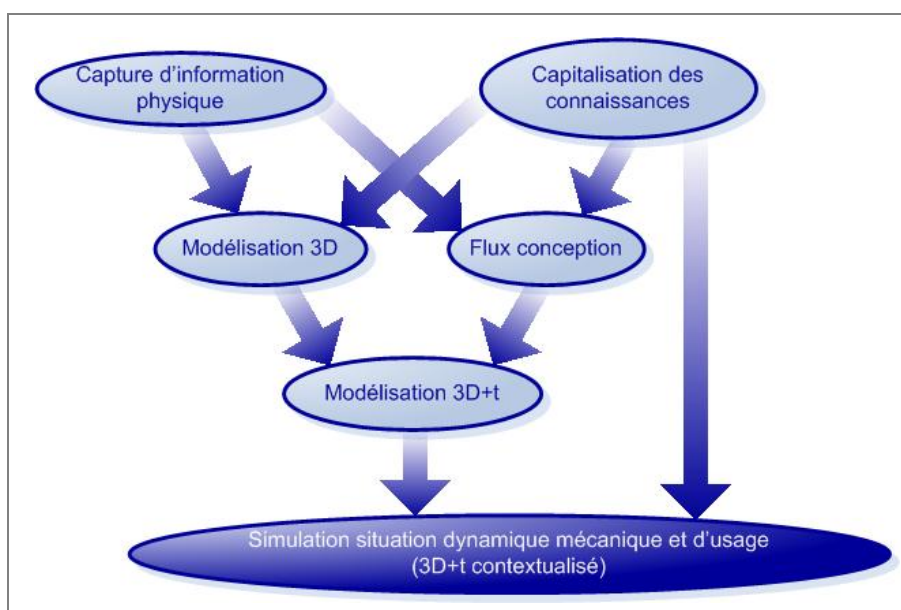


Figure 33 : HYPOTHESE DE LA CHAINE NUMERIQUE DE PATRIMONIALISATION EN VIRTUEL

Dans cet état de l'art de la phase de *virtualisation*, nous présenterons de façon non-exhaustive les outils et méthodes utilisés en GI pour dérouler cette chaîne numérique :

1. numérisation avec/sans contact,
2. modélisation,
3. simulation et validation CFD¹¹⁹,
4. outils de Réalité Virtuelle.

¹¹⁹ CFD = Computational Fluid Dynamics = Simulation dynamique mécanique et fluide

Cependant, les maillons de la chaîne numérique n'ayant pas tous été raccordés, nous mettrons alors en exergue les points délicats pour lesquels aucune réponse n'existe à ce jour.

3.3.2 CAPTURE D'INFORMATIONS PHYSIQUES

Avant d'effectuer un état de l'art des outils graphiques permettant la *pérennité* d'un objet sous une forme virtuelle, nous allons dans un premier temps réaliser un état de l'art des technologies et des possibilités offertes quant à la mesure et la numérisation d'objets.

La problématique de capture de la description géométrique 3D d'*objets techniques patrimoniaux* étant identifiée, nous présentons ici les différents outils pouvant répondre à ce besoin. Cependant, quelques inconnues demeurent :

- type d'objet, dimensions et complexité fonctionnelle,
- finalité du modèle ayant, entre autres, une incidence sur le choix du logiciel de modélisation...

Nous exposerons l'éventail global des outils existants sur le marché [MICAD 2005] [BERNARD 2003]. Dans le chapitre 5 de ce manuscrit, l'ontologie décrivant la structure d'un *objet technique ancien* nous amènera à construire un arbre décisionnel pour choisir les technologies à utiliser. Celui-ci permettra d'aller plus loin que les méthodologies standards en prenant en compte le contexte global de l'objet étudié. L'étude du patrimoine technique par les outils du GI élargit ainsi le champ d'investigation usuellement restreint aux caractéristiques intrinsèques de l'objet dans son contexte de production [BERNARD & al 2002a].

3.3.2.1 Les systèmes avec contact physique

On ne saurait commencer cette partie de numérisation d'objets sans énoncer les outils de mesure de base :

- décimètre, précision de l'ordre du demi-millimètre, adaptable à toute taille d'objets.
- pied à coulisse, précision de quelques dizaines de micron, pour des objets pouvant faire quelques dizaines de centimètres de long dans le sens de la prise de mesure.
- palmer, précision de l'ordre de quelques microns, pour des objets pouvant faire quelques centimètres de long dans le sens de la prise de mesure.

Dans la catégorie des outils de mesure automatique, il existe de multiples systèmes de palpation mécanique qui sont en général couplés à un bras articulé préprogrammé sur ordinateur. Les MMT¹²⁰ nécessitent de déplacer la pièce dans le laboratoire et de la poser sur la table de mesure. La société HEXAGON METROLOGY¹²¹ propose des bras autonomes de

¹²⁰ MMT = Machines à Mesurer Tridimensionnelles

¹²¹ <http://www.hexagonmetrology.net>

différentes tailles : dimensions des mesures possibles dans un volume de 0.5 m³ à 115 m³. Mais également FARO, ROMER...

Les CMM¹²² portables de type KRYPTON 400, 500, 600 et 610 proposés par la société METRIS¹²³ peuvent mesurer des volumes jusqu'à 17 m³ avec une précision maximum de 40 microns. Ils présentent l'avantage de pouvoir être déplacés sur site.

Notons que cette dernière catégorie de mode d'acquisition avec palpation est souvent considérée comme de la technologie active car la technologie interagit avec la pièce. Cependant, ces outils étant difficiles à mettre en œuvre dans le cadre d'objets anciens parfois détériorés, nous ne retiendrons pas ces solutions.

3.3.2.2 Les systèmes passifs sans contact

L'acquisition est dite passive lorsque le capteur n'a aucune influence ni sur la pièce à numériser ni sur son environnement. Ces solutions sont généralement orientées image et proposent des captures de type stéréométrie ou photogrammétrie.

Le leader actuel sur le marché de la stéréométrie est la société KONICA MINOLTA¹²⁴ qui propose deux types de caméras pour acquérir avec une précision de l'ordre de 50 microns en 2.5 secondes. Pour obtenir une image 3D complète, l'opérateur devra positionner l'objet à numériser selon différents points de vue.

Notons que la société REALVIZ¹²⁵ commercialise le logiciel IMAGEMODELER pour reconstruire rapidement un modèle 3D à partir de photos numériques. Grâce à la mise en corrélation des points communs entre les photos, les distances sont calculées automatiquement. Puis vient la modélisation filaire et surfacique¹²⁶. L'avantage de cette technologie est la possibilité d'application des textures à partir des photographies. Son inconvénient majeur réside dans la précision du résultat qui est fonction de la précision des photographies.

Quelle que soit la solution technologique choisie, le processus d'acquisition est toujours le même :

1. Mise en corrélation de points communs entre les photographies,
2. Calcul automatique des distances et modélisation en filaire,
3. Application des textures à partir des photographies,
4. Positionnement automatique de caméras et/ou d'appareils photographiques virtuels pour réaliser des images de synthèse.

¹²² CMM = Coordinate Measuring Machine

¹²³ <http://www.metris.com>

¹²⁴ <http://www.konicaminolta.com>

¹²⁵ <http://www.realviz.com>

¹²⁶ Les différences entre les modes filaires, surfaciques et volumiques sont expliquées dans la partie 3.3.4.1 sur les théories de la modélisation 3D.

3.3.2.3 Les systèmes actifs sans contact

Un système de mesure est dit actif si celui-ci doit générer un flux de particules pour mesurer (ondes lumineuses, sonores...), c'est entre autre le cas de la technologie laser.

En fonction de la taille de l'objet à numériser, il existe de multiples solutions actives. On distingue cinq catégories :

- Les capteurs piézo-électriques,
- Les capteurs basés sur le calcul du temps de vol,
- Les capteurs de l'imagerie médicale,
- Les techniques optiques sans laser,
- Les techniques optiques avec laser.

Les *capteurs piézo-électriques* sont très précis mais ne permettent pas de numériser de grandes surfaces : c'est le cas du capteur ROLAND pour lequel le volume maximum de la pièce doit être compris dans une boîte de 30 cm x 20 cm x 6 cm. Malgré la petite taille de l'objet à numériser, le capteur présente un avantage certain par rapport à toutes les autres technologies actives : il est possible de numériser des pièces en verre ou tout autre matériau réfléchissant.

Pour les *capteurs basés sur le calcul du temps de vol*, il s'agit du principe du radar. Une onde est émise ; connaissant sa vitesse de propagation, la mesure du temps nécessaire à cette onde pour faire l'aller-retour entre le capteur et la surface de la pièce permettra de calculer la distance les séparant. Notons que certains outils de télémétrie laser ont été développés pour fonctionner sous l'eau.

Dans le cadre de *l'imagerie médicale*, on distingue trois principaux outils :

- L'échographie utilisant les ultra-sons pour créer des vues en coupes,
- La tomographie par rayons X (plus communément appelé *scanner* dans le milieu hospitalier),
- La RMN¹²⁷ permettant de créer des vues en coupe très détaillées à l'aide d'un champ magnétique.

Récemment, afin d'établir une évolution entre les différentes formes du crâne humain, des chercheurs de MONTPELLIER ont mis au point un traitement automatique utilisant les images scanographiques. L'algorithme compare automatiquement le crâne de l'Homme moderne et le crâne de l'Homme préhistorique. En se basant sur les points homologues, il distingue automatiquement les différences morphométriques [SUBSOL 2007]. La microtomographie aux rayons X a permis d'effectuer une étude approfondie non destructive et en 3D de l'homme de TAUTAVEL, daté d'environ 450 000 ans [NOEL & al 2005].

¹²⁷ RMN = Résonance Magnétique Nucléaire

Mais les technologies issues du milieu médical trouvent également des applications dans d'autres domaines. C'est ainsi qu'une équipe de chercheurs des Universités de CARDIFF, d'ATHENES et de THESSALONIQUE a utilisé un scanner à rayons X pour obtenir une image 3D précise à 50 microns d'une machine grecque datant de 80 ans avant JC : le mécanisme d'ANTICYTHERE. Un objet de petite dimension enchâssé dans un cadre en bois a été retrouvé par des pêcheurs dans les années 1900 sur l'île grecque d'ANTICYTHERE. Vers 1950, une première tentative de désoxydation par électrolyse est menée et fait apparaître un appareil composé de cadrans, d'axes, de tambours et d'aiguilles. Les archéologues y voient alors un astrolabe permettant de représenter la course des étoiles sur la voûte céleste. Mais il faudra attendre l'automne 2005 pour percer son mystère : le scanner à rayons X a fait ressortir les inscriptions de plus de 2000 caractères grecs ainsi que les mécanismes internes. [FREETH & al 2006]

De même, dans le cadre d'un projet d'archéologie sur la civilisation égyptienne, les architectes HOUDIN père et fils ont émis une hypothèse sur la façon dont la pyramide de KHEOPS a été construite. Seul inconvénient pour valider leur théorie : il faut pouvoir voir à l'intérieur de la pyramide. C'est ainsi que, sans la détruire, ils ont utilisés les travaux de la société ELF se basant sur des mesures de micro-gravimétrie et dont la société EDF¹²⁸ en a développé la technologie. La mesure aux rayons X leur a ainsi permis de remodeliser la pyramide tout d'abord sous AUTOCAD puis sous CATIA V5 [HOUDIN 2005]. Ils ont ainsi pu valider leur hypothèse. Cette expérience a été suivie par de nombreuses communications journalistiques et a donné lieu à une exposition à LA GEODE au printemps 2007 [HOUDIN 2007].

Dans la catégorie des *technologies optiques sans laser*, on distingue de nombreuses solutions dites de *bureau*. Celles-ci se basent sur deux principes similaires :

- Les capteurs à lumière structurée,
- Les capteurs à effet de moirée.

Ces deux techniques s'appuient sur la projection d'une grille régulière de lumière, sous forme d'un réseau de franges sur lequel on calcule les coordonnées par triangulation.

C'est le cas du scanner ATOS utilisant deux caméras et généralement couplé à une MMT afin d'automatiser la numérisation.

Enfin, la technologie la plus répandue est celle du *laser*. Très largement utilisée par les architectes, ils nomment couramment ces outils des *théodolites laser*.

Cette technologie permet de relever 1 point tous les millimètres à une distance de 100 mètres. Le laser balaie la surface à digitaliser. Tout matériau réfléchissant la lumière, renverra le faisceau laser vers son point d'émission d'origine. Il est alors possible d'en déduire le temps de vol et donc de calculer la distance entre le scanner et le point numérisé. Par ailleurs, connaissant la position angulaire de l'envoi du laser, la position du point dans

¹²⁸ EDF = Electricité De France - <http://www.edf.fr>

l'espace en trois dimensions est connue. Un ordinateur enregistre tous ces points et un *nuage de points* est obtenu.

Leader sur le marché architectural, les lasers de la société LEICA¹²⁹ peuvent numériser un objet sur presque 360° et ce, à quelques centaines de mètres de celui-ci avec une précision finale de 1 à 2 mm (figure 34)

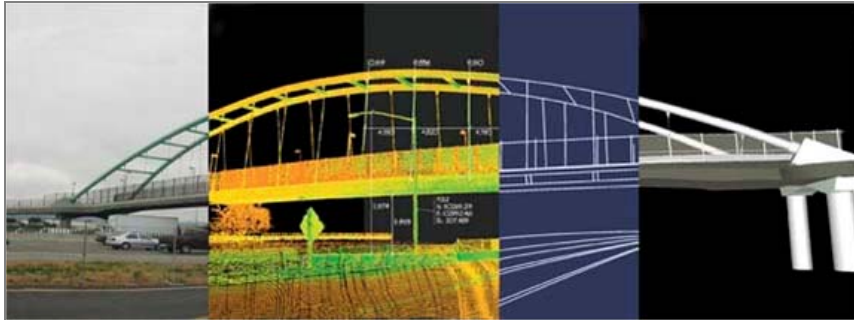


Figure 34 : EXEMPLE DE NUMERISATION D'UN PONT A L'AIDE D'UN THEODOLITE LASER LEICA

3.3.2.4 Synthèse et tableau récapitulatif

Le choix de la technologie à utiliser dépendra de plusieurs variables principales :

- La taille de l'objet à numériser (... < 1 m³ < ... < 10 m³ < ... < 60 m³ < ...),
- La précision demandée,
- Le temps d'acquisition disponible,
- La possibilité de déplacer ou non l'objet.

Par conséquent, dans le cadre d'une numérisation d'objets techniques anciens, il sera peut être opportun de combiner plusieurs technologies (systèmes actifs/passifs avec/sans contact) afin d'optimiser la chaîne d'acquisition. Le tableau de la figure 35 compare ces différentes technologies en s'appuyant sur les principaux outils utilisés en GI.

Type d'outil / Société		Type de technologie					
		Avec contact		Sans contact			
		Outils de mesure	Palpage	Systèmes Passifs		Systèmes Actifs	
Dimensions	Photo	Caméras Minolta	Laser Métris	Laser Roland	Scanner Leica		
... < 1 m ³	X	X	X	X	X	X	
1 m ³ <...< 10 m ³	X	X	X	X		X	
10 m ³ <...< 60 m ³		X	X	X		X	
60 m ³ < ...			X	X		X	
Précision maxi	1 micron	1 micron	Précision appareil photo	50 microns	8 microns	0.1 mm	1 mm (à 100 mètres de l'objet)
Vitesse d'acquisition	manuel	lente	Temps d'une photo	2.5 sec / point de vue	20000 points / sec.		1 à 2 sec.
Nombre de manipulations nécessaires pour obtenir un modèle 3D	Multiples	1 (automatique)	Multiples	Multiples	Multiples	1 (automatique)	Multiples

Figure 35 : TABLEAU RECAPITULATIF DES TECHNOLOGIES DE NUMERISATION

¹²⁹ <http://www.leica-geosystems.com>

La ligne *nombre de manipulations* correspond au nombre de prises de vue nécessaires pour obtenir une réelle définition 3D. En effet, un seul point de vue ne donnera qu'une vision stéréoscopique¹³⁰. Il est donc nécessaire de coupler plusieurs points de vue et/ou plusieurs scanners pour obtenir l'objet dans ses trois dimensions. En 2001, BOEING¹³¹ a présenté un système de numérisation multi-scanners pour obtenir directement la pièce en trois dimensions. Son but était entre autre de pouvoir effectuer un contrôle dimensionnel des ailes d'avions [RICHEY & al 2001].

Remarquons que les systèmes de numérisation utilisant les techniques d'interférométrie ou des systèmes optiques ne sont pas mentionnés dans le tableau. En effet, ils sont actuellement à l'état de recherche. C'est le cas de l'interféromètre à fibre optique de type LISE en cours de développement par le Département optique de FOGALE NANOTECH¹³². La tête de mesure travaille avec une longueur d'onde de 1.3 microns et peut se déplacer à plusieurs dizaines de mètres du boîtier optoélectrique. Plusieurs modèles sont prévus avec des plages de mesure différentes (4, 40, 200 ou 400 mm) et deux gammes de précision (+/- 1 µm et +/- 0.1 µm) seront disponibles. Cette technologie permet de mesurer la distance d'un point, mais aussi l'épaisseur des matériaux translucides ou encore le niveau de liquides.

De plus, il y a peu, une nouvelle génération de lasers plus sophistiqués a été créée ; elle a été brevetée par la société canadienne CREAFORM 3D¹³³. Il s'agit d'un scanner laser à main d'une précision de 3/10^{ème} mm. Il ne nécessite pas d'alimentation externe car il est branché directement sur l'ordinateur en IEEE1394¹³⁴. La technologie utilisée est celle de la vectorisation des points numérisés. Il est possible de numériser plusieurs fois le même point pour affiner la direction des vecteurs. Le scanner s'auto-positionne dans l'espace en trois dimensions grâce à des mires placées sur des artefacts autres que l'objet à scanner. Cette technique est donc sans contact avec l'objet et non destructive car elle émet un faisceau laser dans la zone de lumière visible par l'humain : 660 nm. Nous utiliserons le HANDYSCAN (figure 36) dans la suite de nos travaux sur des objets anciens présentant une criticité élevée quant à leur autodestruction.

¹³⁰ On entend par stéréoscopie une image qui donne l'impression d'être en 3D mais seul son relief est perceptible. En effet, si le point de vue change, des informations manqueront : il s'agit simplement d'une photographie 3D.

¹³¹ <http://www.boeing.com>

¹³² <http://www.fogale.com>

¹³³ <http://www.creaform3d.com>

¹³⁴ Le IEEE1394 est une connectique informatique utilisée principalement en vidéo permettant un taux de transfert très élevé (environ 400 Mo/sec).



Figure 36 : LE HANDYSCAN DE LA SOCIÉTÉ CREAFORM3D

3.3.3 TRAITEMENT ET RECONSTRUCTION DE MODELES 3D A PARTIR DE NUAGES DE POINTS NUMERISES

Comme Sébastien REMY le propose, la numérisation 3D est utilisée dans l'industrie pour trois types d'applications [REMY 2004] :

- La reconstruction de surfaces pour la rétro-conception,
- Le contrôle géométrique de formes,
- La copie de pièces.

Dans le cadre de l'utilisation de ces technologies pour *immortaliser* le patrimoine technique ancien, nous ne détaillerons pas ici le contrôle géométrique de formes car celui-ci n'a pas d'application directe pour nous. De plus, la reconstruction de surface étant le préliminaire requis pour la copie de pièces, nous confondrons ces deux catégories.

Après numérisation 3D, il est obtenu un nuage de points. Celui-ci s'apparente à un ciel étoilé où il est parfois très difficile de se repérer. De plus, le nuage de points n'est pas parfait et des trous existent.

3.3.3.1 Rebouchage du nuage de points

Un nuage de points n'est jamais parfait et il existe souvent des lieux où il manque des points rendant le maillage difficile. Une extrapolation est alors nécessaire. De nombreux travaux de recherche sont en cours mais on remarquera un travail particulièrement prometteur quant à la combinaison d'informations 3D et de photographies 2D en vue d'un rebouchage des trous d'un nuage de points [PANCHETTI & al 2003] [PANCHETTI & al 2007].

3.3.3.2 Reconnaissance automatique de formes

Pour la reconnaissance automatique des formes, de nombreuses recherches sont en cours. Les logiciels de CAO comme CATIA V5 propose des modules de reconnaissance

automatique de primitives¹³⁵ fonctionnant plus ou moins bien car dépendant de la qualité du nuage de points. Dans le domaine architectural, quelques solutions logicielles existent pour les numérisations de type tuyauterie. Cependant, comme le fait remarquer FISCHER, il convient de s'interroger non pas sur un aspect précis du processus de numérisation-reconstruction-exploitation mais sur la globalité de la méthode afin de la rendre robuste et interopérable [FISCHER 2007].

Dans le cadre de la distinction de pièces et de la compréhension de la cinématique, un laboratoire d'informatique et d'automatique allemand travaille sur l'extraction automatique de plans en 2D de livres anciens de mécaniques ou de mathématiques. Il s'en suit une reconnaissance automatique de la cinématique associée [CORVES & al 2006] [DÖRING & al 2006] [BRIX & al 2007]. Leur méthodologie est la suivante :

1. numérisation 2D d'un dessin technique dans le livre,
2. traitement graphique de l'image,
3. reconnaissance automatique des formes,
4. création d'un modèle cinématique 2D vectoriel et fonctionnel.

3.3.3.3 Distinction de pièces/couleurs

Les systèmes laser ne permettent pas de récupérer la couleur de l'objet numérisé ; en revanche, la technologie étant basée sur l'envoi d'un faisceau lumineux à une longueur d'onde déterminée, en fonction de la matière de l'objet numérisé, l'onde reviendra avec plus ou moins de retard, il sera ainsi possible d'en distinguer une différence de pièces ou une différence de couleur de pièces mais sans en restituer la couleur exacte.

Par ailleurs, les scanners de type caméra peuvent eux, récupérer les informations de colorimétrie ; via le logiciel COLORVIZ par exemple. De plus, une nouvelle innovation a récemment été implémentée dans les *théodolites laser*. L'ajout d'un appareil photographique à haute précision sur le laser permet de repositionner la photographie sur le nuage de points et ainsi obtenir une restitution des couleurs réelles. C'est le cas des scanners LEICA.

3.3.3.4 Outils logiciels de traitement et de reconstruction de nuages de points

Suite aux problèmes de nuages de points non fermés, de non distinction des pièces, de nombreux outils informatiques viennent alors aider le technicien-projeteur dans sa démarche de reconstruction :

- Le logiciel le plus répandu pour la reconstruction de surface à partir de nuages de points numérisés est RAPIDFORM d'INUS TECHNOLOGY¹³⁶. Il s'interface avec la quasi-totalité des systèmes de numérisation ; plusieurs modules sont disponibles¹³⁷ : modules Scan,

¹³⁵ On entend par formes primitives les volumes de type cube, cylindre, sphère...

¹³⁶ <http://www.rapidform.com>

¹³⁷ Nous ne les expliciterons pas ici étant donné que leur appellation est explicite.

Polygon, Color, Curve, Surface, Feature, Inspection, Exchange. La reconnaissance automatique des formes primitives est également possible.

- POLYWORKS de la société INNOVMETRIC¹³⁸ est le logiciel leader sur le marché, il permet après *scanning* d'inspecter et de reconstruire l'objet ; il prend en compte l'intégralité des scanners existants sur le marché et suit le workflow suivant : scanning → recalage par rapport aux différentes acquisitions (laser miroir, capteur à main, projection de frange...) → maillage par polygonalisation → surfacage par NURBS¹³⁹ → simulation / utilisation du modèle 3D.
- La société ROLAND propose le logiciel PIXFORM pour la conversion automatique en polygones ou NURBS.
- Les scanners LEICA sont couplés au logiciel CYCLONE. Il reconnaît les formes primitives automatiquement ; l'export du nuage de points peut se faire en ASCII et LEICA propose des plug-ins pour exporter les données vers SOLIDWORKS et MICROSTATION.
- Les laser METRIS utilisent le logiciel PARAFORM pour assurer la chaîne numérique depuis la numérisation au fichier CAO : import des données → poly-maillage → courbes → surfacique/volumique.
- La société TECHNODIGIT commercialise le logiciel 3D RESHAPER pour la reconstruction de surfaces. Celui-ci réalise un maillage de points et non une conversion en courbes de BEZIER permettant ainsi un gain de temps considérable.

3.3.3.5 Synthèse

Ainsi, pour chaque phase de la reconstruction, de multiples solutions existent et donc la méthodologie idéale n'existe pas car elle dépend de la finalité choisie. De nombreuses possibilités dans les technologies logicielles et matérielles sont à notre disposition :

- choix du scanner en fonction de la taille et de la complexité fonctionnelle de la machine,
- choix du logiciel de modélisation,
- choix des modules de simulation,
- ...

Il conviendra également de se poser la question du temps nécessaire pour dérouler la globalité de la chaîne numérique et du coût global du processus si appliqué au cas du *patrimoine technique et industriel*.

In fine coupler ce processus avec les méthodologies propres au GI pourrait peut être permettre de l'optimiser : est-il possible d'adapter ce nouveau processus en utilisant les méthodes propres à la conception de produits telles que l'analyse fonctionnelle externe et

¹³⁸ <http://www.innovmetric.com>

¹³⁹ Nurbs = Non-Uniform Rational Bezier Splines

interne, BDF¹⁴⁰... [GIASSI 2004] ? Plusieurs travaux de recherche sont menés en ce sens : ce fut le cas de la thèse de Carmen MARTIN dans le cadre du projet PIRAMID pour l'interopérativité des méthodes dans la conception intégrée [MARTIN 1999].

Dans le cas d'objets industriels anciens, de nombreuses questions inhérentes au GI se posent en plus : le passage du relevé scanner au modèle numérique pourrait-il se faire automatiquement [CRISTINA & al 2004] ? Malgré tout, si ce travail doit s'effectuer manuellement, pour quelle solution doit-on opter :

- Une reconception de surfaces ?
- Un nettoyage du nuage de points et utilisation du relevé numérique pour effectuer des mesures numériques en utilisant uniquement les points remarquables pour réaliser un modèle 3D volumique ?

En effet, prenons l'exemple d'une chaise CANTILEVER de Marcel BREUER de l'époque du BAUHAUS¹⁴¹. Un spécimen de cette chaise est retrouvé mais en partie détruit. Quelques points remarquables ne suffiraient-ils pas à reconstruire l'intégralité de l'objet (figure 37) ? D'où la notion de modélisation géométrique que nous aborderons dans la partie ci-après.

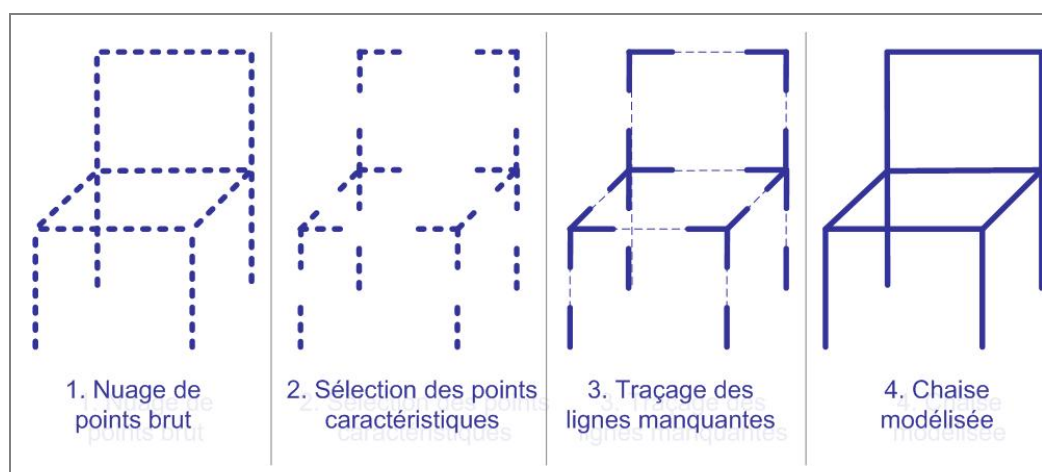


Figure 37 : EXEMPLE DE RECONCEPTION D'UNE CHAISE APRES SELECTION DES POINTS AIGUS

¹⁴⁰ BDF = Bloc Diagramme Fonctionnel

¹⁴¹ Le BAUHAUS est un courant de pensée né en ALLEMAGNE en 1919. Se basant sur du design moderne, l'école internationale rassemble les plus grands comme Paul KLEE ou Wassily KANDINSKY. Mais suite à la crise économique et la montée du nazisme, elle ferme en 1933. Malgré tout, nombre des idées, des concepts ou des produits issus du BAUHAUS sont apparus 40 ans plus tard et sont encore présents dans notre vie quotidienne. C'est le cas de la chaise Marcel BREUER.

3.3.4 LA MODELISATION 3D ET LA DYNAMIQUE

Une problématique récurrente à tous les constructeurs de produits d'imagerie et de Réalité Virtuelle consiste à trouver des méthodes pour valoriser la perte d'informations due à l'utilisation d'images. En effet :

On ne croît que ce que l'on voit.

Dès lors, comment faire la différence entre une image CAO et une image issue de l'infographie sachant que :

- une image CAO est précise au micron et possède une dynamique réaliste de son modèle numérique,
- une image issue de l'infographie est peu précise, possède des liaisons préprogrammées et non réaliste par rapport à la situation réelle mais totalement réaliste à la visualisation.

Ces deux types de visualisation sont deux domaines à part entière : le domaine CAO et l'imagerie de synthèse¹⁴². Les différences essentielles entre CAO et CG résident dans :

- la résolution et la fidélité des modèles numériques 3D face à la réalité,
- la notion de dynamique que les informaticiens nomment la 3D+t¹⁴³ :
 - en CAO, la dynamique se réalise grâce à des modules optionnels qui permettent de réaliser des simulations numériques réalistes au regard de simulations physiques réelles,
 - en CG, la dynamique se réalise directement dans le même logiciel de modélisation ; le rendu peut être *beau* mais non réaliste au regard de simulations physiques réelles,
- le rendu de la visualisation finale grâce aux textures.

3.3.4.1 La modélisation CAO 3D : un peu de théorie

Il existe plusieurs types de modélisations géométriques [GARDAN 2007a].

La première est historique : c'est la *modélisation filaire*. Mais celle-ci entraîne souvent de mauvaises interprétations de la géométrie de la pièce et est très peu usitée depuis de nombreuses années [POITOU 1989]. Cependant, dans le cadre d'une analyse de la cinématique d'un objet, nous serons amenés à réaliser des modèles filaires en CAO afin de valider le fonctionnement dynamique.

¹⁴² Dans le monde anglo-saxon, l'imagerie de synthèse est appelée Computer Graphics, c'est cette appellation de CG que nous utiliserons dans la suite de ce manuscrit.

¹⁴³ Cette abréviation du 3D+t est fortement utilisée dans le milieu informatique afin d'établir une différence entre le virtuel (3D) et le virtuel dynamique (3D+t). Le paramètre temps t intervient dans la dynamique comme une 4^{ème} dimension. A chaque nouvel instant, l'infographiste doit repositionner les

La *modélisation surfacique* permet de définir la pièce par des surfaces ou des carreaux. Elles se tracent selon des courbes de BEZIER [BEZIER 1987], des NURBS¹⁴⁴ [PIEGL & al 1997] ou de façon paramétrique... Le mode de représentation le plus utilisé en CAO est le modèle BRep¹⁴⁵ structurant les surfaces d'une pièce par leurs équations. Le surfacique sert de base à une représentation hiérarchique où la pièce est limitée par des surfaces, elles-mêmes limitées par des courbes qui sont, elles-mêmes limitées par des points [FLYNN 1990].

Enfin, la *modélisation volumique* peut être de deux types : en voxel ou en CSG¹⁴⁶.

La *modélisation voxel* fonctionne par occupation spatiale à l'aide de cubes élémentaires. Il s'agit de l'unité de mesure la plus usitée pour peser la taille d'un fichier de numérisation.

La *modélisation volumique de type CSG* est le résultat d'opérations booléennes réalisées sur des volumes simples.

3.3.4.2 La modélisation CAO 3D : outils et exemples patrimoniaux

Les logiciels de modélisation CAO sont nombreux et à chaque métier correspond un type de solution informatique. Désormais, tous ces logiciels disposent de l'intégralité des possibilités de modélisations géométriques et proposent même de confondre surfacique et volumique pour définir une seule et même pièce [de GAGET de CASTELJAU 1985] [de BOOR 1978].

Parmi les outils les plus répandus, il convient de citer CATIA V5 de DASSAULT SYSTEMES¹⁴⁷ destiné à plusieurs métiers via l'utilisation de multiples ateliers dits Workshop (mécanique, électricité, tuyauterie...).

Citons également PRO-ENGINEER de la société PTC¹⁴⁸ qui, dans sa nouvelle version WILDFIRE, est le deuxième logiciel leader sur le marché de la CAO.

Mais il existe de nombreux autres logiciels de modélisation CAO : SOLIDWORKS, SOLIDEDGE, AUTOCAD, INVENTOR, TURBOCAD, MICROSTATION...

éléments 3D. C'est le principe de l'animation selon le mode opératoire du montage vidéo. Aucune loi ne peut être appliquée mais seulement des *keyframes* également appelés *images clefs*.

¹⁴⁴ Principe d'affichage remplaçant les polygones par une enveloppe constituée de lignes courbes dites courbes de Bézier. Les surfaces sont alors calculées mathématiquement par extrapolation et non par les coordonnées de chaque point.

¹⁴⁵ BRep = Boundary Representation

¹⁴⁶ CSG = Constructive Solid Geometry

¹⁴⁷ <http://www.3ds.com>

¹⁴⁸ <http://www.ptc.com>

Notons que la société GEHRY TECHNOLOGIE¹⁴⁹, société indépendante du cabinet d'architecture GEHRY a complètement reprogrammé CATIA V5 et a réalisé une version destinée uniquement à l'architecture [CAD-MAGAZINE 2005] :

- modélisation par et/ou utilisation de banques d'éléments,
- paramétrisation de l'ensemble des éléments du modèle CAO,
- génération et mise en corrélation automatique des plans 2D et 3D CATIA V5 ou autre format,
- calcul automatique des quantités (matières + coûts),
- planification automatique et synchronisation avec les outils de gestion de projet,
- mise en place et simulation des éléments nécessaires à la construction du bâtiment,
- comparaison en temps réel du modèle numérique avec l'avancée des travaux sur site via une numérisation par théodolite laser,
- ...

De plus, certaines sociétés se proposent de dérouler la chaîne numérique globale. C'est le cas de OKENITE¹⁵⁰ qui travaille depuis la numérisation d'objets de petites tailles grâce à son laser MINOLTA jusqu'à la modélisation de bâtiments d'architectures ou de bateaux à partir de plans. Les applications sont développées pour de la Réalité Virtuelle temps réel ou préprogrammée. Des expériences ont déjà été menées dans le domaine du patrimoine mais uniquement sur des éléments mono-objets statiques : statues, vases...

3.3.4.3 La simulation numérique 3D+t : outils

En général, les logiciels de CAO possèdent leurs propres modules de simulation numérique [GARDAN 2007b]. C'est le cas de CATIA V5 qui possède déjà en lui-même un module proposant une librairie de nombreuses liaisons cinématiques : DMU KINEMATIC.

Cependant, dans le cas où il est souhaité simuler le fonctionnement mécanique d'une machine, il existe sur le marché deux applications externes au logiciel de modélisation :

- MOTION est un module optionnel possédant son propre post-processeur ; il est disponible pour tout logiciel de CAO.
- MSC SOFTWARE propose une suite logicielle pour la simulation numérique. Dans le cas d'une simulation dynamique, il s'agit du module ADAMS ; celui-ci permet également de simuler des corps flexibles. Récemment, les logiciels ont été adaptés en plugins¹⁵¹ CATIA V5.

¹⁴⁹ <http://www.gehrytechnologies.com>

¹⁵⁰ <http://www.okan3d.com>

¹⁵¹ Un plug-in est un logiciel esclave qui utilise les données du logiciel maître. Mais les deux logiciels fonctionnent indépendamment.

Dans le domaine de la simulation des fluides, parmi les plus utilisés, on peut citer :

- FLUENT qui permet la simulation CFD de fluides de toutes natures et ce par maillage surfacique (acoustique, température, liquide, réactions chimiques, milieux multi-phasiques) ; intégration sous la forme d'un add-in¹⁵² dans Catia V5.
- LMS INTERNATIONAL propose, tout comme MSC SOFTWARE, une suite logicielle complètement intégrée dans CATIA V5 sous la forme de add-in : LMS VIRTUAL.lab (simulations acoustique, bruit et vibration, dynamique, durability¹⁵³, RDM¹⁵⁴...)

3.3.4.4 La CAO 3D+t : exemples patrimoniaux

Pour notre besoin de conservation du patrimoine technique, la CAO permettrait de valider le fonctionnement dynamique des modèles numériques.

Cependant, quel que soit le logiciel de simulation utilisé, s'il est possible d'exporter le volumique du modèle CAO sous la forme d'un modèle *mort*, il n'est pas possible d'exporter les résultats de la simulation dynamique ; y compris la définition des liaisons cinématiques. Ainsi, les objets anciens virtualisés seraient condamnés à rester dans les outils CAO très peu accessibles de par leur prix et leur ergonomie d'utilisation aux conservateurs de Musées ou au grand public !

Malgré tout, de telles simulations numériques ont été utilisées dans le cadre de la reconception archéologique de l'épave CALVI I datant de la fin du 16^{ème} siècle. En s'appuyant sur des documents d'archives et des épaves déjà connues, ce projet de recherche a conduit à la réalisation d'une maquette d'arsenal virtuelle. Cette reconstitution numérique a ensuite été testée en faisant varier différents paramètres de chargement et de tirant d'eau afin de mieux appréhender la stabilité et le comportement en mer du navire. [DAEFFLER 2007]

Dans le domaine de la technique, l'exemple le plus célèbre est celui de l'automobile de Léonard de VINCI. Afin de comprendre son fonctionnement d'après les croquis réalisés par de VINCI, le véhicule a été modélisé en CAO par le Musée de FLORENCE en ITALIE. Après avoir paramétré les différentes liaisons cinématiques, raideurs des ressorts... l'automobile a pu fonctionner virtuellement et ainsi permettre à l'équipe de scientifiques de réaliser un prototype physique fonctionnel¹⁵⁵ [FIORENZOLI 2004].

Mais les outils graphiques de modélisation permettent d'aller plus loin en modélisant un objet dans ses multi-dimensions métiers. Ainsi, IBM et DASSAULT SYSTEMES se sont associés

¹⁵² A la différence du plug-in, le add-in est un logiciel complètement intégré dans le logiciel maître. Du point de vue utilisateur, il n'y a aucune différence entre un module interne au logiciel maître et un add-in.

¹⁵³ Le terme anglo-saxon durability est préféré à son équivalent français car celui-ci a une définition plus élargie. Il signifie solidité, résistance, durabilité, pérennité.

¹⁵⁴ RDM = Résistance des Matériaux

¹⁵⁵ <http://brunelleschi.imss.fi.it/automobile/index.html>

dans les années 1990 afin de tester leur nouveau logiciel de gestion de pièces : VPM, alors fonctionnant sous CATIA V4. L'objet technique choisi pour l'expérimentation fut un objet patrimonial : le USS HOLLAND. Il s'agit d'un des premiers sous-marins *modernes* qui utilisait la propulsion grâce à un moteur à gaz (en surface) et un moteur électrique (en profondeur) ; de multiples nouvelles technologies lui furent associées comme des systèmes d'auto-stabilisation, la recharge des batteries... Il fut conçu et construit en petite série (une quinzaine) par les Américains à partir de 1905.

Le projet consista à reconcevoir ce sous-marin en CAO et ainsi tester l'intégralité des modules disponibles sous Catia comme :

- la partie électrique,
- l'hélice qui a pu être validée par la méthode des éléments finis, de même que pour le système de ballastes,
- des études sur les problèmes d'éclairage des commandes à l'intérieur du sous-marin ont pu être menées,
- ...

C'est au total plus de 2200 pièces (auquel il faut rajouter plus de 2000 pièces pour les rivets...). Ce projet dura plus de 10 ans¹⁵⁶.

D'autres expériences de modélisation/simulation sont en cours comme celle de la reproduction d'une partie des usines RENAULT de BILLANCOURT. Le but principal est d'obtenir une maquette CAO pour visualiser le flux de production dans l'atelier C5 [MICHEL 2007]. Malheureusement, cette initiative se rapproche plus d'une modélisation CG que CAO.

3.3.4.5 La modélisation CG 3D et 3D+t : outils

L'imagerie de synthèse permet la modélisation et la simulation dynamique mécanique et CFD de modèles numériques.

Les deux logiciels leader sur le marché sont :

- MAYA de la société ALIAS,
- 3D STUDIO MAX de la société DISCREET.

Récemment, ces deux sociétés ont été rachetées par la société AUTODESK¹⁵⁷ qui détenait déjà le logiciel de CAO AUTOCAD. Parmi le panel des outils proposés par AUTODESK, on peut également noter un logiciel particulier : SPIDER MOTION BUILDER permettant de faire du reverse-engineering à partir de nuages de points.

Afin de rendre la simulation encore plus réaliste, il existe de nombreuses bases de données optionnelles. C'est le cas de EASYNAT, une base de données d'éléments naturels (arbres, plantes...).

¹⁵⁶ <http://www.geocities.com/gwmccue/index.html>

¹⁵⁷ <http://www.autodesk.com>

De même, certaines simulations particulières comme l'animation des éléments pileux (cheveux, poils d'animaux...) ou les phénomènes liés au feu (combustion) sont à décliner en module optionnel pour MAYA et 3D STUDIO MAX.

Il existe d'autres logiciels faisant appel à moins de compétences professionnelles et à la frontière entre la CAO, le CG et la Réalité Virtuelle : c'est le cas de SOFTIMAGE ou BLENDER...

Mais après enquête de notre part, l'ensemble des utilisateurs et des constructeurs de logiciels d'imagerie de synthèse sont d'accord pour affirmer que dans le cas d'une modélisation d'une machine de type mécanique, il sera plus judicieux d'utiliser des logiciels de CAO pour la modélisation/simulation plutôt que du CG.

Cependant, l'intérêt des logiciels de CG réside dans la qualité du rendu final. En effet, ceux-ci sont moins réalistes d'un point de vue fonctionnel (par la réalisation d'animations préprogrammées) mais sont beaucoup plus réalistes que la CAO en terme de visualisation de l'objet (textures, couleurs, éclairage...).

Malgré tout, en 2006, la société américaine GOULD STUDIOS¹⁵⁸ a reçu le deuxième prix de la SOLIDWORKS WORLD DESIGN COMPETITION pour sa modélisation d'une locomotive à vapeur datant de 1879. Dans le cadre de son projet d'étude de l'histoire des moyens de transport, William GOULD a recréé à l'aide des logiciels SOLIDWORKS et PHOTOWORKS le modèle 3D de la MASON BOGIE. Cette dernière est considérée comme l'une des plus belles locomotives qui ait été construite. Cependant, on notera que l'intérêt majeur de l'entreprise réside dans les belles couleurs du rendu texturé ainsi que dans la possibilité de vendre une lithographie de l'objet ou un ensemble de plans. [CAD-MAGAZINE 2006]

¹⁵⁸ <http://www.gouldstudios.com>

3.4 LA VALORISATION MUSEOGRAPHIQUE PAR LA REALITE VIRTUELLE

Comme nous venons de le voir précédemment, la phase de *virtualisation* présente deux aspects :

- Capitalisation des connaissances intrinsèques de l'objet et des données permettant sa contextualisation (partie 3.2 de ce chapitre),
- Capture de l'information physique de l'objet (partie 3.3 de ce chapitre).

La chaîne numérique depuis la digitalisation jusqu'à la simulation semble répondre au premier besoin de *conservation* du patrimoine. Cette première phase permet de produire un modèle virtuel. Mais quelle suite donner à cette modélisation ? Comment la valoriser ? De nombreux industriels se préoccupent de l'intégration de la chaîne numérique globale de la figure 38 :

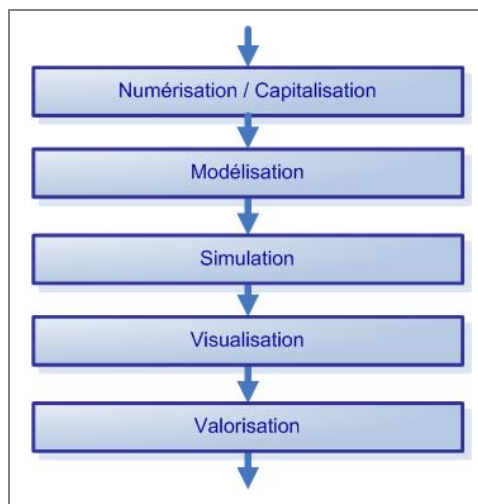


Figure 38 : LA CHAÎNE NUMÉRIQUE GLOBALE SELON LES INDUSTRIELS

Mais pour quelle finalité ? Une préparation au démantèlement [HASAN 2000] ou à la mise en sécurité dans le cas où une maquette fonctionnelle physique serait fabriquée ? Une aide à la restauration d'objet ? Les potentialités de finalités sont illimitées et sont à déterminer.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous présenterons les finalités du processus d'utilisation en mettant l'accent sur les possibilités d'évolution de la muséologie [REMUS 1993].

3.4.1 MAQUETTE NUMÉRIQUE : DES UTILISATIONS INNOVANTES EN GI ET EN MUSEOGRAPHIE

Nous expliquerons tout d'abord une utilisation directe de la DMU en GI : la création d'une maquette physique par l'impression 3D.

Puis nous envisagerons une nouvelle perspective d'utilisation de la DMU en muséographique.

3.4.1.1 La maquette numérique comme support au prototypage rapide : faits réels

La maquette numérique est devenue un élément incontournable de la production industrielle. La DMU est présente à chaque étape et toute l'entreprise s'organise autour d'un PDM depuis la R&D, la conception [BASCOUL 2005], les essais, la fabrication, au marketing jusqu'à la maintenance [LECAILLE 2003]. Toujours soucieux de faire au mieux, dans les délais les plus courts et à moindre coût, les simulations numériques se sont vulgarisées et la RV prend sa place dans le processus industriel global. C'est une nouvelle forme de prototypage rapide : le prototypage virtuel [MIKCHEVITCH & al 2005].

De nombreuses recherches sont menées dans ce sens, entre autre, dans le cadre de l'amélioration de la sécurité en milieu industriel [HASAN & al 2000] [POULIQUEN 2006] [SHAHROKHI 2006] mais aussi en situation d'usage [BERNARD & al 2002b] [HASAN & al 2002].

Mais l'utilisation du virtuel permet d'aller plus loin qu'une simple visualisation graphique. Grâce aux modèles numériques affinés et possédant désormais un maillage fermé, il est possible d'imprimer directement l'objet en 3D.

Comme illustré par la figure 39, le passage du réel au virtuel peut également être bouclé et servir de validation à la phase de *virtualisation*. Michael BERMAN¹⁵⁹ insiste sur la nécessité de réinjecter le modèle virtuel dans la réalité afin de le valoriser [BERMAN 2006].

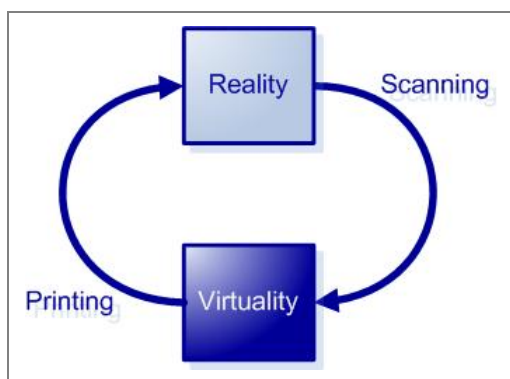


Figure 39 : ENTRE REALITE ET VIRTUALITE : LA NUMERISATION 3D ET L'IMPRESSON 3D

D'un *point de vue technologique*, BERMAN propose d'enchaîner le *scanning* avec le *printing* en réalisant une impression 3D à l'aide des technologies de prototypage rapide comme la stéréolytographie¹⁶⁰. La restitution d'une maquette *bonne matière* est issue des techniques de GI et est désormais intégrée dans le processus de conception d'un produit nouveau [CPNI 2004] [JEANTET 1998].

¹⁵⁹ Senior Vice-President du ART CENTER COLLEGE of DESIGN aux ETATS-UNIS.

¹⁶⁰ Il existe différentes techniques d'impression 3D regroupées sous l'appellation prototypage rapide : stratoconception, la stéréolytographie, le frittage de poudre...

D'ores et déjà, il est à noter que la modélisation CAO semble être une des étapes essentielles de notre démarche de patrimonialisation. En effet, l'usinage tout comme le prototypage rapide nécessite un fichier informatique présentant une peau externe fermée : les outils de CG sont donc à proscrire.

On notera que l'utilisation ultime de la DMU en rendu réaliste s'emploie peu dans les entreprises sauf dans le cas des achats ou du marketing.

Pour le prototypage rapide, de nombreuses applications industrielles ont pris forme aussi bien dans la fabrication de pièces uniques comme la joaillerie [SIEKIERSKI 2003] ou les applications dentaires [de BAILLENX 2003]. Certains musées ont également recours à ces techniques de prototypage rapide par moulage en plâtre ou impression 3D en stéréolithographie pour créer des copies de leurs objets de collections les plus fragiles ou d'objets incomplets non exposables en l'état au public [WILLIAMS 2003] [LOPES 2003].

3.4.1.2 La maquette numérique comme usage muséographique : hypothèses

D'un *point de vue muséographique*, il existe plusieurs types de valorisation possibles de la DMU :

- une conservation-restauration archéologique,
- une conservation-restauration technique,
- une restauration fonctionnelle,
- une conservation de type *ethnologique*.

Nous détaillerons ces différentes finalités dans les chapitres 5 et 8 en démontrant que le pré-requis de la maquette numérique est indispensable. De plus, comme le précise Marin DACOS [DACOS 1999] :

La fonction première de l'écrit est la mémorisation de la réflexion. Le papier n'est qu'une modalité de cette conservation, sans doute transitoire entre le papyrus et les formes futures de transcription de la pensée humaine. Il faut désormais retransmettre ces connaissances sous une forme numérique et/ou virtuelle.

L'intérêt du numérique réside alors dans ses capacités d'adaptation à l'utilisateur et sa capacité à pouvoir restituer des connaissances non techniques sous une forme plus pertinente que celle proposée par les Musées à l'heure actuelle, c'est la notion d'hypertextes. Le tableau de la figure 40 compare les possibilités de valorisation muséographique entre une maquette physique et une maquette virtuelle.

Dans la colonne *connaissances*, on entend par *étiquettes* les annotations textuelles écrites sur un cadre que l'on rencontre généralement à côté des objets dans les Musées. Le numérique est alors un atout majeur dans la visualisation des *connaissances* car elle permet

une interactivité sur le modèle¹⁶¹ [AVILES COLLAO & al 2003]. De plus, une autre différence majeure entre la maquette physique et la maquette virtuelle réside dans son échelle de reproduction et la possibilité de la refaire fonctionner en dynamique. En effet, comme vu précédemment, la simulation est en plein essor dans le domaine de la CAO ; et ce, à moindre coût par rapport à une maquette physique fonctionnelle.

	Echelle	Modes de visualisation		Connaissances
		Statique	Fonctionnelle	
Maquette physique	À déterminer	Coût augmente en fonction du niveau de précision requis pour obtenir une bonne matière et les fonctionnalités Point de vue utilisateur = enveloppe externe		Étiquettes Annotations textuelles
Maquette virtuelle	1:1	Coût moindre Point de vue utilisateur = enveloppe externe + mécanismes internes		Interactivité sur le modèle

Figure 40 : DIFFERENCES ENTRE UNE MAQUETTE PHYSIQUE ET UNE MAQUETTE VIRTUELLE

Mais le choix ne se limite pas à l'une ou l'autre des solutions. Il est également possible de combiner le physique et le réel par superposition : c'est le principe de la *Réalité Augmentée* que nous détaillerons dans la partie 3.4.3.6 [BILLINGHURST & al 2002].

Alors pourquoi ne pas utiliser la maquette numérique dans les Musées au même titre que la DMU est exploitée dans le PLC ? Outre les problématiques liées à la conservation des moyens de visualisation du numérique¹⁶², comme MALRAUX le précise [BEAUNE 1993], ces données sont pérennes dans le temps :

Un musée est une utopie, un lieu qui échappe à la mort.

Afin d'étayer cette réflexion, dans une première partie, nous expliquerons comment la muséologie est née et quelles furent ses premières applications. Nous envisagerons ainsi comment franchir une étape supplémentaire en utilisant l'*immersion*.

Puis, dans un deuxième temps, nous présenterons les différentes technologies issues de la Réalité Virtuelle et réaliserons un état de l'art des applications déjà menées sur la valorisation du patrimoine.

¹⁶¹ Voir le réseau d'excellence européen AIM@SHAPE = Advanced and Innovative Models And Tools for the development of Semantic-based systems for Handling, Acquiring, and Processing knowledge Embedded in multidimensional digital objects - <http://www.aimatshape.net>

¹⁶² En effet, la conservation d'un objet sous une forme numérique nécessiterait également de conserver le support de lecture : le logiciel de 3D. Or les logiciels évoluent très vite tout comme les systèmes d'exploitation les supportant ainsi que les ordinateurs. Mais la conservation de l'ordinateur nécessiterait également de sauvegarder la source d'énergie l'alimentant. La réflexion peut ainsi mener à des idées absurdes et pourtant réalistes afin de garantir une conservation à très long terme [BACHIMONT 2001]. Serait-ce une nouvelle forme du métier de conservateur ?

3.4.2 VERS UNE NOUVELLE MUSEOLOGIE

Selon Hein REEDIJK, la visée des Musées se doit de changer et de s'adapter [REEDIJK 1999] :

Indéniablement, le futur des musées ne sera pas facile. À l'exception de quelques sites touristiques majeurs, ils doivent tous se préparer à une réflexion de fond et revoir le sens de leur existence.

Voyons dans un premier temps ce que le public attend des Musées. Cette analyse nous permettra de définir la nouvelle muséologie à mettre en place pour développer les techniques immersives.

3.4.2.1 Le public

Pour Ross J. LOOMIS, un visiteur vient au Musée pour trois raisons [LOOMIS 1991] :

- C'est un évènement social : pour passer un moment agréable avec son groupe / sa famille, le Musée doit lui procurer des souvenirs communs,
- C'est une découverte, un étonnement : la visite apparaît comme un challenge avec la possibilité d'apprendre et d'offrir de nouvelles perspectives,
- Le visiteur n'a aucune attente, il s'impliquera alors si l'exposition ou la présentation est intéressante (métaphore du client des magasins).

Dans une enquête SOFRES¹⁶³ réalisée en 1991, il était demandé au public s'il comprenait le fonctionnement technique de quatre objets de la vie courante. Les principaux résultats sont reportés dans la figure 41.

Désignation de l'objet	Réponse à la question : « Je comprends son fonctionnement »
Ordinateur personnel	majorité de non
Lecteur de CD	majorité de non
Boîte de vitesse automobile	majorité de non
Réfrigérateur	majorité de oui

Figure 41 : ENQUETE SUR LA COMPREHENSION DU PUBLIC FACE AUX OBJETS TECHNIQUES COMPLEXES

Ce sondage fait ressortir l'intérêt du grand public pour découvrir dans les Musées les objets techniques d'hier mais aussi d'aujourd'hui étant donné la complexité fonctionnelle qui les animent désormais [BOY 1993]. Cependant, seul le fonctionnement du réfrigérateur semble être compris. Il est donc nécessaire de revoir les méthodes d'appréhension des objets techniques afin de les vulgariser. Comme Jocelyn de NOBLET l'illustre [de NOBLET 2005] :

¹⁶³ <http://www.tns-sofres.com>

Nous sommes en 1910, un ancien ingénieur âgé de 70 ans va visiter la Tour Eiffel avec son petit fils ; il va lui expliquer à travers l'exemple de la tour ce qu'est la résistance des matériaux, les treillis... De nos jours, le même ingénieur et son petit fils visitent le Viaduc de Millau, l'ingénieur lui dira : "Je t'expliquerai quand tu seras grand car c'est un peu compliqué !"

Ce propos illustre bien le travail à accomplir pour vulgariser la technique et comprendre le rôle du contexte culturel dominant. Comme s'exclame Robert HALLEUX, Professeur d'Histoire des Sciences et des Techniques à l'UNIVERSITE de LIEGE [HALLEUX 2005] :

C'est avant tout un manque de culture technique des citoyens.

Le contexte des évolutions technologiques change et devient de plus en plus complexe. Il est en perpétuel renouvellement tout comme l'évolution des entreprises et des firmes industrielles. Le temps devient donc une variable fondamentale et critique quant à la capitalisation et la réutilisation des connaissances du passé [AMIDON 2002] :

La connaissance est un actif, elle augmente à mesure qu'elle est partagée.

3.4.2.2 Audiovisuel et muséologie

Afin de répondre à cette nouvelle attente du public, on observe, au début des années 1990, un changement dans l'objectif et la gestion managériale des Musées. Les conservateurs doivent désormais répondre aux problèmes posés par l'utilisateur / le visiteur [Le COADIC 1993] :

Après avoir été orientée récepteur, la muséologie devient orientée émetteur.

La tendance actuelle des musées est donc de passer d'une approche normative à une approche descriptive et explicative [DAVALLON & al 1993]. Pour certains, une nouvelle discipline est en train de naître : la muséologie deviendrait la *science des musées et du patrimoine*¹⁶⁴. L'objectif n'est pas de plaire de façon directe au public mais de lui plaire en valorisant l'objet [DUVAL 1993] :

Nous considérons l'objet non dans ce qu'il est, mais dans ce qu'il représente, scientifiquement ou ethnologiquement, dans son histoire, son contexte, son vécu. L'objet sert à raconter, à transmettre un discours.

Initié en 1992 par le MINISTERE de la CULTURE et de la COMMUNICATION, le MINISTERE de la RECHERCHE et de la TECHNOLOGIE ainsi que le MINISTERE de l'EDUCATION NATIONALE, le programme REMUS avait comme objectif de développer de nouvelles solutions à travers des réflexions sur la muséologie des sciences et des techniques. Nouveauté absolue dans le monde du patrimoine français, les préconisations qui en résultèrent se proposent de gérer

¹⁶⁴ Définition de l'ICOM selon Georges Henri RIVIERE [RIVIERE 1989]

les expositions comme des projets et non plus au coup par coup et de reconsidérer le visiteur.

Notons cependant que le MUSEE DE L'HOMME à PARIS, né dans la première moitié du 20^{ème} siècle, fut un premier essai isolé. Proposant une nouvelle approche ethnologique très en pointe au niveau mondial (LEVI-STRAUSS, LEROI-GOURHAN...), sa trop haute technicité lui vaut de périliter dans les années 1980. En 2006, ses collections ethnographiques ont été déplacées au MUSEE DES ARTS PREMIERS, QUAI BRANLY.

De plus, ce nouveau concept de Musée scientifique réapparut en CALIFORNIE dans les années 70-80 ainsi que dans les Musées des Civilisations au CANADA à la même période : ils permettent au public d'interagir avec les connaissances ethno-sociologiques qui lui sont proposées.

Aussi, en FRANCE en 1992, le programme REMUS vise à renouveler les pratiques muséographiques. Il est entre autre conseillé de créer des équipes pluridisciplinaires avec des membres clairement identifiés issus de domaines de compétences très différents mais complémentaires :

- Un chef de projet, qui est en général le conservateur du Musée,
- Des spécialistes scientifiques, ethnologiques... Ils élaborent le contenu, organisent le discours en scénario, choisissent l'iconographie et les objets pertinents,
- Des scénographes pour mettre en forme et créer les parcours scénographiques.

C'est ainsi qu'à partir de 1992, le multimédia a progressivement pris sa place dans les Musées : sites web, cédéroms, animations vidéos fonctionnelles, casques auditifs pour parcours guidés... [BROCHU & al 1999] Le Musée des ARTS-ET-METIERS à PARIS fut un des premiers à appliquer ces nouvelles directives lors de sa rénovation muséographique. Après près de 10 ans de travaux, il est inauguré le 10 avril 2000 par le PREMIER MINISTRE Lionel JOSPIN.

L'utilisation de l'audiovisuel est encore très présente dans beaucoup de Musées actuels mais certains ont recours à la CAO en préliminaire afin de créer des modèles réalistes. Depuis juin 2007, le Museum of INDUSTRIAL OLIVE-OIL PRODUCTION à LESVOS en GRECE possède ainsi quelques animations 3D pour expliquer le fonctionnement des machines utilisées pour presser l'huile. Les recherches et la modélisation ont été menées par une entreprise greco-anglaise MAKEBELIEVE¹⁶⁵ qui a assuré la globalité de la chaîne numérique jusqu'aux solutions de visualisations pour le Musée.

¹⁶⁵ <http://www.makebelieve.gr>

3.4.2.3 Une nouvelle dimension muséologique : l'immersion

Aujourd'hui, les musées des sciences et des techniques cherchent à désacraliser le patrimoine scientifique et technique afin de le rendre plus parlant et plus accessible à tous. Cette initiative a donné lieu à une nouvelle muséologie qui, à la différence de la première, ne se centre ni sur les objets ni sur le savoir mais sur l'expérience de la visite. Ce changement de paradigme s'accompagne d'une évolution muséographique, notamment avec l'apparition de la technique de l'immersion. Ce nouveau genre culturel propose au visiteur de *se plonger* dans le sujet pour en *éprouver* le message. On ne cherche plus à expliquer, à transmettre mais à *faire vivre* [BELAËN 2003]. Il se développe alors une nouvelle approche basée sur l'émotion et les sensations [MONTPETIT 1996]. Pour ce faire, les outils du multimédia sont améliorés, transformés afin non plus de transmettre passivement mais activement : c'est la technique de l'immersion. On pensera à quelques expositions temporaires de LA VILLETTE ou aux installations permanentes comme les cinémas OMNIMAX.

Les techniques d'immersion en Réalité Virtuelle commencent à être fortement exploitées par les industriels. En effet, lors des revues de projets, de nombreux collaborateurs doivent partager une même DMU afin d'avoir une référence de discussion commune. Nous ne rappellerons pas ici les bases de la Réalité Virtuelle tant la littérature est nombreuse¹⁶⁶. Cependant, nous poserons comme base de travail à cette 3^{ème} muséologie le principe des 3I¹⁶⁷ développé par COIFFET [COIFFET & al 1993] qui peut être élargi avec la définition de PAPIN [HURIET 1997] qui pose la règle des 5I :

La Réalité Virtuelle. C'est l'Immersion d'un sujet dans un monde Imaginé et créé Informatiquement qui, grâce à des Interfaces, donne l'Illusion de percevoir et d'agir comme dans le monde réel.

Dans un cadre muséographique, l'immersion plongerait le visiteur dans un monde sans contact avec sa réalité d'origine. Ceci suggère alors que le principe des expositions consisterait à couper le visiteur de son monde quotidien pour l'immerger dans le sujet de l'exposition. Ce fut le cas de quelques expérimentations pour l'exposition universelle de Hanovre en 2002 où un scénographe et un développeur d'imagerie informatique ont été sollicités pour imaginer un monde artificiel en rapport avec un thème. Les dispositifs de Réalité Virtuelle comme le Cave¹⁶⁸ ou le SAS Cube¹⁶⁹... rentrent généralement dans cette lignée d'applications. Grâce aux possibilités technologiques, le pouvoir d'inventivité¹⁷⁰ est désormais quasi-infini.

¹⁶⁶ Dont la référence actuelle est le *Traité de Réalité Virtuelle* par Philippe FUCHS et Guillaume MOREAU [FUCHS & al 2004]

¹⁶⁷ Interaction – Immersion – Imagination

¹⁶⁸ CAVE = Cave Automatic Virtual Environnement

¹⁶⁹ SAS Cube = salle immersive multi-écrans cubique de Réalité Virtuelle en stéréoscopie active

¹⁷⁰ Terme non usité de nos jours mais qui, au 20^{ème} siècle, était un dérivé du mot inventif. C'est la capacité pour un individu ou un peuple d'inventer / d'innover. <http://www.patrimoine-de-france.org>

Mais les technologies de Réalité Virtuelle ne proposent pas que la substitution de l'objet par une modélisation activable, le numérique consolide les liens de l'oeuvre avec son contexte qui sont poussés à leur paroxysme de par la vertu *rhizomatique*¹⁷¹ de l'hypertexte et de la contextualisation. Le numérique ouvre de nouveaux horizons à la conservation des oeuvres parce que, ne se contentant pas de simuler l'oeuvre, il propose à l'utilisateur de manipuler un ensemble d'informations offertes à toutes sortes de va et vient, de liens entre texte et contexte (les informations heuristiques¹⁷²). [MORELLI 2003]

Une remise en situation dynamique d'usage par les outils du virtuel peut alors emmener le visiteur dans un autre temps, un autre espace... comme l'hymne au progrès que louaient les grandes expositions universelles du 19^{ème} siècle [COTTE & al 2007b]. En effet, quand Paul RASSE les compare avec les musées d'aujourd'hui, il met en avant ce qui manque actuellement dans les expositions : une immersion dans la situation de l'usage originel de l'époque de l'objet [RASSE 1993] :

La plupart du temps, les expositions mettent en scène des machines restaurées, brossées, lissées, brillantes, dans le silence et la lumière des grandes salles d'exposition. On est loin, bien loin de l'usine et de l'atelier, du bruit et de la poussière, de la fatigue et de la sueur, de la fureur des luttes et de la violence des rapports sociaux qui pourtant contribuent par bien des aspects à l'histoire des technologies.

Autant d'éléments auxquels la Réalité Virtuelle peut suppléer créant ainsi une nouvelle dynamique muséographique.

3.4.2.4 Enquête : les attentes du public par les outils de la Réalité Virtuelle

Afin de valider les propos énoncés ci-avant et dans le but d'avoir un retour sur l'intérêt potentiel des NTIC dans notre champ de recherche, nous avons mené une expérimentation pour établir le point de vue utilisateur et cerner au mieux les besoins du public quant à l'appréhension de la Réalité Virtuelle sur des objets techniques anciens [LAROUCHE & al 2006b].

Le plan d'expérience propose d'immerger un public non averti dans une salle de Réalité Virtuelle ainsi que dans une visite de type Musée avec approche classique (annexe 11). Les objets de l'étude sont la machine à sel de BATZ-SUR-MER (chapitre 6) et la presse d'imprimerie LA MINERVE (chapitre 7).

¹⁷¹ D'un point de vue botanique, le rhizome est un système racinaire apte à susciter des rejetons à distance. Le rhizome se dit de quelque chose ou quelqu'un qui prend naissance sans raison d'être et agit sans pré-requis. Un rhizome ne commence pas et n'aboutit pas, il est toujours au milieu, entre les choses. C'est un inter-être, un intermezzo [DELEUZE & al 1980]

¹⁷² Voir partie ci-avant 3.4.1 la colonne *connaissances* dans le tableau des différences remarquables entre la maquette physique et la maquette virtuelle.

Deux parcours se confrontent :

- Une *partie réelle* dans laquelle nous avons reconstitué un parcours muséographique classique avec des étiquettes, des iconographies, des vidéos et la machine réelle mais non fonctionnelle pour des problèmes de sécurité,
- Une *partie virtuelle* présentant les mêmes machines mais sous leurs formes numériques avec simulation en temps réel sous CATIA V5, système de visualisation 3D passif et manipulation dans l'espace 3D grâce à un périphérique haptique.

L'échantillon est de 76 personnes, âgés de 6 à 70 ans et provenant de toutes catégories professionnelles, depuis le collégien jusqu'au conservateur de Musée en passant par le banquier, le gendarme...

Une réelle différence apparaît rapidement entre les jeunes visiteurs et les plus anciens concernant leur habitude d'utilisation des technologies de Réalité Virtuelle : évidemment, les enfants ont plus de facilité avec les interfaces de type souris 3D. Mais, d'une manière générale :

Tous s'accordent pour dire que le virtuel ne peut pas remplacer la machine réelle.

Mais, la manipulation du modèle virtuel à la place d'une vision de machine inerte apporte de nombreux avantages. Le visiteur peut :

- prendre la place de l'ouvrier ou du conducteur de la machine,
- comprendre le fonctionnement global de l'objet et la façon exacte dont les pièces s'animent,
- cerner l'objet dans son intégralité en faisant disparaître les éléments vieilliss parasitant la compréhension,
- pouvoir se déplacer autour de l'objet, y compris à travers les murs, afin d'obtenir des points de vue non observables dans la réalité,
- voir des détails en zoomant ; entre autre ceux ordinairement cachés par les éléments de sécurité,
- changer les couleurs, mettre en transparence, effectuer des sections...

Cependant, le virtuel n'est pas parfait et certains paramètres se doivent d'être présents quelque soit le modèle virtuel : c'est le cas de l'avatar.

3.4.3 LES TECHNOLOGIES DE REALITE VIRTUELLE

Le numérique peut faire revivre les technologies du passé.

Pour ce faire, les technologies de Réalité Virtuelle sont nombreuses. Celles-ci vont de la visualisation sur écran en 2D, sur écran en 3D jusqu'aux techniques d'immersion et d'interaction à l'aide de périphériques réalisant l'interface entre l'homme et la machine.

Nous allons voir dans un premier temps les possibilités offertes par les outils logiciels du virtuel et effectuerons également un état de l'art des formats standard utilisés en RV¹⁷³. Dans un deuxième temps, nous détaillerons les interfaces possibles entre le monde virtuel et les cinq sens des humains.

3.4.3.1 Les logiciels de Réalité Virtuelle

Avant de pouvoir utiliser une situation dynamique en Réalité Virtuelle, il convient préalablement de préprogrammer les scénarios et les interfaces avec les retours d'efforts, les capteurs de position, d'accélération... Le modèle CAO doit donc être importé dans un logiciel de CG pour la création des scénarios. Ensuite, les fichiers 3D+t sont interfacés dans des logiciels open source¹⁷⁴ (comme ceux de la Réalité Augmentée) ou via des moteurs 3D temps réel comme VIRTOOLS.

Tout comme pour AUTODESK, DASSAULT SYSTEMES a récemment racheté VIRTOOLS afin de l'intégrer dans une solution commerciale globale.

VIRTOOLS permet la réalisation d'un workflow ; ce n'est pas un modéleur mais uniquement un programmeur de situations dynamiques. Il est possible d'interfacer des capteurs comme éléments d'entrées dans le workflow de programmation qui pourront faire actionner tel ou tel événement : d'où la notion d'interactivité. C'est en outre le cas du PACK PHYSIQUE VORTEX, composant additionnel à VIRTOOLSDEV, permettant de simuler des gestions de comportements physiques avancés dans des applications 3D interactives.

La finalité du développement sous VIRTOOLS pourra se faire :

- en Web3D comme nous le verrons ci-après,
- à l'aide d'un format autonome,
- à l'aide de VIRTOOLS PLAYER,
- ...

Un outil à la frontière entre les logiciels de la RV et de la CG est SUBDO : ce n'est pas un logiciel de modélisation mais il est possible d'effectuer des scénarios d'utilisation relativement simples pour exploiter le modèle en Web3D. Comme spécifié dans la partie ci-avant, les éléments issus des simulations numériques en CAO ne peuvent être importés directement dans les logiciels de RV ; c'est pourquoi le passage vers les logiciels de CG est obligatoire si l'on souhaite diffuser le modèle 3D sans que le public ou les conservateurs de Musées n'aient à utiliser CATIA V5 par exemple. Cependant, dans le cas de SUBDO, l'import des éléments de dynamiques de tout type de logiciel de CAO est en cours de développement. [CHEVALIER 2006]

¹⁷³ Dans la suite du manuscrit on utilisera l'acronyme RV pour mentionner la Réalité Virtuelle.

¹⁷⁴ Open source = logiciel distribué gratuitement et dont le code source est en accès libre sans droit d'auteur.

Il existe également des plateformes multi-formats comme SPINFIRE, 3DTC ou ONESPACE. Notons également que MATLAB permet aussi de faire de la RV.

3.4.3.2 Les formats de 3D et le Web3D

Le Web3D consiste à générer un modèle numérique d'un objet sous la forme d'un fichier informatique compatible et disponible quelque soit le type de plate-forme informatique¹⁷⁵.

Les principaux formats Web3D permettant une visualisation en temps réel sont :

- Les formats propriétaires des logiciels de CAO et de CG,
- Les formats internationaux ISO (VRML, X3D, mpg4),
- U3D,
- ...

Le format le plus répandu est le VRML¹⁷⁶. Il est né à Genève au printemps 1994, à l'occasion de la première conférence mondiale sur le World Wide Web. L'idée de base fut insufflée par SILICON GRAPHICS¹⁷⁷. Le VRML est destiné à décrire des scènes en 3D et est utilisable dans les navigateurs web, les logiciels de CAO, de CG... La norme VRML 1.0 voit le jour en 1995 et permet aux développeurs de créer des mondes en trois dimensions statiques. Tout comme le HTML¹⁷⁸ est utilisé pour décrire le contenu des pages d'informations sur le Web, le VRML sera utilisé pour décrire un contenu en trois dimensions sur internet. Il connaît un grand succès et beaucoup d'internautes s'y intéressent. Très vite, le besoin de créer des mondes animés se fait sentir. En 1997, une deuxième version de VRML apparaît sous le nom de VRML 97 ou VRML 2.0 ; elle est essentiellement issue des laboratoires des sociétés SGI, SONY et MATRA. Cette version intègre des fonctions évoluées d'animation et d'interaction avec l'utilisateur. [CLAIRAND & al 2002] [IEEE 2004a] [ROCHARD & al 2005a] [TOPOL 2001]

La création des éléments géométriques du VRML peut se faire directement depuis les logiciels de CAO ou de CG qui proposent un module d'exportation au format VRML. En revanche, la dynamique doit se réaliser via des logiciels de programmation ; mais la façon la plus simple de créer de la dynamique reste la *programmation manuelle*¹⁷⁹ comme le précise Grégoire CLIQUET, assistant du directeur du département hypermédia de l'ECOLE de DESIGN de NANTES.

¹⁷⁵ On entend par plate-forme informatique les différents systèmes d'exploitation des ordinateurs (Windows, Mac-OS, Linux).

¹⁷⁶ VRML = Virtual Reality Modelling Language

¹⁷⁷ SILICON GRAPHICS est également désigné sous le sigle SGI - <http://www.sgi.fr>

¹⁷⁸ HTML = HyperText Markup Language

¹⁷⁹ On entend par programmation manuelle le fait de taper directement les lignes de code d'un fichier ou d'un programme sans avoir d'interface graphique. Exemple : Microsoft Word possède une interface graphique pour réaliser la mise en page mais Latex propose de programmer manuellement la forme du texte dans des codes de champs.

Pour lire le VRML, il faut avoir préalablement installé sur son ordinateur un plug-in comme CORTONA, COSMO PLAYER [PARALLELGRAPHICS 2005] ou un logiciel adapté comme 3D VIEW.

On notera qu'actuellement de multiples formats d'échanges et d'exports de fichiers CAO se développent : l'objectif étant d'alléger la taille du fichier en vue d'une visualisation sur le web. En effet, lors de la lecture du fichier 3D, la reconstruction des surfaces à partir du maillage est très longue.

Parmi les technologies les plus performantes, on remarquera le XVL¹⁸⁰. Ce format utilise une nouvelle technologie de maillage : le LATTICE MESH qui possède son propre processeur graphique interne. XVL se base sur la technologie VRML qui utilise une transformation des NURBS en mesh. La taille des fichiers est alors 100 à 500 fois plus petite. Tout comme pour le VRML 2.0 il est possible de visualiser la dynamique mais de nouvelles fonctionnalités ont été rajoutées : visualisation en points et lignes, en surfaces ou en volumes... possibilité de rajouter de l'affichage en texte littéral, d'effectuer des simulations cinématiques... [WAKITA & al 1999]

De même, toujours dans un cadre d'optimisation de la génération de surface de maillage et d'allègement de la taille de fichier, de nombreuses recherches sont en cours en utilisant d'autres théories mathématiques [SOUFFEZ & al 2005].

A noter également l'arrivée d'une nouvelle technologie de capture d'écran. Après le copier/coller en 2D, il a été inventé le copier/coller en 3D. Le principe consiste à récupérer le flux OpenGL provenant de la carte graphique qui a été généré par le logiciel de CAO/CG. Les données vectorielles sont alors *copiées* vers le bloc-note de l'ordinateur (points, lignes, surfaces, volumes et textures). Il est ensuite possible de *coller* le contenu du bloc-note vers SUBDO ou d'autres logiciels de Web3D. Ainsi, cette technologie a été intégrée dans le logiciel universellement utilisé ACROBAT READER de la société ADOBE¹⁸¹ pour créer, dans sa version 8.0, des PDF 3D. De même, DASSAULT SYSTEMES a créé le 3D XML¹⁸² qui permet de générer un fichier *mort* plus léger que sa version CAO native. Ce dernier ne possède donc pas de dynamique mais propose une visualisation avec la même palette d'outils que CATIA V5 (zoom, rotation, mode filaire, texture...). Le rendu photographique réaliste utilise le même moteur 3D que CATIA et semble donc assez performant. Il est également proposé de parcourir l'arbre de conception en cachant des *parts* ou des *products*. La figure 42 est une impression d'écran du fichier 3D XML de la presse BLISS citée dans le chapitre 1 de ce manuscrit comme premier exemple de rétro-conception patrimoniale réalisée à l'UTBM.

¹⁸⁰ XVL = eXtended VRML

¹⁸¹ <http://www.adobe.com>

¹⁸² <http://www.3ds.com/3dxml>

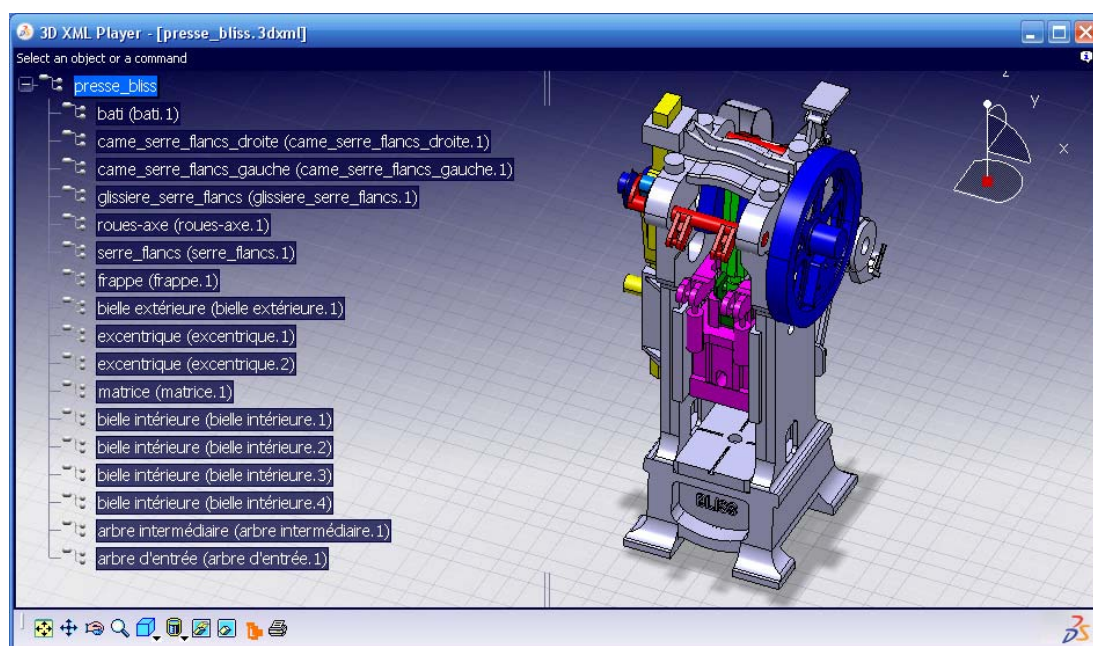


Figure 42 : FICHER 3D XML DE LA PRESSE BLISS

Notons également que la société 3D EXPLORER propose un nouveau type de visualisation de pages Web. Il est possible de créer un monde en 3D à partir d'une page html en insérant des balises vers des objets 3D (générés à partir de 3D STUDIO MAX par exemple). Disponible pour l'instant uniquement sous IE¹⁸³, un plug-in est nécessaire pour basculer entre le 2D et le 3D. Remarquons que cette technologie est distribuée gratuitement et est libre de droit aussi bien pour la création que pour son utilisation [3DEXPLORER 2005].

Enfin, la société allemande O2C propose depuis quelques années un format portant son nom et travaillant également à l'allègement du maillage. L'O2C propose d'excellentes interactions avec son utilisateur. Ainsi, de nombreux sites web proposant des bases de données contributives ont vu le jour sur internet : création de cuisine, maison... Malheureusement, ce format manque cruellement de *photo-réalisme*. Dans ce nouveau business de l'e-commerce, les reflets, la brillance, l'anti-aliasing¹⁸⁴, les ombres sont pourtant indispensables...

¹⁸³ IE = Internet Explorer

¹⁸⁴ Utilisé en imagerie de synthèse, l'anti-aliasing est une méthode d'affichage permettant de diminuer l'effet d'escalier apparaissant sur les images lorsque la résolution de l'écran est faible. Cette technique crée des dégradés de couleurs le long des contours afin de les lisser.

3.4.3.3 Interopérabilité et portage des données 3D+t

Lors de sa conférence à la journée d'étude OSTIC que nous avons organisé en 2005 à NANTES, Bruno SUNER du laboratoire CERMA de l'ECOLE d'ARCHITECTURE de NANTES souligne les problématiques liées à la conversion de fichiers 3D [SUNER 2005a] :

Un des freins majeurs au développement de ces nouvelles technologies est le problème de l'interopérabilité.

En effet, comme nous l'avons vu en introduction de cette partie 3.4, une chaîne de logiciels est obligatoire, depuis la numérisation 3D jusqu'à la création d'une situation dynamique en Réalité Virtuelle : CAO → CG → RV. A chaque étape, il est nécessaire de convertir les fichiers étant donné que chaque logiciel travaille dans un format propriétaire. L'annexe 12 établit un état de l'art de l'interopérabilité des formats graphiques 3D.

Ainsi, de nombreuses sociétés se sont spécialisées dans le portage des données. Un des logiciels les plus utilisés en GI de par son faible coût est RHINOCEROS. Le logiciel conseillé par VIRTOOLS pour la conversion de fichier est DEEP EXPLORATION de RIGHT EMISPHERE. L'annexe 13 détaille les possibilités offertes par DEEP EXPLORATION en terme d'interopérabilité entre les logiciels de CAO et de CG/RV.

Mais aucun logiciel ne résout actuellement le problème de l'export de la dynamique¹⁸⁵.

Avec l'objectif d'obtenir une interopérabilité totale entre logiciels, dans le cadre d'un projet européen intitulé SPACEMANTIX, il a été développé le format X3D. Il possède des informations supplémentaires par rapport au VRML ou au STEP¹⁸⁶... :

- Géométrie 3D,
- Relations géométriques entre pièces,
- Textures du modèle 3D,
- Textures de l'environnement,
- Shader (informations liées à la luminosité).

L'objectif est de pouvoir intégrer les données du PLM¹⁸⁷ dans le format X3D afin de réaliser un *modèle numérique intelligent* permettant de nouveaux échanges entre les métiers de l'entreprise. Notons que le langage utilisé pour décrire le X3D est du XML¹⁸⁸ le rendant ainsi compatible avec de nombreuses applications ou bases de données informatiques. [SPACEMANTIX 2002] [SPACEMANTIX 2005] [X3D 2005]

¹⁸⁵ On entend par dynamique l'intégration des phénomènes physiques / mécaniques comme les efforts définissant une partie des interactions homme / machine.

¹⁸⁶ Formalisé dans la norme ISO 10303, le STEP est un format standard préconisé pour l'échange de données de produit. Il est couramment utilisé par les entreprises industrielles. STEP = STandard for the Exchange of Product model data

¹⁸⁷ PLM = Product Lifecycle Management

¹⁸⁸ XML = eXtensible Markup Language

Par ailleurs, lors de la conférence IMAGINA en 2005 à MONACO, SONY R&D a dévoilé un nouveau format d'échange de modèles 3D : le Collada. L'idée initiale provient du problème d'échange des données 3D entre logiciels et applications lors du développement de la X-Box.

Le Collada est de classe C¹⁸⁹ pour les logiciels de CG et de RV mais n'est pas encore développé pour la CAO. Ce format propose l'ensemble des classes nécessaires à la réalisation d'une application de RV en temps réel ; les champs disponibles sont :

- Animation,
- Camera,
- Code,
- Controller,
- Geometry,
- Image,
- Light,
- Material,
- Program,
- Texture.

SONY souhaite développer gratuitement ce format et propose donc à tous de l'utiliser, de le tester, de le valider et de le modifier en fonction de ses besoins ; c'est un appel à contribution internationale. Notons que, tout comme le X3D, le Collada utilise le langage XML. [COLLADA 2005]

3.4.3.4 La vision en Réalité Virtuelle : 3D vision et vision immersive

Nous avons vu précédemment que dans la théorie des *3I*, l'*immersion* joue un rôle essentiel dans le succès d'une application en RV. Pour que l'utilisateur puisse rentrer dans un monde virtuel, une étape essentielle à franchir est celle d'une vision en relief ou 3D. Comme le précise Véronique DELOFFRE [DELOFFRE & al 2005] :

La représentation graphique de la 3^{ème} dimension, le relief 3D, sont des représentations illusionnistes qui nous donnent une construction mentale de notre environnement.

La technologie de vision 3D la plus répandue est celle de la vision stéréoscopique. Apparue après la seconde guerre mondiale, celle-ci a été étendue au champ non plus seulement photographique mais également à la vidéo depuis 1995. La stéréoscopie est la base de fonctionnement des systèmes de vision immersive. On distingue :

- La *vision active*. L'ordinateur va générer deux images : une pour l'œil droit et une pour l'œil gauche. L'utilisateur doit alors porter des lunettes spéciales qui vont s'opacifier par alternance en se synchronisant sur la fréquence de rafraîchissement de l'écran à tube. Ainsi, l'utilisateur verra successivement l'image de droite puis l'image de gauche lui faisant ainsi croire à une vision 3D.
- La *vision passive*. L'ordinateur va également générer deux images : une pour l'œil droit et une pour l'œil gauche. Cependant, la visualisation se fait sur un écran géant par deux

¹⁸⁹ Classe C = interopérabilité totale

vidéoprojecteurs : un pour les informations de l'œil droit, un autre pour les informations de l'œil gauche. Or chacun des vidéoprojecteurs possède un filtre polarisant tout comme les lunettes de l'utilisateur qui vont dépolarisier l'image en identifiant à quel œil correspond quelle image. Elle est extrêmement compliquée à mettre en place car nécessite un réglage optique très précis pour rendre l'illusion parfaite !

Au FUTUROSCOPE de POITIERS, une majorité des attractions proposent des visions 3D actives et passives.

Cependant, pour palier à cette problématique où un artefact est nécessaire pour avoir une vision en trois dimensions, une nouvelle technologie est en pleine émergence : ce sont les écrans 3D. Le principe de fonctionnement repose sur la superposition de huit images décalées et est donc en réalité une évolution de l'holographie.

La société française HELTIC TECHNOLOGIE / 3D MEDIA propose une visualisation sur écran en stéréographie ; le système permet de générer une image en relief sans interface sur l'humain. De même, X3D TECHNOLOGIES, la société allemande développant le format X3D, a développé une technologie similaire mais moins convaincante que ses concurrents français.

Afin de pouvoir immerger totalement le spectateur, il a été développé depuis plusieurs années des systèmes de projection dits immersifs. L'installation consiste à positionner plusieurs écrans géants les uns à côté des autres afin de former un cube, une sphère... L'utilisateur est placé au centre du système. Ainsi, quelle que soit sa position dans l'installation et l'endroit où se pose son regard sur l'écran, il verra toujours une image en 3D.

- Le SAS CUBE est fabriqué par BARCO, il s'agit de la technologie la plus ancienne.
- Le YVIEW est développé par ANTYCIP, c'est une version alternative au SAS CUBE. Celui-ci possède non pas des écrans en toile mais en fibre de verre transparente ; la finition est bien meilleure que le SAS CUBE.
- La société québécoise IDEACTION a développé un système de projection $\frac{1}{2}$ sphérique avec un seul vidéoprojecteur ; les données d'entrées sont des scénarios 3D STUDIO MAX, le logiciel génère les images en temps réel et il est possible d'interagir dans le monde virtuel en naviguant, pour l'instant, via un joystick à six dimensions.

3.4.3.5 L'interactivité en Réalité Virtuelle : des interfaces kinesthésiques

L'ensemble des installations citées précédemment peut être couplé à des interfaces hommes/machines afin d'appliquer un autre "I" de la théorie des 3I : l'*Intéraction*.

Comme nous allons le voir dans le chapitre 5 sur la définition d'un objet et selon les propos de Paul RASSE sur les informations heuristiques de contextualisation, un système immersif se doit d'interagir directement avec son utilisateur. Pour ce faire, de nombreuses technologies existent agissant sur les cinq sens des humains :

- l'ouïe : propagation d'ondes sonores de l'objet émanant un évènement au niveau moléculaire, il s'agit d'un déplacement d'atomes et non d'une conversion de matière,
- la vue (voir partie ci-avant) : propagation d'ondes lumineuses de l'objet mais la matière initiale reste intacte (principe similaire à l'ouïe),
- le toucher : principe d'action-réaction, l'humain exerçant une force, l'objet lui appliquera une force opposée ; le toucher est exercé dans une force proportionnelle à la résistance du matériau et n'est pas destructeur ; suite à cette action de friction, il peut s'observer à long terme une détérioration de la matière,
- l'odorat : propagation de molécules dans l'atmosphère ; excepté les systèmes auto-producteurs, à terme, les molécules libérées par l'objet disparaîtront.

Notons que le goût et l'odorat sont encore à l'état de recherche et qu'il n'existe pas de solution automatisée sur le marché à l'heure actuelle. En effet, dans le cas des objets techniques ici étudiés, un sens est difficile à restituer : le goût. Afin d'apprécier l'objet selon les sens cités, l'expérience – dans le sens découverte par l'homme de l'artefact en question – ne demande pas, de façon générale, un test destructeur. Dans le cas du goût, celui-ci étant le résultat d'une réaction chimique, dans la majorité des cas, le produit initial de la réaction en sera converti en un autre produit ou détruit.

Comment capturer un son qui n'existe plus et comment le restituer ? Dans le domaine de la restitution des ambiances sonores, on notera l'expérience menée par le BRITISH MUSEUM de LONDRES sur la reconstitution du son des machines mécaniques [LANE & al 2003]. Mais également les travaux effectués par des laboratoires d'architecture qui tentent d'oraliser¹⁹⁰ virtuellement les bâtiments. Des travaux sont ainsi menés sur d'anciennes églises présentant des acoustiques particulières et nécessitant plus qu'un son Surround Pro Logic en 5.1 ; c'est le cas de l'Abbaye de NOIRLAC dans le CHER actuellement étudiée par l'équipe de Bruno SUNER du laboratoire CERMA [SUNER 2005a].

Ce laboratoire mène également des travaux pour restituer les ambiances lumineuses dans les anciennes salles de spectacle. En effet, avant l'arrivée du gaz et de l'électricité, le seul moyen de s'éclairer était les bougies ou tout autre objet incandescent [SUNER 2005b]. Quelle puissance lumineuse restituait une lampe à huile ou une bougie ? Comment modéliser ce flux ? Des questions que les architectes se posent également de nos jours lors de leurs conceptions modernes.

¹⁹⁰ Il est entendu par oralisation l'action de restituer un son au même titre que la visualisation permet de restituer une image.

La société IMMERSION propose tous les types d'IHM¹⁹¹ : visualisation, interfaces kinesthésiques, tactiles...

- CYBERGLOVE → positionnement en 3D de la main,
- CYBERTOUCH → retour de vibrations (éléments déformables comme les fluides),
- VIRTUALHAND for V5 est spécialement conçu pour Catia V5 (Combinaison de CYBERGLOVE + CYBERTOUCH),
- CYBERGRASP → retour d'effort localisé (phalanges des doigts),
- CYBERFORCE → retour d'effort de la main (combiné avec Cybergrasp),
- HAPTIC WORKSTATION → combinaison de tous les éléments cités ci-avant ainsi que d'un casque immersif de vision active,
- Système de tracking des yeux,
- MICROSCRIBE G2 → modelage d'une surface en virtuel ; outil destiné principalement aux designers et aux artistes,
- OMEGA HAPTIC DEVICE → retour haptique de nouvelle génération permettant de supprimer le poids propre de l'appareillage ; commercialisé par FORCE DIMENSION.

A l'interface entre la RV, la CAO et le CG, dans le domaine des IHM, il existe également les souris 3D de la société 3D CONNEXION¹⁹² permettant de naviguer en trois dimensions. Par rapport aux souris d'ordinateurs classiques 2D, l'ajout d'un axe induit alors la possibilité des rotations et permet une manipulation plus aisée d'éléments 3D.

Mais il n'existe pas actuellement de système intégrant l'ensemble de ces différentes interfaces kinesthésiques. L'étape ultime réside alors dans l'intégration de ces technologies en une seule application. C'est entre autres ce sur quoi travaillent de nombreux laboratoires de recherche du CEA¹⁹³. L'objectif consiste à utiliser la RV pour les opérations de maintenance en milieu à risques. Le projet CHAVIR¹⁹⁴ propose trois démonstrations de missions d'intervention dans le cadre du démantèlement et de l'assainissement de chantiers nucléaires [HARVEST 2005]. La finalité du projet réside dans la création d'un logiciel interopérable et multi-usages pour effectuer des simulations en RV : scénarios, collisions, intégration de l'environnement, simulations numériques... La plate-forme utilisée s'intitule PHARE : il s'agit d'un dispositif d'immersion en RV mur et sol couplé à des capteurs de positions de l'utilisateur et proposant un système à retour d'efforts Virtuose 6D [GELIN & al 2003].

Notons que dans la gamme des retours haptiques, la société PROSENSE a développé un bras qui s'interface avec MATLAB. Les données 3D doivent être au format VRML ; l'interfaçage et la programmation se réalisent par la TOOLBOX de MATLAB. Ainsi de

¹⁹¹ IHM = Interface Homme Machine

¹⁹² <http://www.3dconnexion.com>

¹⁹³ CEA = Commissariat à l'Energie Atomique

¹⁹⁴ CHAVIR = CHAntier VIRtuel

nombreuses applications se sont développées dans le domaine de la médecine pour réaliser les pré-opérations virtuelles afin d'entraîner les chirurgiens aux manipulations délicates.

Dans la catégorie des objets commerciaux, nous remarquerons l'arrivée de la console WII de chez NINTENDO¹⁹⁵. Véritable IHM de RV, elle propose des retours d'efforts, des capteurs de positions, des accéléromètres... Malgré son prix relativement élevé, c'est un des premiers pas pour faire entrer la RV dans nos maisons.

3.4.3.6 La Réalité Augmentée

Un capteur utilisé dans la quasi-totalité des applications en RV est la caméra : celle-ci permet de positionner spatialement un objet, un humain et de le faire interagir avec l'environnement virtuel immersif. L'application la plus utilisée est celle de la génération d'une image virtuelle sur une image réelle. De multiples outils et applications en AR¹⁹⁶ existent.

L'UNIVERSITE de TECHNOLOGIE de GRAZ a développé une application en open source pour PDA¹⁹⁷ en Réalité Augmentée. Une de leurs applications se présente comme suit :

Un décor réel d'un chemin de fer avec des rails en bois mais sans train ni aiguillage. Les PDA sont équipés d'une caméra et le train est virtualisé sur les rails réels. Le tout est visualisé sur l'écran du PDA en temps réel. Il est alors possible de changer les aiguillages virtuels et de *faire la course* avec un autre train commandé par un autre PDA synchronisé en BLUETOOTH¹⁹⁸ [GRAZ 2005].

C'est aussi le cas du projet AR Toolkit. Il s'agit d'une application permettant de superposer de l'imagerie virtuelle à de la vidéo. Elle a également été développée en open source par l'UNIVERSITE d'OSAKA au JAPON. Elle est utilisée par plus de 300 chercheurs à travers le monde. L'annexe 14 illustre le processus global effectué en temps réel de cette application. [KATO & al 1999] [KATO & al 2000] [BILLINGHURST & al 2001] [KATO & al 2001] [BILLINGHURST & al 2002a] [BILLINGHURST & al 2002b] [GORDAN & al 2002] [BELCHER & al 2003] [WOODS & al 2003] [OSAKA 2005]

3.4.4 PERSPECTIVES ET APPLICATIONS MUSEOLOGIQUES

Nous avons précédemment détaillé les technologies de la Réalité Virtuelle qui pourraient être très largement diffusées dans un domaine encore peu usité : la muséologie du patrimoine technique et industriel. On observe ainsi que de nombreuses initiatives

¹⁹⁵ <http://www.nintendo.com>

¹⁹⁶ AR = Augmented Reality = Réalité Augmentée

¹⁹⁷ PDA = Pocket Data Assistant

¹⁹⁸ Bluetooth = Protocole de communication informatique sans fil à moyenne portée

autonomes et lucratives apparaissent, des démarches qui peuvent parfois être en désaccord déontologiquement avec les valeurs portées par le Patrimoine.

Dans un premier temps, nous exposerons quelques réalisations actuelles afin de démontrer qu'elles relèvent plus de l'art, de l'architecture ou de l'archéologie¹⁹⁹.

Ceci nous permettra alors d'envisager, dans une deuxième partie, l'utilisation de la DMU comme un moyen magnanime pour diffuser la culture scientifique et technique par les NTIC.

3.4.4.1 Réalité Virtuelle dans l'art, l'architecture et l'archéologie

Cependant, les applications de RV ne sont pas destinées qu'au GI et on observe qu'une majorité des projets prennent naissance dans les domaines artistiques ou architecturaux.

Dans le domaine de l'art, Ivan CHABANAUD réalisa en 1997 une performance intitulée ICARE. L'objectif consistait à munir l'utilisateur de capteurs et d'un casque de vision stéréoscopique active afin qu'il puisse voler dans un monde virtuel. [CHABANAUD 1997].

De même, pour la modélisation de mondes virtuels, dans le cadre du Réseau RNTL²⁰⁰, le projet DYNAMICITE avait comme objectif la modélisation quasi-automatique de maquettes numériques de villes à partir de multiples sources d'informations. Il a été développé une application permettant de s'immerger dans la vie quotidienne grâce à la simulation comportementale [RNTL 2000] [RNTL 2004]. Notons que le RNTL a également contribué à la création du projet PERF-RV²⁰¹ ayant pour but de mettre en réseau des plates-formes de Réalité Virtuelle réparties sur toute la FRANCE. L'objectif était de pourvoir à une structure permettant le développement de produits nouveaux à l'aide des technologies de RV : le *bureau d'étude du futur* ! [PERF-RV 2004]

Dans le domaine de l'architecture, de nombreuses recherches sont menées pour restituer le plus fidèlement possible, outre les éléments géométriques, les paramètres visuels d'éclairage ainsi que les ambiances sonores comme nous l'avons vu ci-avant. Dans la modélisation des bâtiments patrimoniaux, il existe de nombreux cabinets d'architecture spécialisés. Ils proposent tous des workflows différents pour mener à terme une numérisation en une maquette numérique [BERTHELOT 2003]. On notera toutefois que, de par la formation des architectes, très peu travaillent directement en 3D et ce sont généralement des plans 2D qui sont fournis au client. C'est particulièrement le cas en FRANCE.

Cas exceptionnel, le cabinet d'architecture français BERHAULT²⁰² s'est spécialisé dans l'étude RDM de vestiges architecturaux afin de proposer les meilleures solutions de

¹⁹⁹ On entend ici par archéologie le sens premier de sa terminologie comme défini en préliminaire de la partie 3.1.1 de ce chapitre.

²⁰⁰ RNTL = Réseau National des Technologies Logicielles

²⁰¹ <http://www.perfrv.org>

²⁰² <http://www.berhault-architecte.com>

rénovation à ses clients. Ce type d'étude est actuellement unique en France. Cela s'explique essentiellement de par la formation pluridisciplinaire de Stéphane BERHAULT qu'il a suivie aussi bien en architecture qu'en calcul de structure.

De plus, un accès à la connaissance à partir de ces modèles numériques interactifs est fortement recherché [de LUCA & al 2005]. De nombreuses applications commerciales sont proposées aux Musées pour gérer leurs inventaires et ainsi être en accord avec la norme de la DIRECTION des MUSEES de FRANCE. Ainsi, la société ACTIMUSEO²⁰³ développe un progiciel sous FILEMAKER PRO totalement dédié à la gestion des collections muséographiques. Mais c'est également le cas des sociétés EVER EZIDA²⁰⁴ ou GALLERY SYSTEM²⁰⁵, tous deux éditeurs de logiciels documentaires à destination des Musées.

Un exemple mythique d'objet patrimonial retrouvé est celui-ci du CRYSTAL PALACE à LONDRES. Il a servi pour l'exposition universelle de 1851 mais a été détruit par un incendie au début du 20^{ème} siècle. Celui-ci a été étudié par un consortium anglais et américain. Une des finalités était une reconstitution en VRML. Outre l'étude de l'éclairage dans le hall d'exposition, l'étude permit également de comprendre comment l'évacuation des eaux de pluie se faisait sur ces milliers de mètres carrés de toits de verres horizontaux. [CRYSTAL PALACE 2005]

De même, sous l'impulsion de l'ancien MINISTRE de la RECHERCHE François d'AUBERT et s'appuyant sur un passé citadin chargé d'histoire, une politique du *tout virtuel* est menée par la ville de LAVAL en FRANCE [d'AUBERT 2006] :

Laval est une ville qui aime son histoire. C'est pourquoi nous menons une action ambitieuse et volontaire dédiée à la préservation et à la restauration du patrimoine. [...] La réalité virtuelle, c'est aussi un formidable atout pour l'étude et la mise en lumière du patrimoine historique.

Née de cette volonté, CLARTE, une association de transfert de technologies a modélisé le théâtre de la ville en VRML. Une première ébauche aurait été réalisée sous AUTOCAD puis importée dans 3D STUDIO MAX pour générer un fichier VRML autonome. Selon les sources commerciales, le processus global n'aurait pas duré plus de 1.5 jours, ce qui semble peu !

En partenariat avec CLARTE, la société lavaloise NAUTILUS s'est spécialisée dans la modélisation et le rendu réaliste des objets architecturaux ou structuraux anciens. Ils ont réalisé il y a quelques années la modélisation de la ville de LAVAL en 1753 et ce, à partir de plans, de gravures, de tableaux de l'époque et de relevés archéologiques. Le modèle 3D STUDIO MAX a été porté vers VIRTTOOLS pour créer une ville virtuelle proposant une visite interactive. Cependant, on constatera qu'il s'agit bien de CG car certains éléments ne sont pas très réalistes ; de plus, un travail d'ethnologues aurait pu mettre en avant des usages que l'on ne peut découvrir dans les documents historiques. [PILLON 2005]

²⁰³ <http://www.actimuseo.com>

²⁰⁴ <http://www.ever-ezida.com>

²⁰⁵ <http://www.gallerysystems.com>

Le dessin et la photographie constituant les techniques de relevés traditionnels utilisés en archéologie et dans les sciences patrimoniales sont progressivement remplacés par ces moyens virtuels [LABOURY & al 2005]. Comme le précise Jean-Paul SAINT-AUBIN [SAINT-AUBIN 2007] :

Les nouvelles technologies sont venues à bout du quadrillage archéologique avec ses piquets et ses ficelles instables.

Considéré comme un véritable outil d'investigations, un modèle virtuel de ROME à l'antiquité est en cours de réalisation à l'UNIVERSITE de CAEN [MADELEINE 2005]. Cette démarche vient compléter un précédent travail réalisé en 1942 par Paul BIGOT sur une maquette en plâtre. L'objectif étant de pouvoir proposer des hypothèses et de les valider par des expérimentations virtuelles comme par exemple le processus de construction de la ville tel que les textes historiques le décrivent. [LECOCQ 2007]

On notera également les travaux menés par la ville de BOLOGNE en ITALIE sur son cimetière de 1914-1918. Une première phase de numérisation des stèles les a conduits à recréer virtuellement le cimetière en ajoutant des liens hypertextes sur les tombes afin de mettre à disposition les informations issues des fouilles archéologiques. [BORGATTI & al 2005]

De même, dans les applications de RV sur des sites très anciens, de nombreux travaux sont entamés sur des grottes préhistoriques [PIGEAUD & al 2007] ou des sites d'exploitations minières [CAUJEU & al 2007]. Alliant relevés manuels, relevés lasers et photographies hautes résolutions, les archéologues travaillent désormais avec des informaticiens-métrologues pour combiner ces données afin d'obtenir des rendus les plus fidèles possibles par rapport à la réalité : c'est le cas du mur de la ville espagnole de HONDARRIBIA [VALLE MELON & al 2005] ou du parc italien antique de ROME [PIETRONI & al 2005].²⁰⁶

On notera également de nombreux projets menés par la société XYZ IMAGES²⁰⁷ pour l'élaboration d'applications multimédias ou de Réalité Augmentée sur des sites architecturaux comme le CHATEAU de CHAMBORD ou le PANTHEON à PARIS. La tendance actuelle allant vers une restitution de la polychromie originale des fresques de sites anciens de type église via une projection vidéo sur l'objet physique pour en réaliser de vrais spectacles visibles de nuit.

²⁰⁶ On constatera que les deux projets cités ici travaillent sur la même thématique mais ne collaborent pas ; notre bibliographie basculant sans cesse des SHS au SPI, c'est cette aptitude qui nous permet d'effectuer de tels rapprochements.

²⁰⁷ <http://www.xyz-images.com>

3.4.4.2 Interfaces homme/machine et culture technique

Passant progressivement du statut d'outil à celui de média, les NTIC permettent d'ouvrir le champ d'investigation à de nouveaux espaces-temps. La dichotomie d'un monde physique avec ses extensions numériques a créé les conditions d'une vision hybride de la réalité. Cette façon d'envisager la technologie non plus comme un média séparé mais littéralement intégré au monde réel pose diverses questions. La question de l'interface devient centrale. Partant du statut de système de traduction entre l'homme et la machine, elle développe peu à peu un langage autonome en s'appropriant les champs de la création traditionnelle. Dans cette vision hybride de la réalité, l'interface n'est plus un simple système de médiation entre deux entités données mais occupe le cadre tout entier de cette médiation (l'image, l'espace, le temps, l'environnement) et s'appuie sur nos références naturelles (le corps, les sens, le langage) [AIT KACI & al 2003]. C'est ainsi que le professeur Tanja DIEZMANN envisage les futures interfaces homme/machine [DIEZMANN 2004] :

À l'avenir, il n'y aura plus d'interfaces homme-machine pures, mais des interfaces numériques homme-homme. La conception d'interface devrait envisager le monde numérique comme un monde autonome et une occasion de développer des structures informelles basées non seulement sur la forme, mais aussi, et encore mieux, sur le comportement.

En effet, il ne s'agira plus de l'interface homme physique / machine physique mais d'une nouvelle IHM homme physique / machine virtuelle. Il faut donc restituer l'objet au public. Le rôle des moyens muséographiques modernes et des multimédias est évidemment important : ils peuvent même se substituer à l'objet original. Sa remise en mouvement et/ou la réalisation de maquettes peuvent aussi très bien faire comprendre la dimension technique d'un objet. Par contre, il est plus difficile de rendre tangible de façon didactique et pédagogique le monde des savoir-faire et de leurs acteurs.

C'est le véritable enjeu du Musée du 21^{ème} siècle que de restituer et de conserver les savoir-faire de l'ère industrielle afin de pouvoir fournir des données fiables et exploitables pour le troisième millénaire.

Entre 1820 et 1845, une vingtaine de Manufactures de tabacs a été construite par l'Etat. Depuis 1920, on détruit progressivement ces usines sauf ISSY-LES-MOULINEAUX, NANTES, TOULOUSE, LYON, MARSEILLE ou MORLAIX [SMITH 2006]. Celles-ci sont reconverties en logements ou comme MORLAIX transformée en Musée en 2006. Peu d'entre elles gardent une trace même insignifiante de leurs activités passées à l'exception de leurs bâtiments refaits à neuf. Alors pourquoi vouloir sauvegarder toutes ces usines ? Une ou deux ne suffirait(ient)-elle(s) pas à commémorer le savoir-faire de l'époque ? [KEROUANTON 2005]

Il en est de même avec les objets industriels. Pourquoi conserver et exposer cinq modèles identiques de voitures comme il l'est de coutume au Musée de l'Automobile à MULHOUSE (68) ? Robert HALLEUX nous propose de ne conserver que trois exemplaires des objets techniques à patrimonialiser [HALLEUX 2006] :

- 1 pour les archives,
- 1 pour le faire fonctionner devant le public,
- 1 pour être démonté afin d'être compris et/ou servir de pièces de rechange.

La culture technique ne se limite pas à la simple volonté d'établir le catalogue des processus historiques de maturation des techniques diverses. Mais elle doit aussi savoir reconnaître l'articulation organique entre l'homme et la technique. L'outil et la machine ne résument pas tout : il faut également tenir compte de la culture dans laquelle ils s'insèrent, la relation à la nature, le monde des savoir-faire... [GENIN 2004]

Dans cet objectif, l'histoire des techniques peut apporter une réponse, entre autre, à la formation des ingénieurs [LAMARD & al 2005]. Comme l'a conclut Bruno JACOMY lors du colloque REMUS [JACOMY 1993] :

La prise en compte de cette dimension historique, voire évolutionniste, doit redevenir un élément majeur de la culture technique de l'ingénieur.

Dès lors, quel type de valorisation est-il envisageable ?

Comme le propose Corinne WELGER-BARBOZA, il conviendrait d'envisager ce partage des connaissances par la création de musées virtuels. Une expérience a déjà été menée en ce sens pour l'enseignement de l'histoire de l'art en FRANCE [WELGER-BARBOZA 2003] ou pour envisager les enseignements en primaire et secondaire par des exemples de patrimoine culturel²⁰⁸ [HEREDUC 2005].

De même, les canadiens ont créé à titre expérimental depuis 1999 un programme de recherche nommé ARUC²⁰⁹. Il est destiné à financer des recherches en partenariat entre les laboratoires publics de recherche et les associations ou les collectivités locales. Une des finalités consiste à créer un réseau national de ressources muséales pour tout type de public²¹⁰ [BONNEUIL 2004]. C'est ainsi qu'un site web²¹¹ promu par l'OBSERVATOIRE des MUSEES QUEBECOIS donne accès à l'ensemble des Musées du pays pour effectuer des visites depuis son domicile.

²⁰⁸ Projet HEREDUC, HERitage for EDUcation du programme Socrates de l'Union Européenne - <http://www.hereduc.net>

²⁰⁹ ARUC = Alliance de Recherche Universités – Communautés

²¹⁰ <http://sciencescitoyennes.org/spip.php?article127>

²¹¹ <http://www.musees.qc.ca>

3.5 SYNTHÈSE : PROBLÉMATIQUE ET HYPOTHÈSE DE NIVEAU 2

Comme nous venons de le voir dans cet état de l'art, notre approche propose une nouvelle finalité : sauvegarder et conserver un objet physique étant relativement coûteux pour un Musée. Parfois, le démantèlement étant impossible (la machine tombant en ruine), nous proposons alors de le sauvegarder sous la forme d'un objet virtuel, d'une maquette numérique...

En effet, les milieux industriels contemporains ont intégré de façon formelle l'utilisation des outils numériques. La DMU est au cœur du processus de conception manufacturier : elle est le document central de travail rassemblant l'équipe projet. De plus, la maquette numérique est également utilisée en CAO, en RDM... jusqu'aux services de communication exploitant les modèles numériques à des fins commerciales.

Dès lors, nos objets de recherche provenant des domaines techniques et industriels, les outils d'ingénierie du présent peuvent être détournés de leur segment temporel de prédilection afin d'être utilisés pour reconcevoir des objets anciens.

Cependant, cette transposition ne va pas sans faire émerger de nouvelles difficultés : en effet, les objets *anciens* n'étant pas parfaits, car usés ou détériorés par leurs usages passés, et les outils modernes du numérique évoluant dans une réalité parallèle²¹², les logiciels présentent des limites quant à l'impossibilité de représenter ces objets *anciens*. De même, les compétences nécessaires à la mise en place de ce nouveau processus proviennent d'un éventail de métiers très large qui, jusqu'alors, ne collaboraient pas ou peu sur un même projet.

La démarche de patrimonialisation d'objets techniques anciens grâce aux outils du numérique est appelée à devenir une nouvelle discipline que nous désignons par le terme d'archéologie industrielle avancée.

La première hypothèse qui envisageait la possibilité de réunir les domaines de l'HT et du GI est donc validée en théorie par cet état de l'art.

Ce chapitre 3 illustre également la non-homogénéité et la disparité des outils et des méthodes. Cependant, la démonstration réalisée dans ce chapitre permet désormais d'affirmer qu'un échange réciproque pourrait faire évoluer ces deux domaines au même titre que l'art et l'architecture ont déjà entrepris depuis longtemps des collaborations avec les sciences. La méthodologie associée pour *comprendre* → *expliquer* → *interpréter* affine le modèle des deux chaînes de l'hypothèse n°1. Elle propose de passer d'un objet réel à un objet virtuel muséographié comme illustré par la figure 43.

²¹² On entend par réalité parallèle les mondes créés à l'aide de la Réalité Virtuelle. Des mondes où tout est idéalisé et parfait.

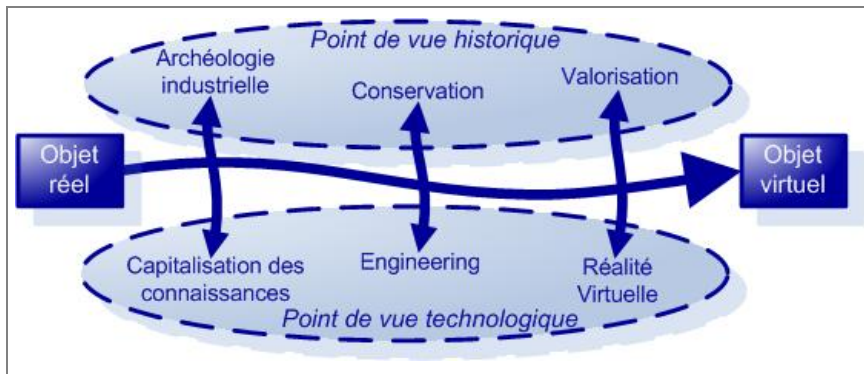


Figure 43 : LA METHODOLOGIE GENERALE DE L'HYPOTHESE N°1

Cette démarche s'appuie sur des classes clairement identifiées que nous venons de détailler dans ce chapitre et que nous pouvons synthétiser par un modèle UML du domaine (figure 44). On notera l'apparition de la classe *traces* dans laquelle on regroupe les informations, les données et les sources archivistiques gravitant autour de l'objet d'étude.

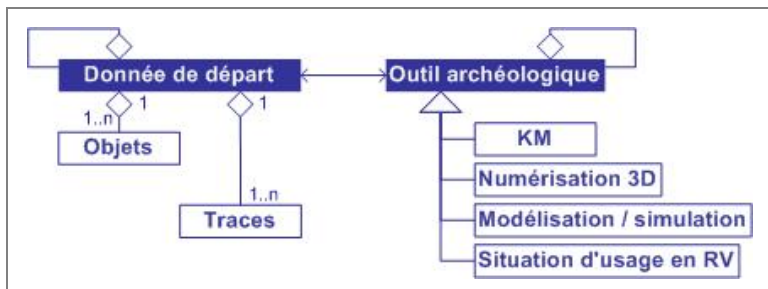


Figure 44 : LES CLASSES A MANIPULER LORS D'UN TRAVAIL D'ARCHEOLOGIE INDUSTRIELLE AVANCEE

On distingue désormais deux problématiques auxquelles doit répondre l'*archéologie industrielle avancée* :

- Selon un *point de vue implicite*, il s'agit de sauvegarder le patrimoine technique et industriel : comment capitaliser cette connaissance au plus vite, à moindre coût... ?
- Selon un *point de vue latent*, il s'agit de pouvoir valoriser ce patrimoine en vue d'envisager une nouvelle muséologie : comment rendre accessible à tous cette nouvelle connaissance ?

Une des solutions consisterait alors à mettre en place un processus adapté à l'*archéologie industrielle avancée* et s'appuyant sur une cartographie du domaine.

Notre deuxième hypothèse propose donc la création d'une ontologie générique pour décrire les ensembles concernés par cette muséologie du 3^{ème} type : un Système d'Information orienté produit-processus.

Après validation pratique de l'hypothèse théorique émise dans ce chapitre 3, afin de construire ce modèle, nous avons opté pour la deuxième façon de procéder proposée par GINGRAS : par l'expérience, objet du cas d'étude du prochain chapitre 4.

4. UN OBJET CONTEXTUALISE & TEMPORALISE : CAS D'ETUDE DE LA MACHINE A VAPEUR PIGUET N°135

L'objectif de ce chapitre est de valider en pratique la théorie explicitée dans le chapitre 3 selon laquelle l'hypothèse d'une convergence méthodologique de l'HT et du GI est possible.

Une étude de cas va être menée depuis la capitalisation des connaissances, leur compréhension jusqu'à leur valorisation. Cette expérience sera analysée dans le chapitre 5 afin de valider la deuxième hypothèse selon laquelle un modèle ontologique générique peut structurer la patrimonialisation des objets techniques anciens. Le modèle sera alors construit et appliqué par la suite sur d'autres cas d'études.

4.1 PRELIMINAIRE : PLAN DE L'ETUDE

Ce chapitre est découpé en quatre phases :

1. étude historique,
2. étude technique,
3. modélisation,
4. valorisation 3D.

Se basant originellement sur une méthodologie de type historique, l'objectif de cette étude est de présenter et de contextualiser un objet industriel devenu objet patrimonial : la machine à vapeur PIGUET n°135. Utilisée à de multiples fins, voyageant dans presque toute la FRANCE, cette machine possède une histoire à rebondissements tout comme l'histoire même des machines à vapeur.

Dans un premier temps, nous étudierons comment la société PIGUET / DUVERGIER²¹³ s'est développée. L'analyse tout d'abord des contextes social et organisationnel se resserrera jusqu'à l'étude du produit PIGUET et de ses innovations technologiques associées. Enfin, nous prolongerons le cours du temps de l'évolution de l'objet pour étudier les différentes phases de vie d'un de ses exemplaires le n°135.

Nous détaillerons ensuite la phase de modélisation et commenterons une exploitation de l'étude que nous avons réalisée à titre expérimental à l'aide des technologies de Réalité Virtuelle.

Le ST²¹⁴ est donc étudié ici selon deux axes de travail à plusieurs échelles : le contexte et le paramètre temps. Il s'agit de caractériser l'objet technique ancien dans ses multi-dimensions aussi bien temporelle que fonctionnelle ou contextuelle. La corrélation des multi-dimensions de cette machine est illustrée par la figure 45 de la page suivante. Elle synthétise cet ensemble historico-technique en pointant :

- La monographie²¹⁵ de la société ayant conçu cette machine à vapeur,
- Les vies de cette machine en utilisation ou en arrêt,
- L'environnement socio-économique dans lequel la machine a été créée puis utilisée.

Cependant, nous ne rappellerons pas en préliminaire la genèse des machines à vapeur car celle-ci est un acquis de l'histoire des techniques et ne fait pas l'objet de ces travaux de recherche. A titre d'information, l'annexe 15 résume succinctement l'épopée de la technologie de la vapeur²¹⁶ :

1. Les origines,
2. Le premier exemplaire conçu par James WATT,
3. Les premières machines à vapeur industrielles,
4. Les différentes typologies de machines, leurs applications et enfin leur déclin.

En fin de ce manuscrit figure la liste des sources et des références bibliographiques utilisées pour cette étude historique (parties 4.2 et 4.3). Une critique des sources y est également adjointe tel qu'il est usuel de le faire en histoire.

Notons d'ores et déjà que c'est, entre autre, grâce à l'ensemble des rapports de synthèse effectués lors des Expositions Universelles ou des documents de la SOCIETE des INGENIEURS

²¹³ PIGUET deviendra le successeur de DUVERGIER.

²¹⁴ ST = Système Technique

²¹⁵ Le terme de monographie est utilisé en SHS pour désigner une étude bibliographique historique d'une personne, d'une entreprise ou d'un thème donné.

²¹⁶ Sources : [BORGNIS 1821] [COTTE 1999] [DAUMAS 1964] [ECOMUSEE DU CREUSOT 1992] [FIGUIER 1896] [GUILLEMIN 1890] [PAYEN 1985] [TISSANDIER 1870]

CIVILS de FRANCE²¹⁷ que nous sommes en mesure d'effectuer une analyse mécanique approfondie de la technologie PIGUET²¹⁸ [LAROUCHE & al 2007b]

Enfin, dans une dernière partie de ce chapitre, nous détaillerons la phase de modélisation 3D réalisée sous CATIA V5 ainsi qu'une expérience de valorisation muséographique répondant à la muséologie de 2^{ème} type. Nous mettrons l'accent sur la méthodologie de modélisation suivie ainsi que sur l'analyse de la justification des outils choisis.

²¹⁷ La SOCIETE des INGENIEURS CIVILS de FRANCE sera dénommée par la suite ICF

²¹⁸ Sources = Exposition Universelle de 1900, *Rapports du jury international*, groupe IV – première partie – classe 19 / SOCIETE des INGENIEURS CIVILS de FRANCE, *Machine à T.P., à un seul cylindre construite par Piguet & Cie*, Recueil de Construction des machines, section Appareils à vapeur – Moteurs types divers (1890-1896).

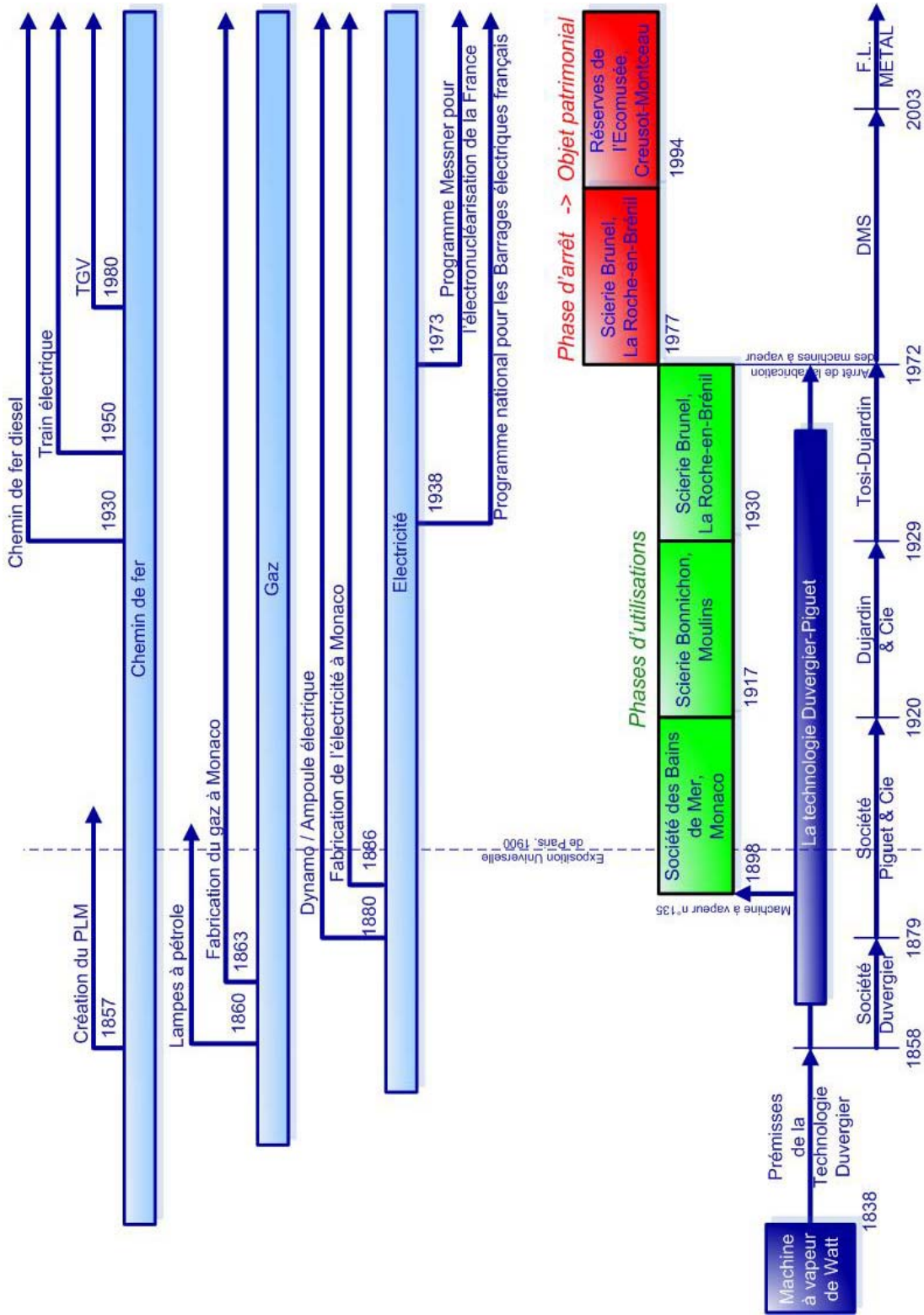


Figure 45 : LES MULTI-DIMENSIONS CONTEXTUALISANTES DE LA MACHINE A VAPEUR FIGUET N°135

4.2 ETUDE HISTORIQUE LINEAIRE DU PLC ETENDU ET ETUDE DE LA TECHNOLOGIE PIGUET DANS SES CONTEXTES

4.2.1 L'ENTREPRISE PIGUET : DE SA CREATION A LA MULTINATIONALE²¹⁹

4.2.1.1 Alphonse Duvergier, un éminent ingénieur : ses débuts dans le métier

Alphonse DUVERGIER est né en 1818 et mort en 1879.

En 1836, à la suite d'un brillant examen d'entrée, il intègre directement la 2^{ème} année de l'Ecole des ARTS-ET-METIERS de CHALONS-SUR-MARNE.

Dès sa sortie en 1838, il est nommé directeur du haut fourneau au bois de DONJEU en HAUTE-MARNE. Il s'initie à l'exploitation des forêts et à la carbonisation du bois. Ses recherches l'amènent à étudier le traitement des matières premières employées à la fabrication de la fonte ; c'est ainsi qu'il construit une machine soufflante mue par un moteur hydraulique pour son entreprise.

Faisant face aux autres hauts fourneaux du département qui ne possèdent que des souffleries construites en bois (à soufflets ou à pistons), ce projet lui vaut de se faire remarquer par l'association réunissant les maîtres de forges de la HAUTE-MARNE. Il lui est demandé de construire une machine semblable pour le haut fourneau de BROUSSEVAL. Pendant ce temps, il s'occupe également de la question des gaz des hauts fourneaux afin de les réutiliser pour fabriquer de la chaux, cuire le pain des ouvriers et éclairer son usine. Ainsi, il modifie le haut fourneau de DOMMARTIN-LE-FRANC : ses résultats sont validés et cela lui permet même de créer des appareils pour chauffer l'usine.

Quelques temps plus tard, il invente pour l'usine du CHATELLIER alors spécialisée dans la fonte des minerais, un dispositif mécanique automatique pour remplacer le patouillet²²⁰.

Fort de son succès, il est appelé aux mines de BLANZY en SAONE-ET-LOIRE en qualité de responsable de la maintenance pour la gestion du matériel d'exploitation : machines d'extraction et d'épuisement, chemins de fer, wagons... En peu de temps, il transforme complètement l'exploitation qui va dès lors prendre une rapide expansion. A son arrivée, l'atelier de réparation ne comprend que deux feux de forges et deux tours pour les essieux des chariots de roulage. Alphonse DUVERGIER les réorganise et les fait reconstruire entièrement : installation d'ateliers de modelage, de fonderie, de forge, de tours, d'ajustage et de chaudronnerie. Il y adjoint également d'autres ateliers pour le travail du bois : tonnellerie, charronnage et charpente ; et fait installer des voies ferrées. Les innovations

²¹⁹ Sources : [BORGNIS 1821] [BURAT 1856a] [BURAT 1856b] [FIGUIER 1896] [GUILLEMIN 1896] [ICF 1893] [TISSANDIER 1896] [TURGAN 1885]

²²⁰ Le patouillet est une machine destinée à opérer le débordage du minerai de fer. Aux 17^{ème} et 18^{ème} siècles, il s'agissait d'un mécanisme mû par une roue hydraulique ou un manège à chevaux. [FRANCOEUR & AL 1829]

sont telles que les mines de BLANZY cessent la sous-traitance de la maintenance jusqu'alors effectuée par les usines du CREUSOT.

Parmi ces nombreuses innovations pour les mines de BLANZY, on peut également citer son système d'exhaure fonctionnant à l'air comprimé [BURAT 1856a].

Mais DUVERGIER ne travaille pas que pour accroître directement la production. Il fait aussi édifier des logements pour les ouvriers et améliore leurs conditions de sécurité à la mine grâce, entre autre, à ses parachutes et ses crochets de sûreté qu'il installe dans divers puits de BLANZY. En effet, nous sommes aux balbutiements des systèmes de cages pour monter et descendre les ouvriers à la mine et de nombreux accidents surviennent dans cette phase du travail. Voici un témoignage extrait de l'ouvrage intitulé *Géologie Appliquée* de BURAT, un contemporain de DUVERGIER, prouvant l'efficacité de ses innovations [BURAT 1856b] :

Cinq hommes montaient dans la cage et, pour un motif que l'on n'a pu connaître, le machiniste manque la manœuvre d'arrêt. La cage arrivait au jour avec une vitesse d'environ quatre mètres par seconde et allait infailliblement se briser contre les supports sans l'intervention du crochet de sûreté ; mais grâce à cette appareil, le câble se décrocha sans secousse et la cage resta suspendue par le parachute, sans descendre, pour se fixer aux guides ; les cinq ouvriers échappèrent ainsi à une mort certaine.

DUVERGIER quitte la Compagnie de BLANZY en 1856 et installe des puits pour la recherche et l'extraction de houilles dans plusieurs sites depuis LA SAONE ET LOIRE jusqu'en ARDECHE.

4.2.1.2 La création de l'entreprise Duvergier à Lyon²²¹

En 1858, l'atelier de réparation des bateaux à vapeur dénommé *les Hirondelles* à LYON cesse son activité. DUVERGIER loue cet atelier pour se livrer à la construction de ses propres machines.

Dès 1860, sa notoriété l'ayant suivi, il obtient de nombreuses commandes. Parmi ses plus remarquables constructions, on peut retenir :

- 1861 : installation d'une machine soufflante à deux cylindres et de deux machines à vapeur conjuguées pour alimenter les hauts fourneaux de PONT-EVEQUE en ISERE ; son projet a un rendement deux fois supérieur à celui de l'installation précédente.
- 1862 : construction de l'élévateur hydraulique de LYON pour relier le bassin de la gare d'eau de VAISE à la gare du PLM²²² ; puis, en 1865 : construction d'un élévateur identique pour la Compagnie du Gaz de LYON.

²²¹ Source : [TURGAN 1885]

²²² PLM = Paris-Lyon-Méditerranée ; la compagnie de chemin de fer PARIS à LYON a été fondée en 1845 ; en 1850, la compagnie LYON-AVIGNON fusionne avec PARIS-LYON pour relier directement Paris à MARSEILLE en passant par LYON ; en effet, la compagnie LYON-AVIGNON venait d'absorber quelques temps auparavant la compagnie AVIGNON-MARSEILLE. La compagnie du PLM est officiellement créée en 1857.

- 1863 : construction de quatorze machines pour les bateaux assurant la traversée de LYON sur la SAONE pour le compte de la Compagnie des bateaux à vapeur omnibus.
- 1864 : construction de sa première *grande* machine à vapeur de 150 chevaux (110 kW²²³) pour la forge de FIRMINY dans le département de la LOIRE.
- de 1866 à 1877 : construction de 30 machines à vapeur à cylindre unique et 20 machines à cylindres conjugués pour le compte de la Compagnie des bateaux à vapeur omnibus qui, fort du succès à LYON, décide de créer un service analogue pour Paris. Notons que la dernière commande de 1875 porte une clause particulière : *Réaliser une économie de 15% sur la consommation d'une machine Compound*. Mais DUVERGIER surpasse l'enjeu technique : grâce à ses machines à deux cylindres conjugués, à détente variable et à condensation, il réalise une économie de 40% sur la consommation de charbon. L'annexe 16 présente ces machines alors considérées comme révolutionnaires pour l'époque.

De plus, DUVERGIER réalise un grand nombre d'installations diverses : roues hydrauliques, turbines, moulins, scieries, pompes... Mais son œuvre maîtresse est sans nul doute sa machine à vapeur qu'il créa en 1858 et qu'améliora son successeur : PIGUET.

4.2.1.3 Piguët & C^{ie}, les successeurs de Duvergier : de rapides évolutions économiques et sociales²²⁴

En 1879, à la mort de M. DUVERGIER, M. PIGUET, alors son élève, reprend l'entreprise avec ses trois fils et la renomme :

MM PIGUET ET CIE.

A cette date, 300 machines à vapeur basées sur le système DUVERGIER ont été construites. Six ans plus tard, c'est 300 nouvelles machines qui sont vendues portant ainsi à 600 le nombre d'exemplaires livrés à l'industrie. De par une organisation judicieuse de la production, un haut niveau de technicité des machines-outils à la pointe de la technologie et une coopération étroite avec les meilleures usines de FRANCE fournissant les matières premières, les commandes sont honorées rapidement. L'entreprise construit aussi bien pour la FRANCE que pour l'EUROPE, l'AMERIQUE du SUD... TURGAN dans son ouvrage sur les grandes usines de FRANCE nous montre *la vitalité de cette maison* [TURGAN 1885] :

²²³ Le cheval-vapeur est défini comme la puissance fournie par un cheval portant une charge de 75 kg au pas à la vitesse de 1 m/s. La puissance en Watt est définie par le produit du poids à déplacer par la vitesse de déplacement. $P = m.g.V = 75 \times 9.81 \times 1 \approx 0.73 \text{ kW}$

²²⁴ Source : [TURGAN 1885]

*Le service plans, coupes et dessins divers.
D'habiles artistes, en possession de précieuses archives contenant le recueil le plus complet de tous les organes mécaniques, recueil classé avec un ordre et une méthode parfaits, exécutent avec une rapidité remarquable et une très grande précision les dessins des machines à construire d'après les indications transmises par M. Piguet, qui, aidé de ses trois fils, surveille dans les moindres détails l'exécution des machines.*

Il apparaît évident que la famille FIGUET met tout en œuvre pour réussir. Ce texte relate également un nouveau champ de recherche qui est toujours une préoccupation des entreprises du 21^{ème} siècle : celui de la capitalisation et de la gestion des connaissances comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent.

Toutes classes confondues, l'entreprise compte environ 200 personnes soit une masse salariale totale annuelle d'environ 420 000 Frs. Tout comme le feront Henri FORD ou André CITROËN 25 ans plus tard, FIGUET intègre au maximum ses employés dans la vie de l'usine et leur reverse directement 15% des bénéfices. De la sorte, il s'assure d'un personnel qualifié et décidé quant à l'avenir de leur entreprise : en témoignent les nombreuses grèves généralisées des usines lyonnaises fin du 19^{ème} siècle qui cessent suite à l'exemple pris sur la gestion de l'usine FIGUET.

FIGUET & CIE ne fabrique pas que la machine à vapeur DUVERGIER, elle imagine, conçoit, fabrique et commercialise tous types de produits dont la force motrice est livrée par sa machine à vapeur :

- élévateurs et presses hydrauliques,
- machines pour la navigation fluviale,
- grues à vapeur,
- ventilateurs aspirateurs pour mines, ateliers... ,
- découpeuses de bois pour la tannerie, la teinture, la fabrication des pâtes à papier...

A ces fins, FIGUET père délègue un bureau d'études complet à l'un de ses fils pour innover : c'est le département de R&D²²⁵. Ainsi, en 1885, les bénéfices nets de la société FIGUET & CIE oscille entre 1.2 et 1.5 millions de Francs. Comme le prouve, une fois encore, TURGAN en 1885 [TURGAN 1885] :

MM. Piguet et Cie [...] prendront une place exceptionnelle parmi les grands établissements de construction de notre pays.

En effet, ils seront présents aux expositions universelles de :

- LYON en 1894,
- PARIS en 1898,
- PARIS en 1900. Cette dernière leur vaudra un excellent rapport de la commission française (voir chapitre ci-après : la technologie FIGUET).

²²⁵ R&D = Recherche et Développement

4.2.1.4 Courte monographie de la société Piguet et de ses successeurs²²⁶

Pour valider la croissance de l'entreprise DUVERGIER, la figure 46 montre l'évolution des ventes de machines à vapeur depuis sa création jusqu'en 1898 [ICF 1893]. C'est à cette date que l'objet de notre étude, l'exemplaire n°135 40x80 TP²²⁷, est construit.

Aucune archive supplémentaire après cette date ne nous permet de continuer cette frise d'évolution de la quantité de machines fabriquées. Cependant, la monographie de l'entreprise détaillée précédemment laisse supposer un accroissement exponentiel de la production. En effet, cette technologie sera appelée à devenir un standard comme nous le verrons ci-après.

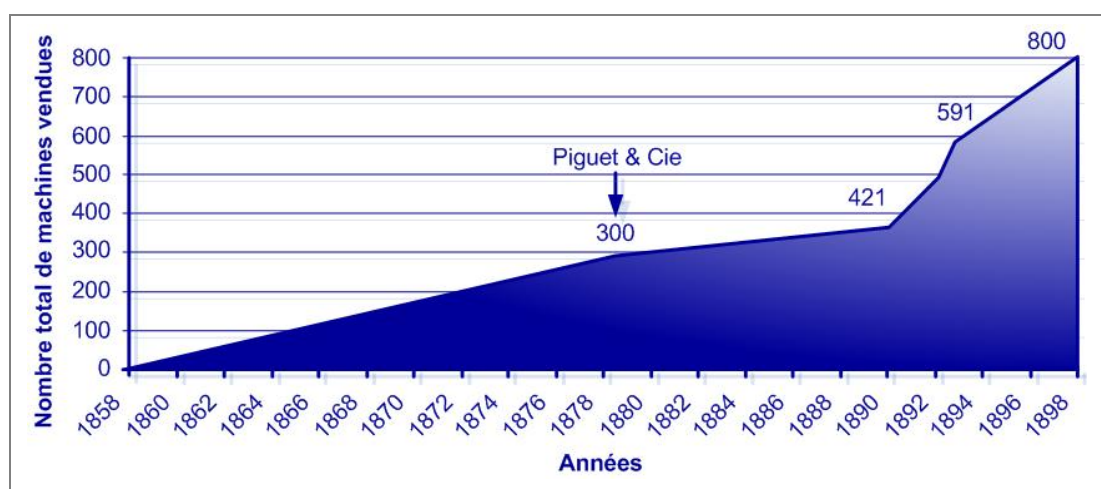


Figure 46 : EVOLUTION DES VENTES DE MACHINES A VAPEUR DE LA SOCIETE PIGUET & CIE DEPUIS SA CREATION PAR DUVERGIER JUSQU'EN 1898

En 1917, la société prend le nom de :

Etablissements PIGUET, société anonyme de constructions mécaniques.

A cette date, le changement de base capitaliste, comme démontré par le graphique de la figure 47, indique que de gros investissements sont alors réalisés. L'entreprise PIGUET élargit son champ d'investigation au niveau national :

- son siège social est basé à LYON,
- elle possède de plus plusieurs agences dans toute la FRANCE : PARIS, MARSEILLE, BORDEAUX, NANCY, NANTES et CAEN.

²²⁶ Sources : [DMS 2006] [FIVES-LILLE 2006] [VASCONCELOS & al 2005]

²²⁷ Nous verrons par la suite (partie 4.2.2.3) que le diamètre du cylindre est de 40 mm, sa longueur 80 mm et qu'il s'agit d'un système à Tirois-Plans (TP).

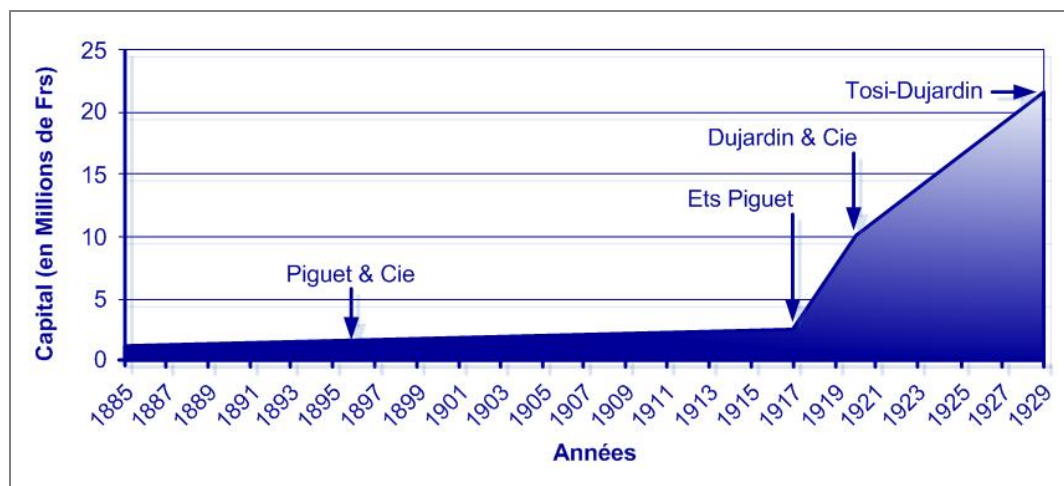


Figure 47 : 1885-1929 : ÉVOLUTION DU CAPITAL DE L'ENTREPRISE CRÉÉE PAR ALPHONSE DUVERGIER

Les points d'inflexions de cette courbe ponctuent les fusions successives intervenant à partir de 1917. Ces changements de dénomination au registre du commerce marquent sans doute la nécessité de concentrer les entreprises de même activité afin de répondre à l'accroissement ou à la saturation du marché

En effet, malgré une réputation qui n'est plus à faire et des agences situées dans presque toute la FRANCE, l'entreprise ne dessert pas encore le marché du nord de la FRANCE. C'est ainsi que dans les années 1920, elle fusionne avec la société DUJARDIN basée à LILLE donnant naissance à une nouvelle entreprise : DUJARDIN & CIE. Créée en 1872, cette dernière est spécialisée dans la construction de machines mécaniques pour la production industrielle dont, entre autre, les machines à vapeur et les compresseurs.

En 1929, dans le but d'étendre ses activités commerciales en FRANCE et dans les colonies, DUJARDIN & CIE s'associe avec la société italienne FRANCO-TOSI basée à LEGANO. Le siège social demeure à LILLE. Par cette union, la société FRANCO-TOSI fait bénéficier à l'ensemble de ses collaborateurs de nouveaux plans de machines et de nombreux brevets. Ainsi, TOSI-DUJARDIN va étendre son offre de produits en y ajoutant des turbines à vapeur ainsi que la construction de moteurs Diesel sur mesure. L'annexe 17 est un extrait du catalogue de TOSI-DUJARDIN publié en mars 1929 [DUJARDIN & CIE 1929].

Durant les rachats et fusions de sociétés, il est à noter que le siège social a déménagé de LYON à LILLE mais que cependant, le directeur de l'usine de LYON est toujours resté fidèle à son poste comme en témoignent ses nombreuses signatures sur les courriers de 1917 à 1930 retrouvés dans des archives de l'ECOMUSEE du CREUSOT-MONTCEAU (71)²²⁸.

²²⁸ Sources : archives du CREUSOT-MONTCEAU, suivi des correspondances : PIGUET & CIE à M. BONNICHON, MOULINS, 5 juin 1917 / DUJARDIN & CIE à M. BONNICHON, MOULINS, 8 mars 1929 / TOSI DUJARDIN à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 29 septembre et 28 novembre 1930 / Etablissements DUJARDIN & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 3 et 6 décembre 1930.

En 1972, la SA des ETS DUJARDIN & CIE fusionne avec les CONSTRUCTIONS DE MONTBARD ET LA SOCIETE METALLURGIQUE DU NORD pour créer l'Etablissement DUJARDIN-MONTBARD-SOMENOR²²⁹. Le siège social reste basé à LILLE mais la nouvelle société arrête la fabrication des machines à vapeur ainsi que leur maintenance pour la fourniture de pièces de rechange. Cependant, afin d'assurer une pérennité de la technologie et de bonnes relations clients fournisseurs, elle leur propose une liste de prestataires extérieurs pouvant les aider à trouver des composants de remplacement.

A la fin des années 1980, DMS SA²³⁰ continue son expansion en se liant à diverses sociétés métallurgiques dont VALLOUREC. Et en 1986, elle est absorbée par le groupe FIVES-LILLE.

FIVES-LILLE est né en 1958 de la fusion de la Société des ETABLISSEMENTS CAIL créée en 1812 et de la COMPAGNIE DE FIVES-LILLE pour les CONSTRUCTIONS MECANIQUES ET ENTREPRISES créée en 1861. Parmi les nombreuses réalisations de ce groupe, on peut citer :

- la locomotive CRAMPTON en 1849,
- le pont ALEXANDRE II de PARIS en 1900,
- les ascenseurs de la TOUR EIFFEL en 1900,
- les charpentes de la GARE d'ORSAY en 1922.

Début du 21^{ème} siècle, FIVES-LILLE devient actionnaire majoritaire de DMS, cette dernière devient société holding en 2003 et prend le nom de F.L. METAL²³¹ et se spécialise dans le secteur de la sidérurgique.

4.2.2 LE PRODUIT PIGUET : UNE MACHINE A VAPEUR HORIZONTALE A CYLINDRE UNIQUE, A TIROIRS PLANS ET A CONDENSEUR

4.2.2.1 Disposition générale de l'exposition universelle de 1900 en vapeur, en force motrice et en électricité

L'Exposition Universelle de 1900 à PARIS va prouver que la FRANCE est toujours à la recherche d'innovations technologiques. Parmi les plus célèbres, on se souvient de la création du métro parisien dès 1898 afin de pouvoir accueillir deux ans plus tard les quelques cinquante millions de visiteurs de l'exposition.

²²⁹ Source : archives du CREUSOT-MONTCEAU, suivi des correspondances : Etablissements DUJARDIN-MONTBARD-SOMENOR à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 24 novembre 1972

²³⁰ DMS SA, abréviation de DUJARDIN-MONTBARD-SOMENOR Société Anonyme

²³¹ F.L. METAL, abréviation de FIVES DE LILLE METAL

Ainsi, afin de montrer une intégration globale des technologies, les organisateurs de l'exposition de 1900 décident de mettre en place une chaîne de production complète pour la génération d'énergie :

- les chaudières sont centralisées et gérées par le service mécanique de l'exposition,
- les machines à vapeur fonctionnent 24/24h en fonction des besoins en énergie ; celles-ci appartiennent aux sociétés exposantes et sont installées directement sur leurs stands,
- chaque machine à vapeur est couplée à un alternateur ou à une dynamo ; chaque génératrice électrique est dimensionnée en fonction de la taille de la machine à vapeur à laquelle elle est associée. Elles produisent aussi bien du courant continu que de l'alternatif.
- de plus, certaines machines à vapeur génèrent directement de la force motrice destinée aux machines mécaniques des exposants,
- le transport et l'éclairage électrique de l'intérieur des bâtiments ainsi que l'éclairage nocturne sont assurés par les organisateurs de l'exposition.

L'un des problèmes les plus conséquents de ce dispositif est le calcul de la vapeur nécessaire pour alimenter les machines. Afin de pouvoir quantifier et dimensionner les chaudières de l'exposition en toute sécurité, elles sont regroupées à l'écart sous la conduite des ingénieurs de l'exposition.

La production d'électricité continue est régulée. Les groupes électrogènes à courant continu sont essentiellement destinés à fournir l'éclairage public. Ils fonctionnent à pleine charge seulement le soir, pendant quelques heures. La puissance électrique utilisée la nuit est alors de 6 000 chevaux vapeur, consommant 64 % de la capacité vapeur totale de l'exposition qui s'élève à 150 000 kg de vapeur par heure.

De même, la consommation de jour se répartit comme suit :

- Force motrice demandée par les exposants : 8 000 chevaux. Soit 10 000 chevaux effectifs en tenant compte du rendement des machines à vapeur → 80 000 kg de vapeur / h,
- Demandes directes de vapeur par les exposants → 40 000 kg / h,
- Consommation des groupes à courant continu → 5 000 kg / h,
- Consommation des groupes à courant alternatif → 25 000 kg /h.

Soit un total n'excédant pas les 150 000 kg de vapeur par heure pour l'ensemble de l'exposition [ICF 1902a].

4.2.2.2 Place des machines Piguet dans la galerie des groupes électrogènes

Les machines qui participent à la fourniture de la force motrice de l'exposition sont en majorité des machines à plusieurs cylindres ; elles sont de tailles conséquentes et font appel à des connaissances très pointues du fait de leur haut niveau de technicité. Parmi elles, un certain nombre de machines monocylindre subsistent dont une seule munie de tiroir-plans : celle de MM. PIGUET & CIE de LYON.

Couplée à un alternateur à courant triphasé GRAMMONT, elle tourne à une vitesse de 94 tours/minute et permet de fournir 860 kVA²³². Malgré une disposition démodée et une boîte à tiroirs de dimensions conséquentes, cette machine présente un certain intérêt grâce à sa régularité de marche et sa consommation de vapeur relativement faible. Ainsi, avec ses 600 chevaux, cette machine à vapeur fournit près de 10 % de l'électricité nécessaire pour alimenter l'éclairage électrique de nuit de l'exposition universelle.

Mais la société FIGUET expose également, à côté de sa machine principale, une petite machine standard de 25 chevaux environ. Celle-ci figure comme appareil auxiliaire du groupe électrogène et actionne l'excitatrice de l'alternateur (figure 48 [ICF 1902b]).

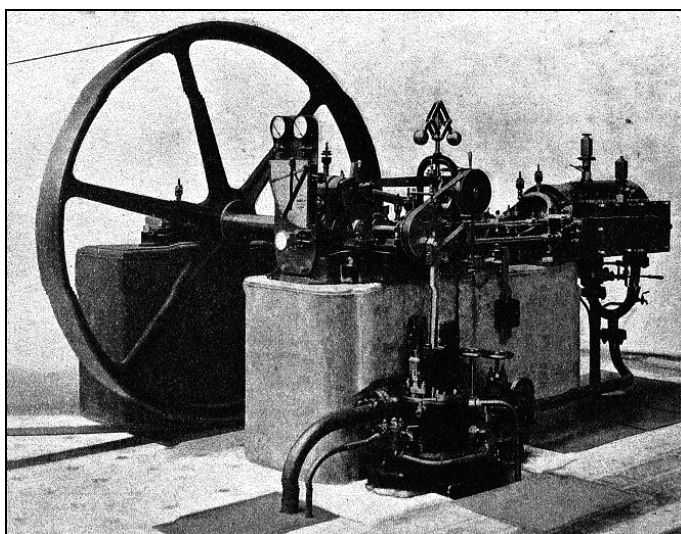


Figure 48 : 1902 - MACHINE A VAPEUR FIGUET DE 25 CHEVAUX²³³

4.2.2.3 Description générale de la technologie de Duvergier : simplicité et efficacité²³⁴

Le dispositif développé par DUVERGIER et amélioré par FIGUET est une machine à vapeur horizontale, à haute pression, à détente variable par régulateur et à condensation. Sa disposition générale est représentée par la figure 49. La description technique du principe de fonctionnement des machines à vapeur est détaillée dans l'historique des machines en annexe de ce manuscrit.

²³² La puissance en KVA est calculée en prenant en compte la puissance en kW, la perte de charge due au rendement de la machine ainsi que le facteur de puissance : le $\cos \varphi$.

²³³ Source : [ICF 1902b]

²³⁴ C'est grâce à l'ensemble des documents de synthèse effectués lors des Expositions Universelles que nous sommes en mesure d'effectuer une analyse mécanique approfondie de la technologie FIGUET dans la partie suivante [JURY 1906] [ICF 1896].

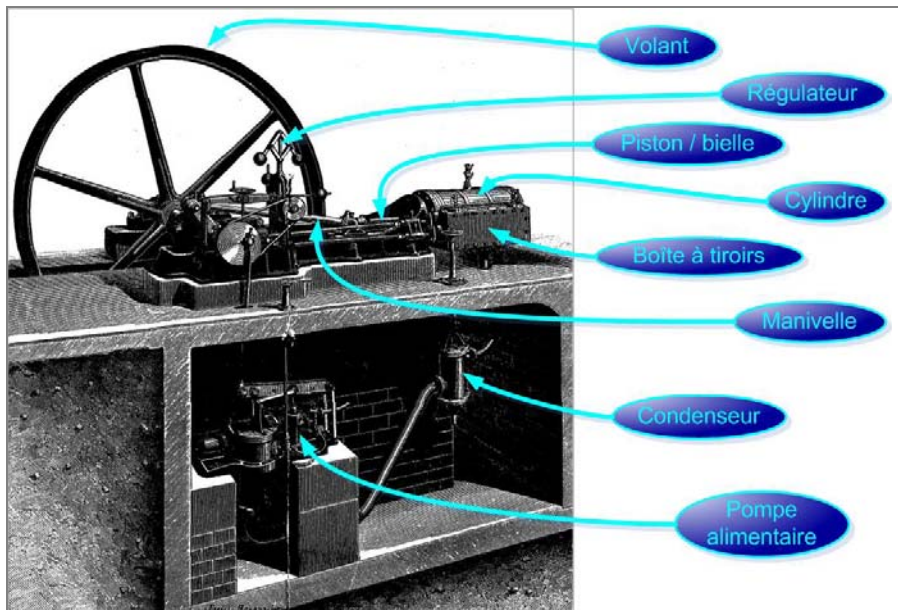


Figure 49 : DISPOSITION GENERALE DE LA MACHINE DUVERGIER EN 1885²³⁵

Elle se distingue des autres machines de son époque par sa parfaite régularité de marche à vitesse constante et sa faible consommation de combustible grâce, entre autre, à :

- de grands orifices de passage de la vapeur,
- une fermeture rapide de l'introduction,
- des espaces nuisibles réduits au minimum,
- une admission variable dans de grandes limites,
- une double enveloppe avec circulation de vapeur autour du cylindre,
- une purge naturelle et constante du cylindre en son fond.

Le bon fonctionnement de la machine DUVERGIER n'étant pas basé sur une extrême précision des petits organes mécaniques, ceci permet d'obtenir une régularité de marche parfaite ainsi qu'une grande facilité de conduite et de maintenance, permettant d'espacer les réparations sans que le rendement n'en soit trop dégradé :

- *Régularité de marche* : En 1885, l'emploi de cette technologie a été prouvé dans de nombreux métiers, dont, entre autre, celui du tissage mécanique. Elle permet d'obtenir des produits fabriqués d'une qualité supérieure à ceux obtenus avec les mêmes métiers mus, soit manuellement, soit par d'autres machines à vapeur, soit par des moteurs hydrauliques. De plus, des essais de comparaison prouvent que la production journalière est augmentée de 25 à 30 % en utilisant la machine DUVERGIER et ce, grâce à une régularité de marche parfaite : une vitesse maximale constante ne donnant jamais lieu à des à-coups ou à des accélérations intempestives.
- *Consommation* : Les machines DUVERGIER sont garanties pour fonctionner avec, au maximum, 1.5 kg de houille pour 1 cheval par heure de marche. La consommation

²³⁵ Source : [TURGAN 1885]

pouvant sans difficulté descendre en deçà de ce seuil en fonction de la taille de la machine et de la qualité de la houille.

Le catalogue de l'exposition universelle de 1900 démontre que cette technologie est une machine à vapeur optimisée et performante malgré sa simplicité et son architecture générale un peu ancienne. En effet, DUVERGIER et PIGUET ont réussi à allier deux principes sur une seule machine allant à contre-courant de la sophistication dominante de l'époque.

En effet, afin de pouvoir augmenter la puissance de leurs machines à vapeur, les constructeurs se tournent usuellement vers des technologies à plusieurs cylindres :

- soit en couplant deux cylindres différents sur le même volant (désignées machines *en tandem*),
- soit en utilisant la détente de vapeur dans plusieurs cylindres successifs (machines *compound*).

Idée révolutionnaire à cette époque, tous les constructeurs sont persuadés d'avoir trouvé la meilleure solution.

Mais, DUVERGIER et PIGUET ne trouvant pas les performances de ces nouvelles machines aussi satisfaisantes que les monocylindres, décident de garder l'ancien système en l'améliorant. En effet, la machine monocylindrique de PIGUET rivalise avec les machines de nouvelle génération à plusieurs cylindres. De par sa grande élasticité²³⁶, elle est capable de fournir la même quantité d'énergie que les appareils basés sur les dernières innovations technologiques. C'est entre autre le cas de l'utilisation d'un cylindre à enveloppe de vapeur qui a fait ses preuves depuis plus de 30 ans et qui permet une faible dégradation du rendement en maintenant le cylindre à la température de la vapeur (voir partie ci-après sur la description des organes de la machine).

De plus, normalement employé sur des machines à plusieurs cylindres, DUVERGIER et PIGUET mettent en place un système à tiroirs plans sur leur machine monocylindrique. Bien que très simple de fonctionnement, le système à tiroirs plans admet assez facilement de grandes vitesses de marche et supporte aisément de grandes pressions d'admission. Etant un système interne et non accessible pour le mécanicien, cet organe de distribution ne nécessite aucun réglage à l'inverse des distributeurs à déclics ou rotatifs qui requièrent une grande attention de la part du mécanicien lors du fonctionnement de la machine. De plus, contrairement aux tiroirs-plans standards, ceux de PIGUET n'altèrent en rien la vitesse de fermeture à l'admission et la vitesse d'ouverture à l'échappement. Les caractéristiques du système de distribution PIGUET par tiroirs-plans sont équivalentes aux distributeurs à déclics à l'exception près qu'ils encaissent plus aisément de grandes vitesses / couples élevés et qu'ils sont moins complexes leurs conférant ainsi une durée de vie plus longue. Couplé à un

²³⁶ De nos jours, on utilise le terme *souplesse*.

régulateur à boules, le tiroir-plan permet d'autoréguler l'admission en vapeur en fonction de la charge demandée.

Enfin l'intégralité du système régulation/admission/échappement ne réclame que très peu d'articulations. Ceci est un grand avantage car les articulations soumises aux frottements requièrent de nombreux systèmes de lubrifications automatiques et sont également synonymes de risques de pannes demandant un remplacement régulier des composants actifs.

Ainsi, après 30 années de perfectionnement sur plus de 800 machines et grâce au compromis entre deux générations de machines, la machine à vapeur DUVERGIER qui se dénomme désormais machine à vapeur PIGUET obtient une marche très souple, adaptable à diverses puissances, très facile à faire fonctionner et demandant un entretien minimum. Le conducteur n'a pas besoin de rester en poste fixe ; il peut alimenter la chaudière et même vaquer à d'autres occupations dans l'entreprise. La figure 50 est le plan générique distribué par PIGUET à ses clients pour une machine horizontale, à haute pression, à condensation, à détente complète dans un seul cylindre et variable par le régulateur, à tiroirs-plans, sans aucun mécanisme de déclic.

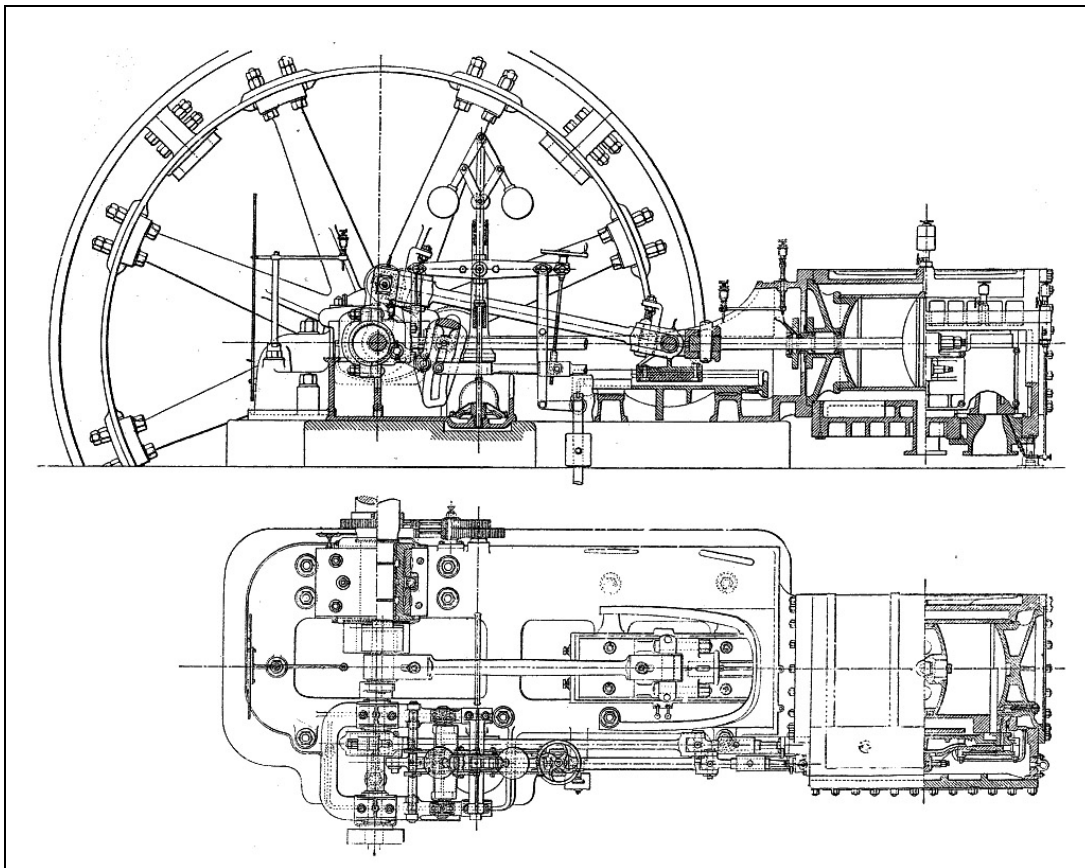


Figure 50 : 1900 - MACHINE A VAPEUR PIGUET - PLAN D'ENSEMBLE HORS POMPE ET CONDENSEUR

4.2.2.4 Description de la technologie : le cylindre

Comme illustré par la figure 51, le cylindre, à enveloppe de vapeur complète, est formé de quatre parties :

- la chemise intérieure rapportée (1),
- l'enveloppe cylindrique (2),
- et les deux fonds (3+4).

Les fonds sont creux et s'assemblent, l'un (3) sur la chemise (1), l'autre (4) sur l'enveloppe (2) ; l'étanchéité étant assurée par des bagues en caoutchouc²³⁷.

L'enveloppe ne fait qu'un avec la boîte à tiroirs (5). De forme rectangulaire, la boîte est placée sur un côté du cylindre et est aussi longue que le cylindre lui-même ; grâce à cette disposition, les espaces morts ne dépassent pas 2.25 % du volume de la chambre. La boîte à tiroirs (5) est fermée latéralement par un couvercle boulonné (6).

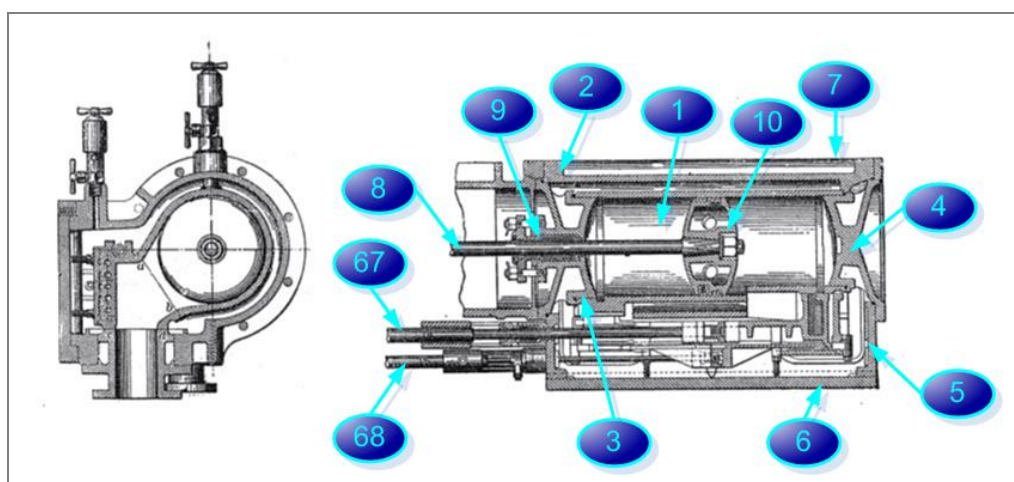


Figure 51 : 1900 – MACHINE A VAPEUR FIGUET - PLAN DE DETAILS DU CYLINDRE ET DU DOUBLE TIROIR

Le cylindre à vapeur (1) est un simple tuyau alésé dans lequel sont percés à chaque extrémité, les orifices de passage de la vapeur. Il est obtenu par moulage en fonte.

Le cylindre et les tiroirs sont placés dans l'enveloppe. La vapeur peut donc circuler librement à l'intérieur et permet de conserver une température élevée comme si le cylindre était placé dans la chaudière. La purge du cylindre est naturelle.

L'enveloppe (2) en fonte est revêtue d'un calorifuge entouré d'une ceinture en tôle d'acier bleue maintenue par des cercles en laiton (7).

La distribution de vapeur au cylindre s'effectue à l'aide d'un tiroir-plan à mouvement de va-et-vient invariant sur le dos duquel glisse une tuile elle-même commandée par le régulateur. Les garnitures des tiges de tiroir (67+68) et de la tuile sont métalliques ; l'écrou de chaque tige est en bronze. Voir partie ci-après sur la description de la technologie du tiroir-plan et son mode de fonctionnement.

²³⁷ Le terme de *bagues en caoutchouc* est progressivement abandonné dans les années 1930 pour se dénommer *boudin en caoutchouc*. De nos jours, celui-ci est désigné sous le nom de *joint d'étanchéité en caoutchouc*.

Il est à noter qu'aucune articulation n'existe dans l'enveloppe (2) nécessitant ainsi un entretien minimum.

4.2.2.5 Description de la technologie : le piston et l'arbre moteur

Le piston à vapeur (8) est en fonte et d'une seule pièce, sans aucune vis ni boulon d'assemblage. Il s'agit d'une prévention contre les accidents graves dus aux projections de pièces lors de dévissages *automatiques* causés par les vibrations.

Les deux gorges du piston sont garnies de larges cercles produisant l'occlusion nécessaire et évitant l'usure. Deux tasseaux en bronze sont prisonniers sous les cercles et permettent de centrer le piston (9).

La tige du piston est en acier doux. La crosse est guidée sur une glissière unique. La machine n'est conçue que pour fonctionner dans un seul sens de rotation. En effet, la coulisse n'est pas guidée sur sa partie supérieure : la machine ne peut donc pas fonctionner à l'envers. La glissière et le coulisseau sont en fonte avec interposition de métal doux pour éviter les grippements²³⁸.

La coquille de la tête de tige du piston ainsi que la traverse à tourillon de la petite tête de bielle motrice sont boulonnées au coulisseau et sont en acier doux (10).

La bielle motrice est également en acier doux avec doubles clavettes serrées par écrou à frein d'arrêt. Les coussinets sont en bronze.

L'arbre du volant est en acier doux. Le large palier du bâti reçoit un porte coussinet en quatre pièces garnies de coussinets en bronze. Le chapeau est fixé par quatre boulons et est traversé par deux vis de serrage.

Le volant est en deux ou quatre pièces assemblées et frettées à la jante et au moyeu. Sa jante est convexe ; elle peut être commandée directement par courroie mais peut également être usinée avec dentures ou avec gorges. Le bâti est directement fixé sur le massif en pierre, permettant ainsi de démonter et de remonter d'autres pièces de la machine indépendamment sans démonter la machine dans son intégralité.

4.2.2.6 Description de la technologie : les tiroir-plans : fonctionnement, commande et arbres de distribution

Une machine à vapeur fonctionne grâce à un système de piston coulissant dans un cylindre. La vapeur sous pression provenant de la chaudière rentre dans le cylindre étanche et exerce un effort sur la surface plane du piston. La plus grande difficulté dans la mise au point des machines à vapeur est de trouver un système permettant d'automatiser l'effort exercé dans les deux phases du piston (aller et retour). La solution technologique du piston

²³⁸ De nos jours, on préfère l'expression *limiter les frottements à éviter les grippements*.

bistable nécessite donc un appareil pour aiguiller la vapeur d'une chambre à l'autre du cylindre en fonction de la position du piston : cet organe s'appelle le tiroir-plan. Aujourd'hui dénommé distributeur, ce dispositif équipe toutes les machines FIGUET.

Le tiroir a une section générale pratiquement triangulaire. Il est actionné par une tige (67) reliée invariablement à un excentrique (53) et règle ainsi l'admission et la compression. Un second tiroir, glissant sur le dos du premier, opère la fermeture. Il est actionné par une tige (68) sous la dépendance du régulateur. La figure 52 est un schéma détaillé des tiroir-plans.

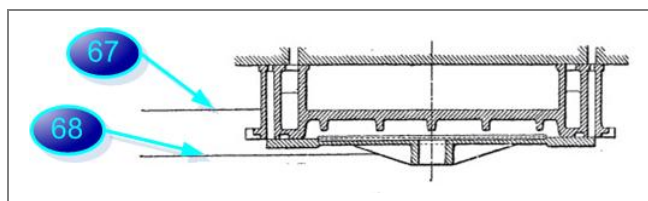


Figure 52 : 1900 – MACHINE A VAPEUR FIGUET - SCHEMA DES DEUX TIROIRS SUPERPOSES

L'arbre spécial de distribution (également appelé arbre auxiliaire) est en acier doux tout comme le vilebrequin de commande ; il est placé du côté opposé à l'arbre moteur. L'arbre auxiliaire porte l'excentrique du tiroir de distribution et le tourteau de commande de la pompe à air et du régulateur.

Le mouvement du tiroir de détente est pris sur le même excentrique (53) mais celui-ci est raccordé à une bielle oblique (60) elle-même encastrée dans une coulisse (63) ; l'ensemble n'étant donc pas en rotation mais en mouvement oscillatoire. Dans la coulisse (63) est insérée la tête de la bielle de commande du tiroir de détente (64) ; cette tête de bielle est suspendue à hauteur variable sous l'action du régulateur par la tige (72).

Le régulateur est isocèle. Toutes ses articulations comme d'ailleurs toutes celles de la machine, sont baguées de bronze. Son coefficient d'anisochronisme est approprié à l'application industrielle pour laquelle la machine est dédiée.

La barre (72) en liaison pivot dans la barre de détente (68) possède à son extrémité une roue qui, manœuvrée à la main, permet de commander la mise en route ou l'arrêt complet de la machine à vapeur.

L'ensemble des articulations de la distribution ne dépasse pas 7. La figure 53 montre les détails pratiques de cette technologie.

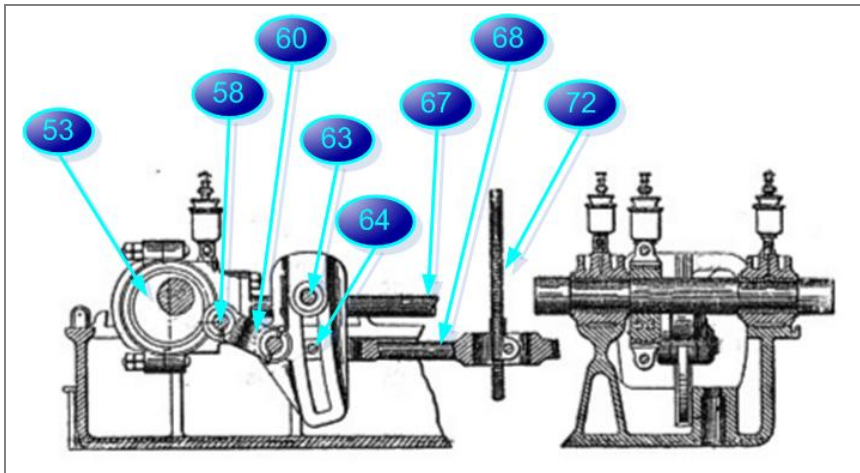


Figure 53 : 1900 – MACHINE A VAPEUR PIGUET - PLAN DE DETAILS DE LA DISTRIBUTION

4.2.2.7 Description de la technologie : le condenseur et la pompe à air

Afin que la purge s'effectue naturellement par gravité et que l'eau provenant du cylindre soit acheminée directement au condenseur, l'orifice de la purge est placée plus bas que le cylindre ; mais, pour éviter les phénomènes de refoulement ou de stagnation des eaux dans la tuyauterie, les appareils de condensation PIGUET sont placés en dessous du sol de la machine.

Le condenseur est un simple pot en fonte muni d'une soupape intérieure réglant la gerbe d'épanouissement de l'eau d'injection. Il est relié à la pompe à air à simple effet positionnée verticalement tel que le prescrit WATT.

La bielle de commande de la pompe à air actionne également la pompe alimentaire qui peut fonctionner aussi bien en marche à l'air libre qu'en condensation, en utilisant les eaux de purge et les eaux de condensation.

Un purgeur automatique renvoie à la pompe alimentaire les eaux de purge de la conduite et de l'enveloppe de vapeur du cylindre ; cette pompe les refoule ensuite à la chaudière pour en effectuer la récupération calorifique.

Un robinet à soupape à double siège permet de passer instantanément de la marche en condensation à la marche à l'air libre, ou inversement, sans arrêter la machine.

4.2.2.8 Description de la technologie : marche en fonctionnement normal et entretien

La machine à vapeur PIGUET fonctionne à une vitesse de rotation élevée, une lubrification permanente des pièces est alors indispensable. Ainsi, des graisseurs à lunettes à compte-gouttes sont placés sur l'enveloppe pour lubrifier automatiquement le cylindre et les tiroirs ; ces appareils graisseurs sont d'une conception de haute technologie pour l'époque car ils réduisent la dépense de corps gras au minimum nécessaire évitant ainsi les gaspillages. De

même, d'autres graisseurs sont positionnés aux différentes articulations de la machine ; ils peuvent être remplis en toute sécurité pendant que la machine fonctionne.

Selon le catalogue du constructeur, même à une grande vitesse de fonctionnement, la machine à vapeur FIGUET a une dépense de combustible moindre grâce à une meilleure répartition du travail de la vapeur et une diminution des fuites. En effet, FIGUET garantit que, dans le cas où la machine est utilisée afin de mouvoir des outils à travailler le bois, le client n'a pas besoin de brûler de houille : les sciures et copeaux suffisent largement à assurer la consommation en combustible. Voir la partie ci-après sur la vie de la machine FIGUET 40x80 TP dans la scierie. Il est à noter que si le client consomme plus de 1.5 kg de houille par cheval par heure (ou l'équivalent en déchets de bois), FIGUET s'engage à reprendre sa machine et à indemniser le client en conséquence ; cette règle de bonne conduite du fabricant s'applique également à la quantité d'huile de graissage ainsi qu'à la régularité de fonctionnement.

Par ailleurs, dès 1893, FIGUET prévoit une garantie après-vente redoutable : les pièces de ses machines sont totalement interchangeables (à égale machine de même dimension). Ainsi, le client n'a pas besoin d'un atelier de réparation conséquent, il peut de lui-même trouver les pièces de rechange sur d'autres machines FIGUET ou, sur simple courrier, il peut demander à l'entreprise FIGUET de lui fournir la pièce manquante, le délai de livraison étant alors réduit au minimum.

4.3 PLUSIEURS VIES POUR L'EXEMPLAIRE N°135

4.3.1 LES MACHINES A VAPEUR PIGUET AUX BALBUTIEMENTS DE L'ELECTRICITE : MONACO

Une des premières phases de vie de la machine à vapeur étudiée s'est déroulée dans une usine de production électrique. Après avoir décrit l'installation expérimentale en génération électrique mise en place pour l'Exposition Universelle de 1900, il semble nécessaire de contextualiser l'utilisation de l'électricité pour la diffusion de l'énergie électrique au grand public à la fin du 19^{ème} siècle. Les premiers paragraphes de cette partie sont donc dédiés à cette description du contexte historique large dans lequel les événements s'inscrivent. Par la suite, l'étude se recentre sur le contexte localisé dans lequel la machine à vapeur étudiée a été utilisée à MONACO²³⁹.

4.3.1.1 Les progrès de l'éclairage à la fin du 19^{ème} siècle : du gaz à l'électricité²⁴⁰

Dans l'esprit du public, à la fin du 19^{ème} siècle, l'éclairage ne mérite pas, à proprement parler, le nom de technologie mais est plutôt considéré comme une science voire comme un art. Depuis les premières civilisations, chaque époque nous a légué ses lampes, ses flambeaux, ses lustres, souvent façonnés dans les métaux les plus précieux et ornés de multiples cristaux. Mais l'élégance des formes et la richesse des matériaux masquaient bien souvent la fonction principale que ces objets se devaient d'assumer : éclairer.

Si on effectue une analyse fonctionnelle²⁴¹ de ce ST, c'est à la fin du 19^{ème} siècle qu'à la fonction principale éclairer se voient adjoindre deux fonctions secondaires : éclairer individuellement de façon portative et éclairer pour les communs²⁴².

Malgré des précédents en ANGLETERRE, c'est en 1801 que Philippe le BON pose les principes de la fabrication industrielle du gaz. En 1819 la première usine à gaz est construite à PARIS. Le gaz d'éclairage apparaît tout de suite très nettement supérieur aux autres modes d'éclairage, notamment par rapport à l'éclairage à huile bien que la technologie de diffusion de la lumière soit sensiblement la même : un tuyau d'alimentation et un bec (de type *Papillon* pour la majorité) pour le gaz à la place d'une mèche et d'un bec pour les lampes portatives.

De leurs côtés, les lampes individuelles, de type lampes à pétrole introduites vers 1860 en FRANCE remplacent progressivement les quinquets à huiles utilisés depuis des siècles.

Cependant, il est à noter que, quelle que soit la technologie utilisée, l'intensité lumineuse ne dépasse pas les 10 à 12 bougies²⁴³.

²³⁹ Source : [SME 1990]

²⁴⁰ Sources : [HUGHES 1983] [JANET 1930] [LAURAIN 1930] [MONTEIL 1930]

²⁴¹ Voir méthode APTE en partie 3.2.2

²⁴² Terme utilisé dans les sources début du 20^{ème} siècle désignant les lieux publics intérieurs et extérieurs [LAURAIN 1930].

C'est en 1880 qu'EDISON réalise une lampe électrique à incandescence. Son invention présente un haut degré de perfectionnement : le filament (obtenu par la carbonisation d'une fibre de bambou) est enfermé dans une ampoule en verre où le vide a été soigneusement réalisé pour empêcher toute combustion. La dépense de courant atteint les 5.5 Wh mais, grâce à l'amélioration du filament, elle tombe à 3.5 Wh pour arriver à 0.5 Wh en 1884. Ainsi, cette année là est marquée par l'installation d'un éclairage à arc électrique à PARIS sur la place du CARROUSEL, pour le parc des BUTTES-CHAUMONT et pour ses grands boulevards.

Entre 1900 et 1904, la lampe électrique à incandescence marque un progrès décisif lorsque le filament de carbone est remplacé par un filament métallique. La température de fonctionnement peut alors être augmentée rendant ainsi une lumière plus forte et plus blanche pour une consommation identique. Plusieurs types de métaux sont essayés et finalement, ce fut COOLIDGE qui imposa, en 1909, son filament de tungstène avec un pouvoir éclairant 2.75 fois plus élevé que le filament de carbone d'EDISON. S'en suivent de nombreuses améliorations sur le globe de verre, la volonté d'arriver à un vide parfait... Ainsi, la lampe BARDON (figure 54) va longtemps rester en tête avec une consommation de 0.25 Wh et une intensité lumineuse comprise entre 1750 et 3200 bougies.

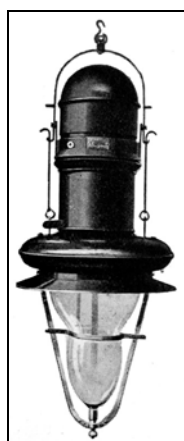


Figure 54 : LAMPE A ARC, SYSTEME BARDON²⁴⁴

²⁴³ Dans un article paru en 1937 pour un numéro spécial de la Revue des Arts et Métiers Graphiques, Louis JOUVET donne quelques éléments permettant d'évaluer les équivalences de puissance entre les différentes technologies d'éclairage. Selon son analyse, 9 bougies équivalent à 10 chandelles et le quinquet d'huile vaut 6 bougies. Le bec à gaz de type papillon équivaut à 15 bougies ; par la suite, le bec à gaz AUER atteint les 120 bougies. En 1937, une ampoule de 150 watts produit l'équivalent de 300 bougies. [JOUVET 1937]

²⁴⁴ Source : [JANET 1930]

4.3.1.2 Les installations en gaz et les prémices de l'électricité à Monaco

Fort des progrès de l'éclairage au gaz comme nous venons de le voir, lors de sa création en 1856, la Société des BAINS de MER²⁴⁵ et du Cercle des Etrangers s'engage à construire une usine à gaz à MONACO. Construite en 1863 au pied du Fort ANTOINE, celle-ci permet d'alimenter un gazomètre raccordé à un premier réseau de canalisations.

Fin du 19^{ème} siècle, l'éclairage à gaz est un mouvement naissant dans les grandes villes de FRANCE. Mais l'utilisation du gaz à MONACO est bien pourtant plus ancienne car, dès 1865, le gaz permet d'illuminer :

- la place du Palais,
- la promenade SAINT-MARTIN,
- le port de MONACO,
- l'avenue d'OSTENDE,
- et la place du casino.

La production est assurée par l'usine de MARCHESSEAUX (figure 55) et est gérée par la SBM. A l'origine, avant de se voir ajouter la production de gaz, l'usine assure la fonction principale de la société : distribuer de l'eau vers le Palais Princier et le Quartier de MONTE-CARLO. Elle est composée de trois pompes à vapeur.

Mais en 1880, afin de faire face à la demande toujours croissante en gaz, une extension de l'usine ainsi que deux gazomètres supplémentaires sont construits. En 1888, la production de gaz atteint 8 000 m³ par jour. Pour résoudre le problème de l'abondance du goudron résultant de la production de gaz, le Docteur GUGLIELMINETTI suggère de répandre ce conglomérat sur les voies routières de MONACO : c'est une des premières utilisations pour le revêtement des routes.



Figure 55 : L'USINE DE MARCHESSEAUX A MONACO EN 1888

²⁴⁵ SBM = Société des Bains de Mer

Pour anticiper la demande en énergie, la SBM tente en 1886 un éclairage électrique du Casino. Le dispositif présente une chaudière, une machine à vapeur et une génératrice de GRAMME à courant continu. Mais la chaudière explose²⁴⁶ et cet accident fut suivi d'un procès. Entraîner une dynamo tournant à une vitesse de l'ordre de 500 à 800 tr/min demande beaucoup de force motrice donc un rendement et une vitesse de rotation élevée pour la machine à vapeur. L'admission en vapeur se doit également d'être dimensionnée en conséquence. Dans les années 1880, les chaudières de type multitubulaire commencent à être diffusées dans les usines²⁴⁷ ; les chaudières à grand volume d'eau (à bouilleurs ou à foyer intérieur) sont encore les plus répandues. Malheureusement, ces chaudières à bouilleurs ne permettent pas un taux de vaporisation élevé du fait d'une faible surface de chauffe. A cette époque, les accidents dus à l'explosion de chaudières à bouilleurs sont donc courants et extrêmement graves.

C'est finalement en 1888 que pour la première fois, l'électricité apparaît à MONACO. On peut supposer qu'au vu des premières expériences menées avec le triptyque chaudière / machine à vapeur / dynamo, il est décidé de ne rien rajouter à l'ensemble des appareils existants de l'usine de MARCHESSEaux à l'exception d'une dynamo électrique. En effet, les fourneaux produisant du gaz avaient déjà dû se voir adjoindre une partie captation de vapeur afin d'alimenter une machine à vapeur ; cette dernière devant servir pour alimenter en énergie mécanique un ou plusieurs ventilateurs pour les fourneaux dans un but d'optimiser le rendement de l'usine à gaz.

Ainsi, dès décembre 1888, les travaux sont entrepris pour installer un éclairage électrique au Casino (pour la salle de spectacle et ses dépendances, les salons du casino, le salon de lecture de l'atrium et la galerie). Le 16 janvier 1889, l'éclairage à arc fonctionne.

En 1890, la Société LOMBARD GERIN propose une concession d'exploitation. Le 15 février 1890, un contrat de service public d'une durée de cinquante ans est signé. Le 15 juillet de la même année la Société Monégasque d'Electricité est créée.

4.3.1.3 Descriptif des installations électriques de Monaco

De par son contrat avec le Prince ALBERT 1^{er}, la SME²⁴⁸ s'était engagée à construire une centrale électrique à MONACO. L'usine de la CHIAPPAÏRA sort de terre en 1892 (figure 56) ; elle comprend quatre groupes de 50 kW mus par une seule chaudière et des machines à vapeur. Il est à noter que par son contrat de concession, la SME doit compenser le dommage occasionné sur l'exploitation du gaz et ce, en le prélevant directement sur ses bénéfices. De la sorte, le prix de vente de l'électricité est fixé à 2 Francs Or le kWh²⁴⁹.

²⁴⁶ En règle générale, c'est l'induction d'un courant très élevé qui entraîne l'explosion de la génératrice et de son installation. En effet, lors de la coupure, une très forte surtension apparaît et, à l'époque, les dispositifs de protection ne sont pas très performants.

²⁴⁷ On notera l'exception des locomotives de chemins de fer suite aux travaux de l'entreprise SEGUIN qui breveta des chaudières multitubulaires pour ce mode de transport [COTTE 1995].

²⁴⁸ SME = Société Monégasque d'Electricité

²⁴⁹ Selon l'INSEE, à cette époque, 1 Franc Or équivaut à 2.79 €.



Figure 56 : L'USINE DE LA CHIAPPAÏRA A MONACO EN 1892

Durant la belle époque, les ventes d'électricité se développent rapidement et le réseau de distribution s'étend. Le terrain de la CHIAPPAÏRA étant limité, la Société obtient la concession d'un terrain sur la plage de Fontvieille. Malgré une implantation difficile en bord de mer, l'usine - dite de FONTVIEILLE - y est construite rapidement (figure 57). Elle est inaugurée le 28 mars 1899 par le Prince ALBERT 1^{er}.



Figure 57 : L'USINE DE FONTVIEILLE A MONACO EN 1899

Selon les propos recueillis par Serge MULLER dont le père Robert MULLER a travaillé pour la SME, la puissance installée est de 600 kW (820 chevaux) et progresse très rapidement pour atteindre 1680 kW (2285 chevaux) à la veille de la première guerre mondiale. L'équipe du service électrique de la SME dépasse 40 personnes et le prix du kWh est abaissé à 1.70 Francs Or (4.74 €).

Lors de la décision de construction de l'usine de FONTVIEILLE en 1898, une commande de quatre machines à vapeur est passée à la société Lyonnaise FIGUET alors spécialisée dans la fabrication de machines mécaniques pour l'industrie. Les quatre machines sont telles que décrites dans le chapitre ci avant sur la technologie DUVERGIER-FIGUET. Les caractéristiques sont les suivantes :

- monocylindriques,
- mode de distribution par tiroirs plans,
- à condenseur pour récupération de la vapeur,
- avec régulateur à boule et à détente variable
- diamètre du cylindre à vapeur : 400 mm,
- course du piston : 800 mm,
- diamètre du volant : 4 mètres,
- poids du volant : 6 tonnes,
- longueur totale de la machine : 7 mètres,
- vitesse de rotation en sortie : 115 tr/min maximum,
- pression d'admission : de 6.5 kg à 7.5 kg maximum (soit de 6.5 à 7.5 bars),
- température de l'eau à l'injection : 14 °C,
- puissance maximum : 206 chevaux (soit environ 151 kW) en tenant compte du rendement et des charges absorbées par le condenseur.

Le diamètre du cylindre étant de 40 cm, la course du piston de 80 cm et fonctionnant à Tiroirs-Plans, ces machines sont dénommées : 40x80 T.P.

La figure 58 est une copie du plan original daté du 5 décembre 1898²⁵⁰. Cet exemplaire aurait été donné par FIGUET & CIE à M. BONNICHON²⁵¹. L'annexe 18 est une copie A4 de ce même plan.

²⁵⁰ Source : archives du CREUSOT-MONTCEAU, Plan d'implantation : *Ste Anonyme de Distribution d'Eau, de Force et de Lumière - Usine de MONACO / Massif en béton de ciment portant les paliers extérieurs - Installation de 4 machines de 0.40*, copie du plan original du 5 décembre 1898, MOULINS, 12 février 1917

²⁵¹ Voir partie ci-après : Une deuxième vie pour l'exemplaire n°135.

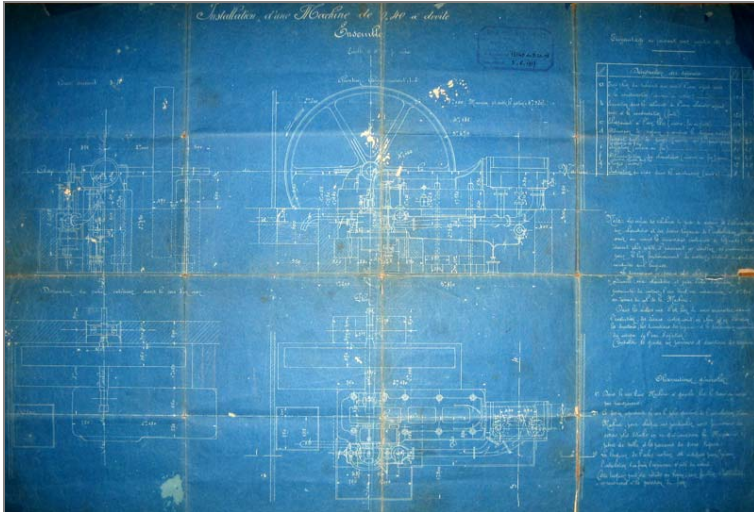


Figure 58 : MACHINE FIGUET 40x80 T.P. : COPIE DU PLAN ORIGINAL DE 1898

Les quatre appareils fonctionnent en parallèle. Seules deux machines sont à pleine charge, les autres étant en maintenance (réparation) ou en secours (réserve). En effet, FIGUET avait prévu cette utilisation : deux machines monocylindriques accouplées par l'arbre du volant ont un couple moteur plus uniforme que celui d'une machine *compound*. Par ailleurs, dans le cas d'un accouplement en tandem d'une machine *compound*, les gros efforts sont mal répartis sur l'arbre moteur, ce qui n'est pas le cas avec des machines monocylindriques associées en tandem.

Le mode de fonctionnement dans l'usine de FONTVIEILLE est illustré par le schéma de la figure 59.

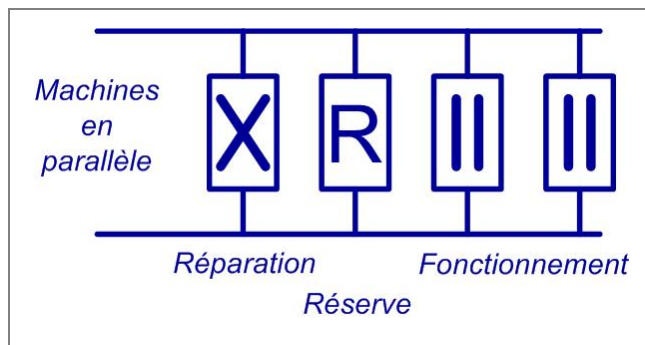


Figure 59 : SCHEMA D'IMPLANTATION DES MACHINES DANS L'USINE DE FONTVIEILLE EN 1899

Des massifs en béton d'une hauteur de 2.40 mètres et d'une profondeur de 1.50 mètres sont construits afin de servir de fosse pour les volants et de soutènement pour les paliers extérieurs. Quant aux génératrices électriques, aucune archive ne nous permet d'émettre une quelconque hypothèse sur leurs marques, leur nombre... les seules informations retrouvées qui ne sont pas directement liées aux machines à vapeur concernent la chaudière.

Comme spécifié par FIGUET dans ses préconisations d'installation, la chaudière est placée au dessous du sol de la machine (à environ 6 mètres). Cette chaudière est de type inexplosible à circulation d'eau telle que décrit sur la figure 60.

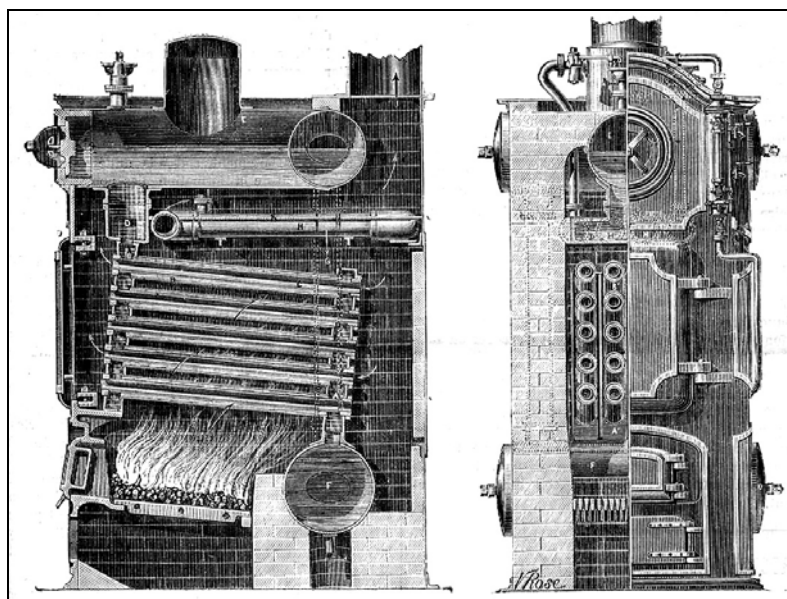


Figure 60 : SCHEMA D'UNE CHAUDIERE DE TYPE ROSER EN 1886

La chaudière n°50 construite en 1899 à MONACO est basée sur la technologie développée par ROSER en 1886²⁵². Elle est enfermée dans une enveloppe en briques formant un parallélépipède régulier avec face avant et fond en tôle. Des portes positionnées en façade et de côté permettent d'accéder au faisceau tubulaire afin d'en nettoyer les boues s'accumulant régulièrement. La surface totale de chauffe est de 265 m². La chaudière est contenue dans un volume de 5.68 mètres de hauteur pour 6.20 mètres de profondeur et de 2.73 mètres de côté.

4.3.1.4 Evolution de la production de gaz et d'électricité à la SBE

C'est en premier lieu la Société des Tramways qui, renonçant à la traction hippomobile, équipe en 1898 deux lignes à l'électricité²⁵³ : MONACO-GARE à MONACO-VILLE et le Casino à SAINT-ROMAN (figure 61). Dans l'usine de FONTVIEILLE, une génératrice à courant continu est complètement dédiée à cette exploitation. Cependant, la réelle efficacité de l'électricité n'est pas démontrée et les chevaux réapparaissent en 1902.

²⁵² Source : [ROSER 1886]

²⁵³ Rappelons que les premiers tramways apparaissent en 1832 reliant NEW YORK à HARLEM puis en 1834 à la NOUVELLE ORLEANS. En FRANCE, la première ligne expérimentale de 2 km basée sur une technologie américaine est installée sur le COURS DE LA REINE pour l'Exposition Universelle de 1853. Mais réellement, la première ville française qui s'équipera d'un tramway électrique est CLERMONT-FERRAND en 1890.



Figure 61 : L'ÉCLAIRAGE AU GAZ, LE TRAMWAY ET LES LIGNES ÉLECTRIQUES AÉRIENNES SUR L'AVENUE D'ORLÉANS À MONACO EN 1898

La première vague de l'équipement industriel de la Principauté, proposant gaz et/ou électricité, commence avec les usines alimentaires :

- chocolaterie,
- pâtes alimentaires,
- brasserie,
- stockage frigorifique.

La SME qui détenait alors le marché complet sur MONACO est mise en concurrence en 1900 avec l'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE du LITTORAL MÉDITERRANÉEN. Au final, ils s'accordent pour relier leurs deux réseaux avec, pour particularité, une tentative de normalisation du réseau de la SME à celui de la EELM²⁵⁴ alors en courant triphasé 9800 Volts à 25 périodes²⁵⁵. En effet, depuis sa création, la SME n'a fait qu'augmenter les possibilités offertes à ses clients ; elle produit ainsi :

- du courant continu,
- du courant alternatif à 42 Hz,
- et du courant alternatif raccordé au réseau niçois (EELM) à 25 Hz.

Mais malgré ces efforts pour vulgariser l'électricité, la distribution du gaz, toujours assurée par la SBM, connaît un développement sans précédent. Sa première utilisation est l'éclairage public ; puis, c'est le début des cuisinières à gaz. L'usine à gaz de MARCHESSEAUX est agrandie et perfectionnée ; elle atteint une production de 17 000 m³ de gaz par jour à la veille de la première guerre mondiale.

C'est donc sans réserve de production que l'usine à gaz de MARCHESSEAUX et la centrale électrique de FONTVIEILLE abordent la guerre de 1914-1918. Les vides créés par les

²⁵⁴ EELM = ENERGIE ÉLECTRIQUE du LITTORAL MÉDITERRANÉEN

mobilisations, les difficultés d'approvisionnement en charbon et en pièces de rechange engendrent une série de défaillances techniques et de plans de restrictions

Dès le début de la guerre, une série d'événements peu courants jusqu'alors vont apparaître : programme de révision d'équipements, révision des tarifs, discussions de financement, contestations avec les abonnés importants, amélioration du service... En effet, à l'aube du 20^{ème} siècle, les questions essentielles apportées par la notion de capitalisme se confirment.

De plus, à cause des émanations de fumée, le Prince de MONACO suggère à la SME de changer ces machines polluantes pour la baie de MONACO et dont les cheminées ne font qu'appauvrir le paysage. En 1917, l'usine de FONTVIEILLE est rénovée avec des turbo-alternateurs²⁵⁶ plus efficaces que les machines à vapeur coûteuses en entretien et les chaudières gourmandes en matière première. Par la même, début du 20^{ème} siècle, de très grands progrès sont réalisés sur le rendement des chaufferies en marche industrielle : généralisation des grilles mécaniques, du soufflage, de l'épuration, des appareils de contrôle,... Grâce à ces multiples accessoires permettant une meilleure conduite du feu, la chaudière ROSER alors en place est remplacée par une chaudière américaine dite *économique* de la société ERIE CITY.

La figure 62 retrace l'évolution de la puissance électrique de pointe délivrée par la SME. Les deux paliers de 1890-1900 et 1910-1920 justifient les changements de technologie mis en place : construction d'une usine électrique dédiée pour le premier palier et changement de machines de charges pour le deuxième palier.

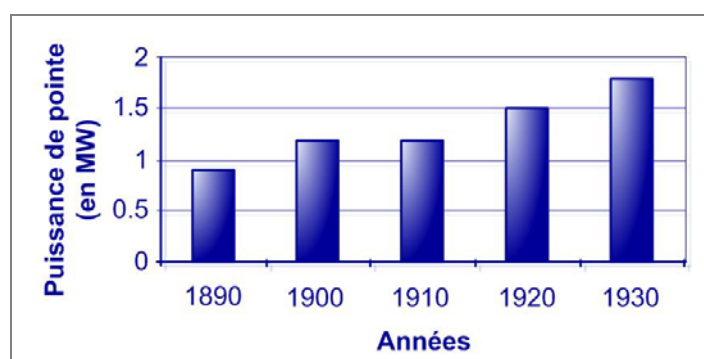


Figure 62 : VARIATION DE LA PUISSANCE ELECTRIQUE DE POINTE A MONACO DE 1890 A 1930

4.3.2 UNE 2^{EME} VIE POUR L'EXEMPLAIRE N°135 DANS LA SCIERIE BONNICHON A MOULINS (03)

C'est au printemps 1917 qu'une des quatre machines de l'usine de FONTVIEILLE de MONACO est rachetée par M. Gilbert BONNICHON pour alimenter sa scierie mécanique de MOULINS dans l'ALLIER (03) : il s'agit de l'exemplaire n°135. Seuls deux courriers

²⁵⁵ De nos jours, on préfère l'unité *Hertz* à l'appellation *périodes*.

²⁵⁶ On notera que MONACO n'est pas avancé sur cette évolution de technologie. En effet, la COMPAGNIE PARISIENNE DE DISTRIBUTION D'ELECTRICITE équipe, dès 1907, son usine de SAINT-OUEN avec des turbo-alternateurs de 15 000 kW. [MONTEIL 1930]

d'échange²⁵⁷ entre PIGUET et BONNICHON nous permettent de vérifier que la machine a séjourné 13 ans dans cette scierie à MOULINS et nous informe ainsi que PIGUET assure la négoce de ses machines de seconde main. Ainsi, dans le courrier échangé entre les établissements PIGUET de LYON et M. BONNICHON en date du 5 juin 1917, il s'avère que la scierie souhaite y apporter des modifications conséquentes que nous allons développer par la suite.

4.3.2.1 Ambiguïté d'appartenance pour cette société monégasque ?

Dans son courrier de réponse datant de juin 1917, la société PIGUET confirme à M. BONNICHON que la machine qu'il vient d'acheter a bien été construite en 1898 pour le compte de la Société de Distribution d'Eau, de Lumières et de Force de MONACO. La première mise en route date de 1899.

SME, SBM, SDELF²⁵⁸... ? L'ambiguïté sur l'appellation exacte de la société monégasque ayant passée la commande des quatre machines à vapeur aux établissements PIGUET permet de confirmer l'hypothèse selon laquelle en 1890 malgré l'accord cadre fixé avec le Prince Albert, la SBM avait d'autres ambitions : détenir le monopole de la production d'énergie condamnant ainsi toutes les petites usines locales. C'est-à-dire : préparer le 20^{ème} siècle en étant leader sur le marché de la production, de la distribution et de la gestion intégrale des ressources issues des nouvelles technologies. Mais après la mise en concurrence avec la EELM, et malgré une croissance économique forte, l'après première guerre mondiale montre que la SBM a des difficultés à gérer seule l'intégralité des nouveaux marchés. S'il était possible de faire face à une demande croissante rectiligne : innover dans le cadre d'une croissance exponentielle est beaucoup plus difficile, l'histoire nous révèle que la SBM et ses filiales furent totalement morcelées durant l'entre deux guerres jusqu'à ce que la EELM alors en partie nationalisée en reprenne l'exploitation en 1932. Et c'est en 1936 que naît les prémices de la future SMEG : la Société Monégasque de l'Electricité et du Gaz.

4.3.2.2 Remontage de l'exemplaire n°135 à Moulins

De par le non suivi de l'acronyme de la société monégasque, les établissements PIGUET nous montrent le peu d'échanges que ceux-ci ont eu quant à l'entretien et la maintenance de la machine à vapeur n°135 et de ses jumelles : probablement grâce à un fonctionnement normal et très performant tel que voulu par le constructeur (voir chapitre ci-avant).

²⁵⁷ Sources : archives du CREUSOT-MONTCEAU, suivi des correspondances : PIGUET & CIE à M. BONNICHON, MOULINS, 5 juin 1917 / DUJARDIN & CIE à M. BONNICHON, MOULINS, 8 mars 1929

²⁵⁸ SDELF = Société de Distribution d'Eau, de Lumières et de Force

Ce manque de suivi nous est confirmé par ce courrier en date du 5 juin 1917²⁵⁹ par lequel les établissements FIGUET envoient, à titre gracieux, le plan original *type* pour le remontage d'une machine à droite²⁶⁰, monocylindrique, à tiroirs plans²⁶¹.

*Par le présent courrier, sous pli séparé, nous vous adressons l'exemplaire d'un plan général N°15410 représentant l'installation ordinaire d'une machine de mêmes dimensions que celle que vous avez achetée.
Tous les renseignements ci-dessus vous sont évidemment donnés sans garantie de notre part.*

Il est en effet important de noter que ces informations sont données sans garantie : la comparaison entre la machine réelle et le plan de FIGUET fait apparaître que le plan ne correspond pas à la technologie de la machine à vapeur n°135 pour plusieurs raisons ; les plus remarquables étant :

- le système de condensation n'est pas placé dessous la machine comme le spécifie le plan,
- le diamètre du volant est bien de 4 mètres mais celui-ci comporte 6 rayons sur le plan et 8 dans la réalité,
- ...

Afin d'assurer le remontage et la mise en route de la machine, FIGUET propose de mettre à disposition un de ses chefs monteurs. Aucune autre trace écrite ne témoigne si M. BONNICHON a accepté la proposition. Cependant, de façon générale, au vu des réglages minutieux à effectuer sur les machines à vapeur, il était de coutume pour l'époque d'accepter de telles propositions dans le cas d'un remontage intégral et ce, malgré les conditions de mise à disposition imposées par FIGUET :

- le transport, l'hébergement et la restauration sont à la charge du contractant,
- l'ouvrier est considéré comme faisant partie du personnel du contractant et travaille sous sa responsabilité,
- l'intégralité des outils, engins et aides humaines est à fournir par le contractant.

²⁵⁹ Source : archives du CREUSOT-MONTCEAU, suivi des correspondances : FIGUET & CIE à M. BONNICHON, MOULINS, 5 juin 1917

²⁶⁰ La machine à vapeur est dite à droite car, en se positionnant depuis le volant, la boîte à tiroirs est placée à droite du cylindre.

²⁶¹ Sources : archives du CREUSOT-MONTCEAU : Plan d'implantation, archives du CREUSOT-MONTCEAU : Ste Anonyme de Distribution d'Eau, de Force et de Lumière - Usine de MONACO / Massif en béton de ciment portant les paliers extérieurs - Installation de 4 machines de 0.40, copie du plan original du 5 décembre 1898, MOULINS, 12 février 1917 / Plan d'ensemble, archives du CREUSOT-MONTCEAU : *Installation d'une machine à vapeur de 0.40 à droite*, copie du plan original du 8 octobre 1898, MOULINS, 5 juin 1917.

4.3.2.3 Hypothèses sur les modifications de puissances

Par ce même courrier d'échange du 5 juin 1917 entre les Etablissements PIGUET et M. BONNICHON, il est confirmé que l'exemplaire n°135 fait partie d'une série mais dont le dimensionnement a été établi pour fonctionner à une pression d'admission supérieure à celle garantie pour une machine neuve utilisée seule.

Comme prévu par la technologie DUVERGIER, il est possible de changer la pression de vapeur à l'admission²⁶² sans en altérer le rendement économique ; ce qui n'est pas le cas avec les autres technologies dont le rendement économique varie de façon exponentielle avec la pression de la vapeur admise.

En effet, dans les machines *compound*, les cylindres sont calculés les uns par rapport aux autres, pour une pression et une admission bien déterminées. Toute modification apportée à la pression ou à l'admission de base rompt cet équilibre.

Le constructeur propose plusieurs possibilités d'utilisation. Mais comme nous allons le voir ci-après, quelles que soient les modifications apportées, le rendement n'en est pas pour autant augmenté de façon significative mais la sécurité, elle, est fortement dégradée du fait d'une utilisation non conforme. En effet :

- augmenter la vitesse de 115 tr/min à 125 tr/min ne fait qu'accroître le rendement de puissance de 7%,
- augmenter la pression d'admission de 6,5 kg à 7,5 kg (6.5 bars à 7.5 bars environ) ne fait qu'accroître la puissance de 15%.

Cependant, l'hypothèse d'une demande de modifications est justifiée. La machine devant fonctionner dans une scierie, celle-ci est sûrement appelée à être utilisée directement comme génératrice de force motrice ; PIGUET avait envisagé cette solution. Ainsi, la puissance délivrée prévue lors de sa conception en 1898 ne suffit pas et des modifications ont dues être apportée sur le régulateur. Car, comme vu précédemment dans la description de la technologie DUVERGIER-PIGUET, le dimensionnement de cet organe permet de modifier directement la puissance délivrée par la machine à vapeur. Cependant, aucun document ne peut attester cette hypothèse.

M. BONNICHON gardera l'exemplaire n°135 jusqu'en 1930 soit une durée de 13 ans. Pendant cette période, de par le peu d'archives retrouvées sur la scierie, il n'est pas possible de confirmer l'hypothèse selon laquelle la machine à vapeur PIGUET a fonctionné à une pression optimale ou maximale. Cependant, comme nous allons le voir dans sa dernière phase de vie en utilisation, au vu du nombre de réparations et de changements de pièces effectués, il semblerait que cette machine n'est pas été utilisée en marche normale durant la période 1917-1930.

²⁶² A la fin du 19^{ème} – début du 20^{ème} siècle, on utilise le terme *poids de vapeur* pour mentionner la pression. Durant cette période, 1 atmosphère équivaut à 1 kg / cm².

4.3.3 UNE ULTIME EXPLOITATION DANS LA SCIERIE BRUNEL A LA ROCHE-EN-BRENIL (21)

4.3.3.1 Des travaux préliminaires pour accueillir la machine dans la scierie : maçonnerie et chaudière

En septembre 1930, Emile BRUNEL, alors responsable de la Scierie BRUNEL de La ROCHE-EN-BRENIL (COTE D'OR), rachète la machine à vapeur PIGUET 40x80 TP n°135 de M. BONNICHON. M. BRUNEL fait également l'acquisition d'une chaudière tubulaire, élément indispensable au bon fonctionnement de l'ensemble de puissance.

Devant agrandir sa scierie, il fait construire deux nouveaux bâtiments par l'entreprise LA CONSTRUCTION METALLIQUE HAUT-MARNAISE basée à St DIZIER. Les deux hangars sont extraits du catalogue de la société ; la toiture est en tôle ondulée galvanisée²⁶³ :

- Hangar de Type A pour la machine à vapeur d'une superficie de 82.65 m² ; cette salle des machines sert également de local technique pour les installations électriques,
- Hangar de Type B pour la chaudière d'une superficie de 123.5 m².

La figure 63 est une photographie prise en 1977 montrant que le site industriel n'a pas subi de transformation depuis 47 ans : au centre, le local de la machine à vapeur (Hangar de Type A) et à droite le local de la chaudière (Hangar de Type B).



Figure 63 : 1977 – LES BATIMENTS DE LA SCIERIE DE LA ROCHE-EN-BRENIL SANS MODIFICATION DEPUIS 1930

La chaudière n°4336 est mise en route le 24 novembre 1930 par l'Association Lyonnaise des Propriétaires d'Appareils à Vapeur²⁶⁴ et déclarée à la préfecture par M. BRUNEL 14 jours

²⁶³ Source : archives du CREUSOT-MONTCEAU : Plan d'architecture *Projet d'installation d'une machine à vapeur et d'une chaudière*, BRUNEL, la ROCHE-EN-BRENIL, n.d.²⁶³ (~1930)

²⁶⁴ Source : archives du CREUSOT-MONTCEAU : Rapport de contrôles de la chaudière de l'ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 24 novembre 1930

plus tard. Il s'agit d'une chaudière anti-explosion : en effet, à cette époque, les normes de sécurité sont très exigeantes afin de garantir des conditions maximales de non accidents :

- les chaudières sont testées à 5 fois la pression de fonctionnement usuel,
- et les pistons de la machine à vapeur à trois fois leur marche normale.

Cette chaudière hors feu mesure 4.5 mètres de profondeur, 2.40 mètres de hauteur et 1.55 mètres de côté. Elle présente un simple corps tubulaire et fonctionne à une pression de 8 kg. Sa surface de chauffe réelle est de 122 m² pour une surface de chauffe théorique de 125 m². Un essai de tenue à 10 kg est également effectué avec succès et la prochaine révision est prévue 10 ans après.

Cependant, M. BRUNEL la fait contrôler régulièrement jusqu'en 1946 ; date à laquelle il la change : voir partie ci-après sur l'augmentation de la force motrice de la scierie.

Les inspections ont lieu tous les deux ans à partir de 1933 avec des contre-visites en 1932 et 1939 suite à des défauts devant être réparés. Par ailleurs, il est à noter que durant la seconde guerre mondiale, les visites de la chaudière par l'Association Lyonnaise des Propriétaires d'appareils à Vapeur ont tout de même lieu : contrôles en février 1943 et février 1945.

4.3.3.2 Un acteur garant de la réussite de la scierie Brunel : l'APAVE²⁶⁵

Outre les sources historiques de type courrier d'échange entre BRUNEL et PIGUET, il existe peu de traces sur l'entretien et la maintenance du système chaudière / machine à vapeur / machines électriques installé dans la scierie. Cependant, une source essentielle nous donne les éléments nécessaires pour comprendre les installations : les comptes-rendus et les factures de l'APAVE. Il s'agit d'un organisme national ayant pour objectif le contrôle et la vérification des installations, infrastructures et outils de mesures industriels : c'est l'Association des Propriétaires d'Appareils à Vapeur et Electriques.

A l'origine, en 1867, la première Association d'usagers chargée d'assurer la sécurité des appareils à vapeur est créée par les industriels de MULHOUSE. Au niveau national, il est question de plusieurs bureaux locaux indépendants les uns des autres. Ainsi, en 1876, il est créé dans la région lyonnaise une association similaire ayant pour intitulé : Association Lyonnaise des Propriétaires d'Appareils à Vapeur ; c'est une association à but non lucratif qui est reconnue d'utilité publique depuis mai 1886. Le rayon d'action de l'Association Lyonnaise s'étend à plus de 20 départements : de la SAVOIE à la HAUTE-LOIRE en passant par le PUY-DE-DOME et la COTE D'OR. Elle est composée de neuf membres permanents.

²⁶⁵ Sources : archives du CREUSOT-MONTCEAU, pièces comptables : ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 1 octobre 1930, 1 octobre 1932, 10 novembre 1937 / ALPAV, Réglementation des installations électriques par le ministère du travail, n.d. (~1937) / ALPAV, Nouveaux tarifs en vigueur en 1945, 1 février 1945 / ALPAV, *Rapport de l'exercice de 1947*, AG du 27 février 1948 / ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, exercice de 1948, exercice de 1949

Durant toute la durée de vie de la machine à vapeur n°135 à La ROCHE-EN-BRENIL, l'APAVE lyonnaise réalise de multiples contrôles de la chaudière et des installations électriques de la scierie BRUNEL. Garant du bon fonctionnement des infrastructures de la scierie, elle possède deux services :

- un service vapeur,
- un service électrique.

Le service vapeur a pour but de prévenir des accidents et des explosions d'appareils à vapeur et de promouvoir la réalisation d'économies dans la production et l'emploi de la vapeur. Ainsi, depuis 1927, l'association est agréée pour effectuer les visites et les épreuves réglementaires d'appareils à vapeur à la place de l'ADMINISTRATION DES MINES.

Par ses contrôles, le service électrique a pour but d'éviter les risques graves d'incendie et les accidents de personne. Ainsi, il informe et assure un suivi de la mise aux normes électriques des installations industrielles en conformité avec la réglementation.

Les industriels adhérant à l'association s'assurent ainsi d'un suivi régulier de leurs infrastructures électriques et de vapeur. De plus, en cas d'accident, l'association se portera garante en faveur de l'industriel ; d'autres avantages sont accordés comme la dispense d'épreuves sur les chaudières, des cours de formation et des conseils sur l'utilisation et l'entretien des machines...

Cependant, il est à noter que l'adhésion à l'association nécessite une cotisation dont le coût n'est pas négligeable et dont la croissance annuelle est importante (figure 64).

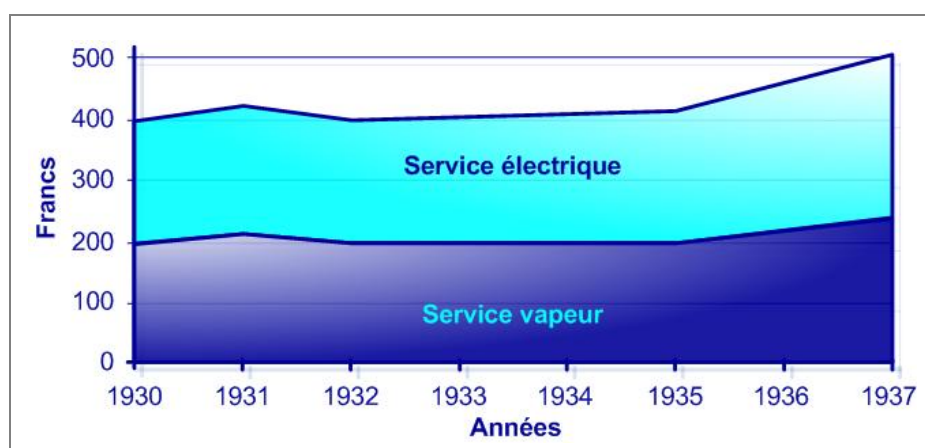


Figure 64 : EVOLUTION DU CUMUL DES COTISATIONS A L'ASSOCIATION LYONNAISE DES PROPRIETAIRES D'APPAREILS A VAPEUR

4.3.3.3 Installation, modification de puissance et mise en route de la machine n°135

Tout comme M. BONNICHON, M. BRUNEL fait appel à TOSI-DUJARDIN²⁶⁶ pour lui fournir un chef monteur. Début octobre 1930, un chef monteur se rend à MOULINS pour assurer le démontage de la machine FIGUET n°135 et son remontage à La ROCHE-EN-BRENIL.

Fin novembre 1930, la machine à vapeur est assemblée, réglée et prête à être utilisée. Mais, afin de faire fonctionner l'ensemble de ses appareils électriques d'une puissance totale de 11.2 chevaux (8.3 kW), la machine à vapeur étant dimensionnée pour fournir 200 chevaux, BRUNEL doit revoir le dimensionnement des éléments de régulation. En réduisant l'admission (< 5%), ceci lui permet de consommer un minimum de vapeur ; ainsi, pour une pression de 7.5 kg effectifs à 115 tr/min, sa machine lui délivre entre 70 et 80 chevaux. Cependant, avec une puissance aussi faible pour une vitesse de rotation aussi élevée, les pièces vont s'user rapidement. TOSI-DUJARDIN lui propose alors de changer la poulie du régulateur : la vitesse est alors abaissée à 80 tr/min pour obtenir une puissance disponible de 80 chevaux (avec condenseur en fonctionnement). Commande passée, le délai de fabrication de la poulie est de un mois.

De plus, après déjà 31 ans de fonctionnement, la machine n'est malheureusement pas en très bon état. Ainsi, l'enveloppe de cylindre doit être changée : le registre de cylindre complet avec les presses étoupes, les tiges et écrous de serrage...

Début de l'année 1931, la machine à vapeur peut enfin redémarrer.

4.3.3.4 Les installations en force motrice et force électrique de la scierie Brunel²⁶⁷

Comme vu précédemment la puissance disponible est de 80 chevaux. Une partie est utilisée directement par les machines mécaniques de la scierie sous la forme de force motrice. L'autre partie entraîne les génératrices électriques.

La figure 65 est une photographie prise en 1977 montrant, en haut, la courroie venant du volant et s'engrainant sur un axe muni de deux poulies (c'est l'arbre de puissance). La poulie de droite est directement reliée aux appareils mécaniques pour utiliser la force motrice. La figure 66 est une photographie comparative prise en 2007 ; l'arbre de puissance est encore en place et il est possible de distinguer plusieurs étages venant valider les descriptions ci-après :

²⁶⁶ TOSI-DUJARDIN, anciennement FIGUET & CIE

²⁶⁷ Sources : archives du CREUSOT-MONTCEAU : Rapports de contrôles de l'ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 24 novembre 1930, 27 avril 1932, 6 octobre 1932, 5 octobre 1933, 4 juin 1935, 6 décembre 1935, 29 décembre 1937, 4 janvier 1938, 26 juin 1939, 22 mai 1939, 17-26 février 1943, 26 février 1945, 15 avril 1946

- Au premier plan :
 - La poulie de l'alternateur,
 - La poulie pour une tronçonneuse mécanique,
- Au dernier plan :
 - Une poulie pour un autre appareil mécanique,
 - La poulie d'engrainement de la machine à vapeur,
 - La poulie de la dynamo.

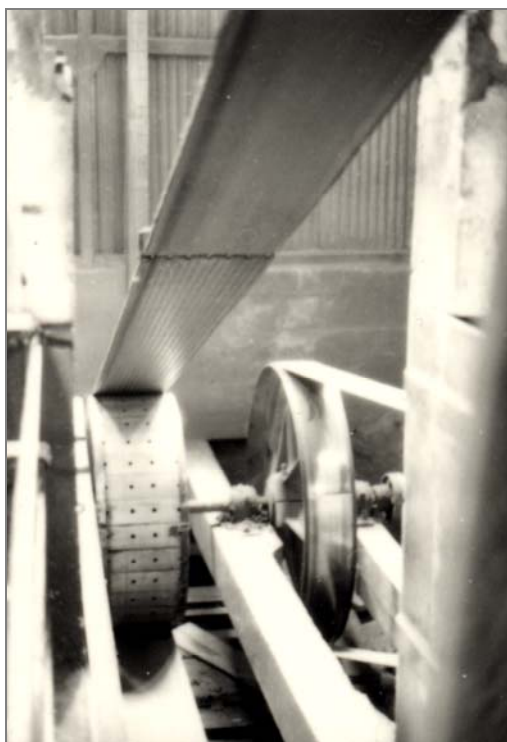


Figure 65 : 1977 – SCIERIE DE LA ROCHE-EN-BRENIL : COUPLAGE DU VOLANT D'INERTIE ET DE L'AXE DE DISTRIBUTION DE FORCE MOTRICE



Figure 66 : 2007 – SCIERIE DE LA ROCHE-EN-BRENIL : L'ARBRE PRINCIPAL DE PUISSANCE

La puissance électrique est générée grâce à une dynamo de GRAMME. Cette dynamo tourne à la vitesse de 1440 tr/min, elle fournit une intensité de 85 A sous une tension continue de 115 V. L'électricité utilisée par les appareils d'usinages de la scierie représente 10.2 chevaux auxquels il faut ajouter une pompe pour le puits de la maison ; soit un total de 11.28 chevaux (8.3 kW) pour une puissance disponible de 13.29 chevaux (9.7 kW²⁶⁸). La figure 67 montre la répartition de la charge des appareils électriques lors de la première année de fonctionnement de la machine à la date du 20 octobre 1931.

²⁶⁸ $P = U.I = 115 \times 85 = 9.775 \text{ kW}$

Machine	Constructeur	Puissance	Vitesse
Tronçonneuse	Patay	2 chevaux	1450 tr/min
Atelier d'affûtage	CGEN	2.25 chevaux	1610 tr/min
Tronçonneuse	Thomson	4 chevaux	650 tr/min
Tronçonneuse	Dolmar	2 chevaux	2800 tr/min
Pompe du puits pour la maison d'habitation	-	1 cheval	2800 tr/min

Figure 67 : 1931 - REPARTITION DES APPAREILS ELECTRIQUES DE LA SCIERIE BRUNEL

Les 1.4 kW restant chargent une batterie de 55 V composée de 22 éléments qui permet d'alimenter le réseau d'éclairage de la maison particulière et quelques lampes de secours dans l'usine. La tension d'utilisation des lampes en 1931 est de 44 V.

En 1934, M. BRUNEL remplace la dynamo de GRAMME par une nouvelle machine de charge de plus grosse capacité. Elle tourne moins vite (900 tr/min) et délivre toujours du 115 V continu mais double sa puissance délivrée en passant de 85 A à 175 A. Ainsi, la production d'énergie électrique en courant continu de la scierie est de 27.37 chevaux²⁶⁹. La force motrice délivrée par la machine à vapeur PIGUET étant de 80 chevaux, il reste un peu plus de 50 chevaux non utilisés. Il est installé un alternateur LANGRAND fournissant du 220 V alternatif en triphasé à 50 Hz. Sa puissance est de 50 KVA ; avec un Cosinus Phi de 0.8, on obtient une puissance de 40 kW, soit 54.4 chevaux. Toute la puissance de la machine à vapeur est enfin exploitée pour générer de l'électricité et laisse ainsi de plus grandes possibilités pour une augmentation du nombre d'appareils électriques dans la scierie dans un futur proche.

Ainsi, afin de profiter de l'énergie électrique disponible en courant alternatif, un pont roulant de grande capacité de levage est édifié ; à cette époque, il est très rare de posséder un pont roulant dans une scierie et c'est sûrement une des raisons pour laquelle M. BRUNEL obtient de nombreuses commandes de bois de grandes tailles dont entre autre les fournitures en bois pour le chemin de fer (voir partie ci-après sur l'historique de la scierie BRUNEL). Le pont est mu par trois moteurs SACM²⁷⁰ cumulant une puissance de 17.5 chevaux (12.88 kW). Celui-ci est encore présent sur le site actuel de la scierie (figures 68 et 69).

²⁶⁹ $P(\text{ch}) = U \cdot I / 0.735 \text{ (W/ch)} = 115 \times 175 / 0.735 = 27.37 \text{ ch}$

²⁷⁰ SACM = Société Alsacienne de Construction Mécanique



Figure 68 : 2007 – SCIERIE DE LA ROCHE-EN-BRENIL : ANCIENNE CHEMINEE ET PONT



Figure 69 : 2007 – SCIERIE DE LA ROCHE-EN-BRENIL : PONT ROULANT ET ANCIENS BATIMENTS DE LA SCIERIE

La capacité maximale de l'alternateur n'étant pas atteinte, une grande scie vient s'ajouter en 1937 aux équipements de la scierie : soit 24 chevaux supplémentaires (17.6 kW).

Le graphique de la figure 70 montre les évolutions de la puissance consommée par rapport à la capacité installée en énergie électrique alternative de la scierie BRUNEL de LA ROCHE-EN-BRENIL sur la période la plus caractéristique (1934-1938).

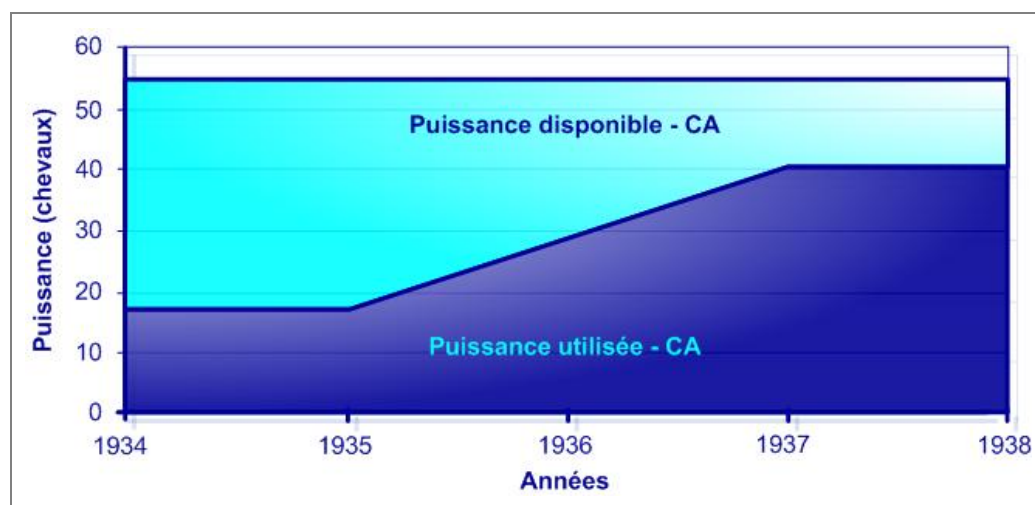


Figure 70 : EVOLUTION DE LA PUISSANCE EN COURANT ALTERNATIF DISPONIBLE ET UTILISEE DE 1934 A 1938

En ce qui concerne l'énergie en courant continu, de nouveaux outils sont également achetés ou remplacés par de plus puissants ; la puissance utilisée est alors de 14.75 chevaux (10.8 kW) en moyenne.

La tension de la batterie est progressivement augmentée de 55 V à 80 V puis atteint 120 V en 1937. Elle est en réalité décomposée en deux batteries identiques de 30 éléments chacune et sont chargées par alternance. En effet, la dynamo ne pouvant fournir que du 110 V, il aurait fallu une dynamo de taille plus grosse pour charger la totalité des batteries ou bien, tel que c'est le cas, la solution consiste à effectuer la charge en deux fois. Celle-ci

permet toujours d'éclairer à l'aide d'ampoules 110 V la maison d'habitation mais elle s'est vue progressivement ajouter d'autres éclairages pour l'intérieur et l'extérieur de la scierie.

Le graphique de la figure 71 montre les évolutions de la puissance consommée par rapport à la capacité installée en énergie électrique à courant continu de la scierie BRUNEL de LA ROCHE-EN-BRENIL sur la période la plus caractéristique (1931-1938).

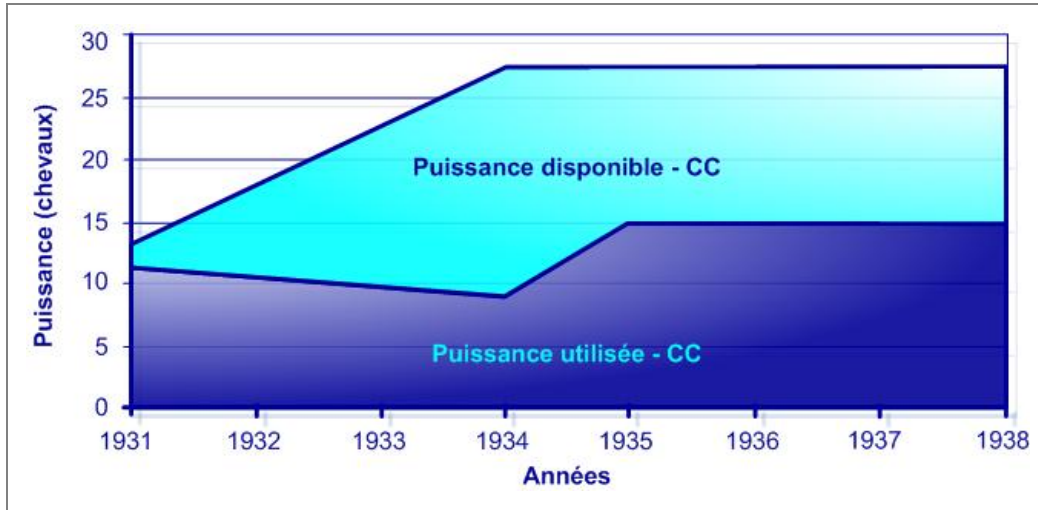


Figure 71 : ÉVOLUTION DE LA PUISSANCE EN COURANT CONTINU DISPONIBLE ET UTILISÉE DE 1931 A 1938

La figure 72 compare l'installation électrique de la scierie de La ROCHE-EN-BRENIL de 1931 avec celle de 1937 afin de montrer son évolution. Notons qu'aucune archive supplémentaire ni les vestiges du site industriel ne nous permettent d'effectuer un tel schéma à la fin de son exploitation. On notera ainsi qu'en 1937, la dynamo fonctionne à plein régime ; ce qui n'est pas le cas du réseau alternatif de la scierie qui n'exploite pas toute la puissance de l'alternateur.

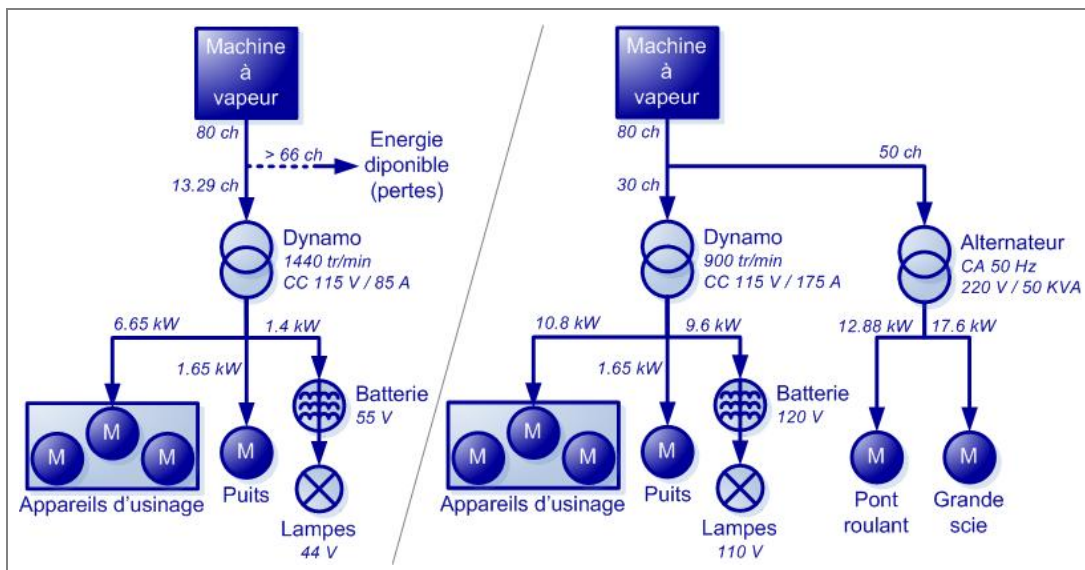


Figure 72 : ÉVOLUTION DE L'INSTALLATION ÉLECTRIQUE DE LA ROCHE-EN-BRENIL : 1931 (A GAUCHE) ET 1937 (A DROITE)

4.3.3.5 Une tentative d'augmentation de la force motrice pour la scierie : une potentielle petite sœur ?

En avril 1946, M. BRUNEL fait installer une chaudière basée sur la technologie BABCOCK ET WILCOX²⁷¹. Elle présente une surface de chauffe de 113 m² et une pression de fonctionnement de 12 kg/cm² ; elle peut atteindre temporairement des pointes à 14 kg/cm² (figure 73). La maçonnerie est assurée par la société MULLER, basée à MONTREUIL, spécialisée dans les constructions industrielles.

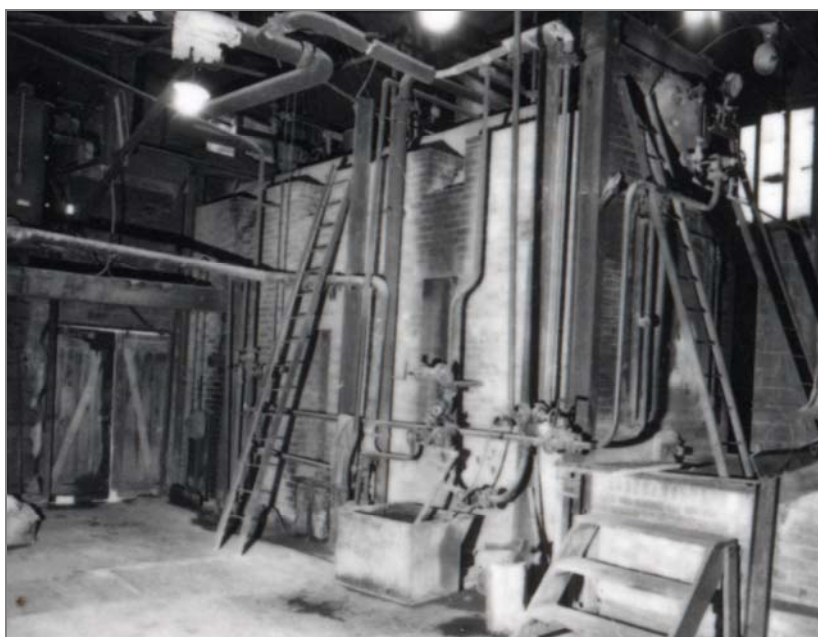


Figure 73 : 1977 – LA CHAUDIERE DE LA ROCHE-EN-BRENIL INSTALLEE DEPUIS 1946

Quelques mois plus tard, en septembre 1946, il est envisagé d'acheter une 2^{ème} machine à vapeur²⁷². M. BRUNEL passe alors par un intermédiaire : Paul HEUMEZ, ingénieur ARTS-ET-METIERS basé dans l'HERAULT. Ce consultant entame les négociations avec BARTHEZ & CIE, possesseurs de la LA TUILERIE CENTRALE DU MIDI. La machine à vapeur en vente est de marque PIGUET ; d'après BARTHEZ & CIE, sa boîte à tiroir est située à droite du cylindre. Aucune information de prix n'est communiquée dans ces courriers d'échanges entre BRUNEL, HEUMEZ et BARTHEZ ; cependant, HEUMEZ précise qu'il faut tenir compte de ses frais d'honoraires d'un montant de 7% du prix de vente.

En possession, de ces quelques données, M. BRUNEL contacte alors DUJARDIN & CIE²⁷³ afin d'obtenir des compléments d'informations. Portant le numéro de série 170, elle fut

²⁷¹ Source : archives du CREUSOT-MONTCEAU, suivi des correspondances : Plan de Cuvelage de la chaudière BABCOCK - Etablissement Brunel La ROCHE-EN-BRENIL, n.d. (~1930)

²⁷² Sources : archives du CREUSOT-MONTCEAU, suivi des correspondances : BARTHEZ & CIE à Paul HEUMEZ, 5 septembre 1946 / Paul HEUMEZ, à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 12 septembre 1946 / Paul HEUMEZ à BARTHEZ & CIE, 12 septembre 1946

²⁷³ DUJARDIN & CIE, anciennement TOSI-DUJARDIN, anciennement PIGUET & Cie.

construite quelques années après la n°135, plus précisément en 1904. Elle présente exactement la même technologie que la n°135 à l'exception de la vitesse de fonctionnement qui est inférieure. Cependant, comme prévu par son constructeur, une modification du dimensionnement de la poulie du régulateur à boule peut faire évoluer sans difficulté la vitesse de fonctionnement en marche normale.

Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- Diamètre du cylindre à vapeur : 400 mm,
- Course du piston : 800 mm,
- Système à Tiroirs-Plans, à condenseur et à détente variable,
- Positionnement de la boîte à tiroirs à droite du cylindre, DUJARDIN & CIE confirmant une disposition similaire à la machine n°135 et infirmant les propos de BARTHEZ & CIE,
- Fonctionnement normal pour une vitesse de 100 tr/min.

Ce courrier entre DUJARDIN & CIE et M. BRUNEL datant du 15 octobre 1946 soit plus d'un mois après les échanges BRUNEL, HEUMEZ et BARTHEZ, permet d'émettre l'hypothèse que M. BRUNEL a effectivement la ferme intention d'acheter cette machine à vapeur. En effet, DUJARDIN & CIE lui confirme qu'ils ont bien pris note de sa demande de mise à disposition d'un monteur mais qu'actuellement, ceux-ci sont débordés et qu'ils ne peuvent satisfaire sa demande avant fin novembre.

Malheureusement, aucun document ne prouve si la scierie s'est effectivement dotée de cette machine. Peut-être est-ce le délai de mise à disposition du chef monteur qui en dissuade M. BRUNEL ? De plus, au vu des graphiques de l'évolution des puissances en courant continu et alternatif, une marge conséquente demeure entre la puissance disponible et la puissance utilisée. Dès lors, pourquoi en acheter une autre ? Uniquement pour ses pièces de rechange ? Pour anticiper sur les problèmes de fonctionnement qui vont suivre (voir partie ci-après) ?

Malgré tout, au vu des photographies réalisées en 1977, la salle des machines ne présente pas d'autre machine à vapeur que la n°135 (voir les figures ci-avant et ci-après dans ce chapitre).

4.3.3.6 Des difficultés de fonctionnement à partir de 1950

Dès 1952, de nombreux problèmes viennent perturber la marche normale de la machine à vapeur n°135.

Tout d'abord, la qualité de l'eau alimentant la chaudière se dégrade et nécessite un traitement permanent à la soude trisodique. Mélange de carbonates de soude et de phosphate trisodique, cette solution est régulièrement employée dans le milieu industriel pour nettoyer le tartre des appareils.

Cependant, le 31 janvier 1952 soit 10 jours après le début du traitement à la soude, la chaudière n'est toujours pas en état de fonctionner et M. BRUNEL est contraint d'informer l'Association Lyonnaise des Propriétaires d'Appareils à Vapeur de la mise en chômage de sa chaudière BABCOCK n°2329. De multiples analyses d'eau s'en suivent afin de déterminer

comment éradiquer la formation de tartre dans la chaudière. Pour pouvoir remettre en état la chaudière, il s'avère qu'une épuration complète est indispensable.

La mauvaise qualité de l'eau et de la vapeur amenée à la machine à vapeur a malheureusement eu de graves conséquences sur ses composants²⁷⁴. En février 1954, M. BRUNEL doit commander à DUJARDIN & CIE un jeu de trois clapets pour la pompe du condenseur et refait intégralement les joints de ce dernier. De plus, les tiroirs et les glaces du cylindre ont été fortement endommagés par une usure prématurée suite à la présence de matière solide dans le cylindre. Les tiroirs sont remplacés et l'intégralité des joints également changée.

Le 26 juin 1954, M. BIMOSZ, chef monteur chez DUJARDIN & CIE, se rend à La ROCHE-EN-BRENIL afin d'effectuer une vérification complète de la machine. Il expertise une majorité des composants qui n'avaient pas été revérifiés depuis leurs installations en 1930 d'où les bruits de *chocs violents* constatés car dus à des jeux excessifs. L'intégralité des joints de la machine sont refaits : tuyauteries d'admission, d'échappement et de purge, de bielles motrice, d'admission et de détente... en effet, en plus du tartre présent dans la machine, le chef monteur s'aperçoit que, malgré une salle des machines propre et carrelée, les trous de graissage sont obturés.

Enfin, il constate un défaut de conduite de M. CASARYL alors conducteur de la machine. Pour la faire fonctionner à plein régime, lors de la mise en route, ce dernier ouvre complètement la vis de manœuvre de la détente ; il ne fait qu'appliquer les consignes du conducteur précédent M. BAZLY. Mais M. BIMOSZ lui montre qu'ouvrir à fond ne fait qu'augmenter les risques de rendre libre la tige de détente et par conséquent, de créer une mauvaise détente entraînant une détérioration du tiroir. Vingt-quatre années durant, la machine a donc pu subir une mauvaise utilisation potentielle qui n'a fait que se rajouter aux problèmes actuels²⁷⁵.

Enfin, afin de faire face aux dépôts de tartre générés par la chaudière, M. BRUNEL achète un anti-tartre électronique de la société BARBOTTE & CIE basée à PARIS²⁷⁶. Celui-ci, installé en juillet 1954, sera remplacé par une nouvelle génération 11 ans plus tard.

De plus, l'Association Lyonnaise des Propriétaires d'Appareils à Vapeur suggère de mettre en place une épuration par purge continue sur la machine à vapeur. Ce système est installé en juin 1954.

²⁷⁴ Sources : archives du CREUSOT-MONTCEAU, suivi des correspondances : Etablissements DUJARDIN & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 15 octobre 1946, 26 février 1954, 12 mai 1954, 17 mai 1954, 26 mai 1954, 28 juin 1954, 6 juillet 1954 / Etablissements DUJARDIN à M. BRUNEL, La Roche-en-Brénil, 8 juillet 1954

²⁷⁵ Source : archives du CREUSOT-MONTCEAU, Rapports de contrôles : Etablissements DUJARDIN & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 6 juillet 1954

²⁷⁶ Source : archives du CREUSOT-MONTCEAU, suivi des correspondances : BARBOTTE & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 8 novembre et 7 décembre 1965

A l'automne 1954, la machine à vapeur est de nouveau opérationnelle, la chaudière est contrôlée et remise en service. Avec 54 ans de vie active, la machine à vapeur n'est pas de toute jeunesse et DUJARDIN & CIE conseille de la faire fonctionner pour fournir 100 chevaux de moyenne avec un maximum de 120 chevaux. Des pointes à 130 ou 140 chevaux sont fortement déconseillées ou uniquement à titre exceptionnel durant ½ à 1 heure maximum par jour. La figure 74 précise les nouvelles caractéristiques de la machine à la date du 6 juillet 1954.

Pression à la chaudière	8.5 kg/cm ²			
Vitesse	80 tr/mn			
Degré d'admission	10	15	20	(25)
Chevaux effectifs	77	100	118	(133)
Consommation de vapeur (kg/h)	650	860	1070	(1300)

Figure 74 : JUILLET 1954 – CARACTERISTIQUES DE LA MACHINE PIGUET N°135

Mais malgré toutes les précautions prises pour parer à la mauvaise qualité de l'eau et à l'usure due à son âge, la machine à vapeur souffre et les joints de l'ensemble de la tuyauterie et du cylindre sont régulièrement refaits : en 1957 puis en 1963²⁷⁷.

4.3.3.7 45 ans de vie dans la scierie Brunel²⁷⁸

La scierie est fondée en 1893 par Paul BRUNEL alors charpentier à La ROCHE-EN-BRENIL. Elle est exploitée, gérée et développée par ses descendants jusqu'en 1972, date à laquelle elle se regroupe avec les Etablissements DUCERF basés à CHAROLLE en SAONE-ET-LOIRE.

En 1975, afin de moderniser l'usine, la scierie décide de remplacer la vapeur par l'électricité.

Jusqu'à son arrêt total le 30 juillet 1975, trois employés se succèdent à la conduite de la machine à vapeur PIGUET. Le premier fut M. BAZLY puis M. CASARYL ; enfin, le dernier était surnommé *'Auguste'*. De son vrai nom Auguste SALOMON, il conduit la machine de 1968 à 1975 : c'était *son bijou*.

²⁷⁷ Sources : archives du CREUSOT-MONTCEAU, suivi des correspondances : Etablissements DUJARDIN LILLE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 10 décembre 1957 / Etablissements DUJARDIN & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 23 novembre 1961 / S.A. des Etablissements DUJARDIN & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 11 janvier 1963

²⁷⁸ Source : [BRUNEL 1972]

Jusqu'en 1972, la scierie BRUNEL de La ROCHE-EN-BRENIL débite environ 8 000 m³ de grumes par an répartis comme suit :

- 85% de chêne,
- 8% de hêtre,
- 7% de résineux et essences diverses (bouleaux, trembles, charmes, aulnes...).

Les arbres sciés proviennent des forêts domaniales, communales et privées situées dans un rayon de 100 km autour de la scierie. Elle dessert ainsi les départements de la COTE D'OR, de l'YONNE, de la NIEVRE et de la SAONE-ET-LOIRE.

En période de pointe, elle atteint un effectif d'environ 60 personnes et débite jusqu'à 12 000 m³ de grumes par an. Pourtant non dotée d'une chaîne de production automatisée, elle possède plusieurs moyens de sciage dont :

- six scies à ruban,
- deux scies à grumes²⁷⁹ pour les arbres de grandes dimensions,
- trois scies à chariots libres pour les arbres de petite taille,
- une dédoubleuse pour les dosses²⁸⁰,
- plusieurs machines pour le façonnage : déligneuses, rogneuses, tronçonneuses...

Les produits fabriqués sont écoulés selon la répartition suivante :

- 40% sur le marché européen : ALLEMAGNE, SUISSE, BELGIQUE, HOLLANDE, ITALIE, ESPAGNE.
- et 60% sur le marché intérieur français : négociants en bois, entreprises de construction, Pompes Funèbres Générales et fournitures pour le chemin de fer.

En effet, depuis la création de la scierie, le marché du chemin de fer est un des plus importants. Les fournitures concernent :

- les planches pour fonds de wagons,
- les traverses de chemin de fer,
- les bois pour appareillages spéciaux de voies ferrés (aiguillages...).

Précisons que la scierie est située à quelques dizaines de mètres de la gare de la ligne PARIS-LYON comme en témoigne la carte satellite IGN de la figure 75. Cette photographie satellite confirme également l'implantation du pont roulant et de la nouvelle scierie²⁸¹.

²⁷⁹ La grume est une partie d'arbre abattu, ébranché mais encore couvert d'écorce.

²⁸⁰ Les dosses sont des chutes de bois massif de longueur variable (plus de 2 mètres) provenant du débit des grumes en plots. De faible épaisseur, elles présentent une face convexe et une face plane.

²⁸¹ Latitude 47°23'5.12" Nord et longitude 4°10'28.93"Est.

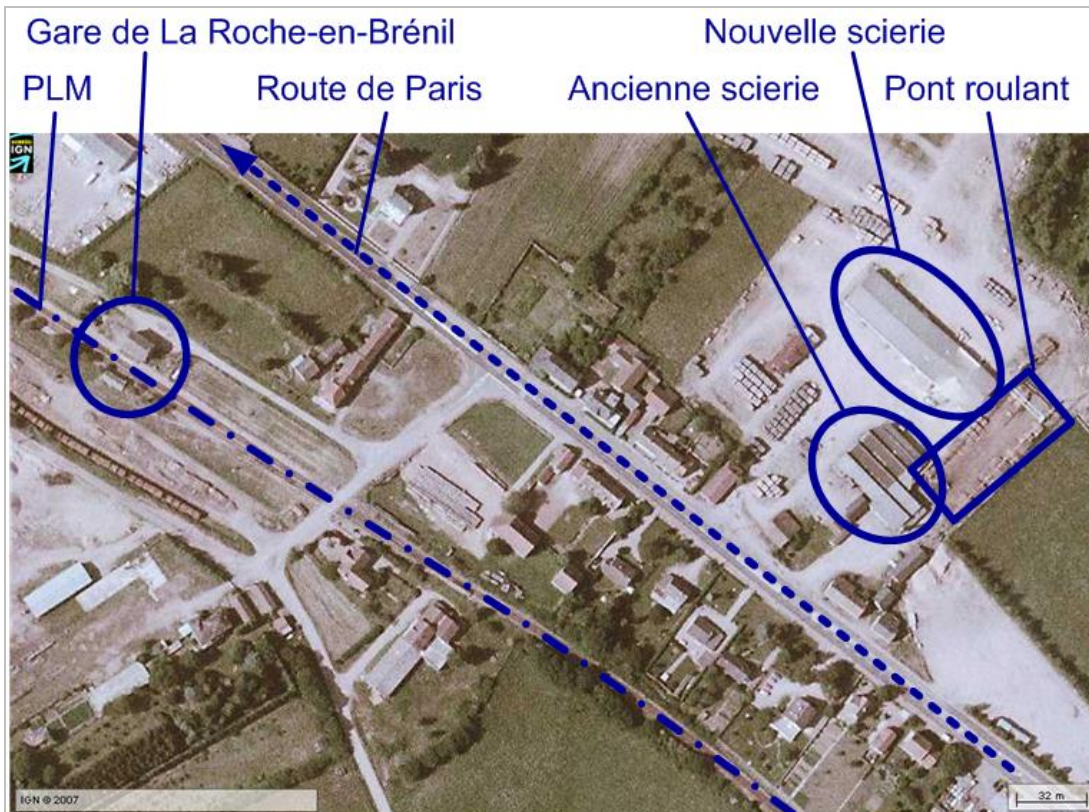


Figure 75 : 2007 - CARTE IGN D'IMPLANTATION DE LA SCIERIE A LA ROCHE-EN-BRENIL AVEC LA LIGNE DU PLM ET LA ROUTE DE PARIS

En mars 2001, la scierie de La ROCHE-EN-BRENIL cesse son activité mais la société DUCERF continue à CHAROLLE. Quelques mois plus tard, la société SCIONS est créée sur l'ancien site de la scierie de La ROCHE-EN-BRENIL et redonne vie à ce lieu chargé d'histoire ; SCIONS emploie actuellement une dizaine de personnes.

4.3.4 UNE DERNIERE VIE POUR LA MACHINE PIGUET N°135 : LA SAUVEGARDE D'UN OBJET PATRIMONIAL

Le 1^{er} juillet 1977, l'ECOMUSEE de la communauté du CREUSOT-MONTCEAU rachète la machine à vapeur à la scierie DUCERF pour la somme de 12 000 Frs TTC (environ 1830 €)²⁸². Les moteurs électriques sont en négociation mais ne font, au final, malheureusement pas partie de la vente. Cette transaction comprend la machine PIGUET *en l'état* ainsi que les matériels annexes (figure 76) :

- Les outillages spécifiques,
- Les 3 poulies de l'arbre de transmission,
- La courroie principale avec son tendeur,
- 1 piston de rechange.

²⁸² Source : archives du CREUSOT-MONTCEAU, suivi des correspondances : Facture de *Cession d'une machine à vapeur Piguët en l'état*, BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, à Musée de l'Homme et de l'industrie, Le CREUSOT, 30 juin 1977

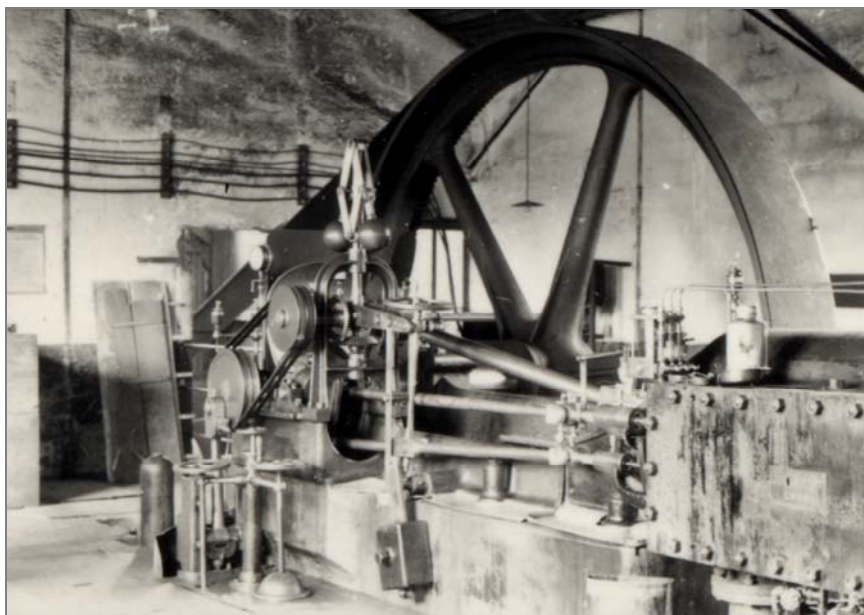


Figure 76 : 1977 - LA MACHINE FIGUET N°135 A L'ARRET

Le schéma de la figure 77 est un croquis réalisé par M. BADET, technicien de l'ECOMUSEE du CREUSOT-MONTCEAU qui a suivi le projet²⁸³. Ce document décrit l'implantation de la machine à vapeur et des deux machines de charge en 1977. Les moteurs sont positionnés dans la fosse en dessous de l'arbre moteur ; c'est pourquoi ce dernier est représenté à côté étant donné qu'il se trouve normalement au même niveau que la machine à vapeur. Ce schéma valide l'implantation décrite en 4.3.3.3.

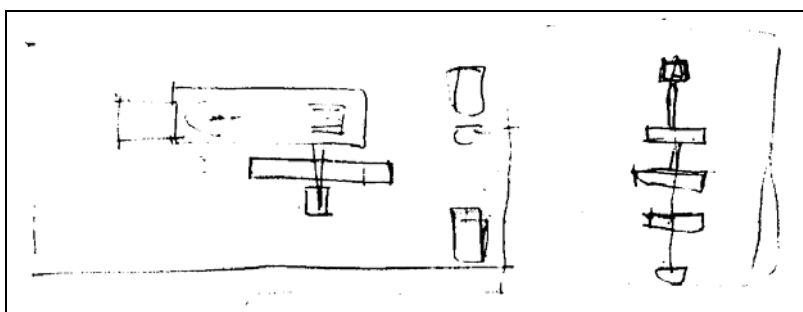


Figure 77 : SCHEMA D'IMPLANTATION DE LA SALLE DES MACHINES DE LA SCIERIE BRUNEL EN 1977.

Cependant, l'écomusée doit démonter et déplacer les matériels à sa charge. Une entreprise spécialisée dans le démontage des vieilles machines est contactée mais celle-ci ne peut réaliser l'opération. En effet, pour enlever la machine, il faut détruire le hangar de la salle des machines qui avait été construit autour de la machine lors de son installation en 1930. La scierie imposant à l'ECOMUSEE de reconstruire le hangar après l'opération, faute

²⁸³ Source : archives du CREUSOT-MONTCEAU : Notes personnelles + croquis de l'installation lors du démontage, M. BADET, Ecomusée du CREUSOT-MONTCEAU, 1977

de moyens suffisants, la machine ne peut être déplacée mais l'ECOMUSEE reste propriétaire de l'objet industriel.

En 1994, la scierie décide de détruire les bâtiments de la machine à vapeur et de la chaudière ; et n'impose plus de reconstruire ni le mur ni la toiture. En effet, en 1993, avec près de 65 ouvriers, la scierie produit 10 000 m³ de grumes dont 90 % de chênes. Afin d'augmenter encore sa production, il faut gagner en place, construire de nouveaux bâtiments plus modernes et surtout conformes aux nouvelles normes de sécurité. C'est ainsi que les lundi 2 et mardi 3 mai 1994, quatre employés de l'ECOMUSEE démontent la machine à vapeur. Pour les aider et les conseiller : l'Auguste est présent.

L'illustration de la figure 78 est une photo extraite d'un article du journal local en COTE D'OR rapportant la phase de démantèlement de la machine [BIEN PUBLIC 1994].

Le volant de 4 mètres de diamètre est composé de deux parties pesant 3 tonnes pièce. La machine est donc démontée et enlevée par l'entreprise de levage RENAUD de SAINT-BRANCHER (89). Elle est ensuite transportée dans les réserves de l'écomusée du CREUSOT-MONTCEAU²⁸⁴.

Depuis, la machine à vapeur FIGUET n°135, surnommée la *Roche-en-Brénil*, y repose en paix, inerte et en pièces détachées...

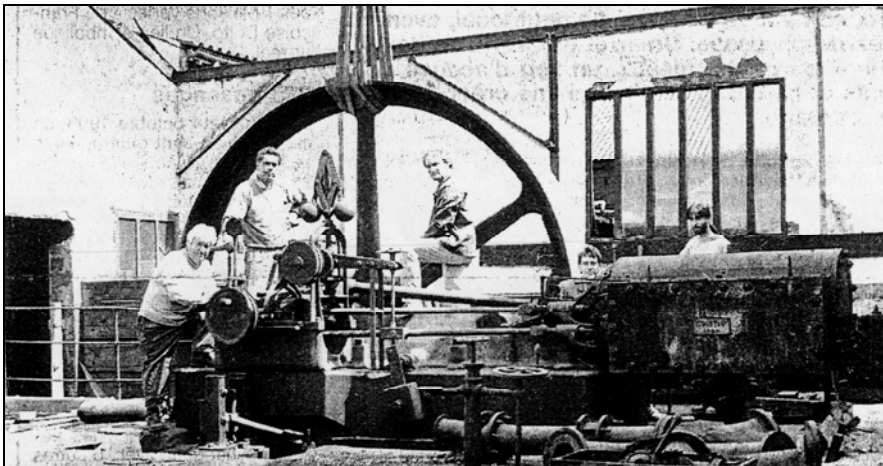


Figure 78 : LA MACHINE FIGUET EN DEMONTAGE [BIEN PUBLIC 1994]

²⁸⁴ Les réserves de l'écomusée du CREUSOT-MONTCEAU sont constitués des anciens bâtiments de l'Empire SCHNEIDER.

4.4 MODELISATION 3D ET VALORISATION WEB3D

Effectuons un saut dans le temps et réutilisons un langage technique contemporain pour sauvegarder et valoriser cet objet sous une forme numérique.

Le travail de création de la DMU a été réalisé par Jean-Baptiste MARTIN dans le cadre de travaux de laboratoire menés durant ses études d'élève-ingénieur à l'UTBM [MARTIN 2002a]. Pour cette étude, il a été suivi par Michel COTTE, historien des techniques, alors directeur du Département des Humanités de l'UTBM, et Samuel DENIAUD, enseignant-chercheur à l'UTBM, en Génie des Systèmes de Production [COTTE & al 2005a].

L'objectif de cette modélisation est de présenter cette machine à vapeur FIGUET n°135 déclarée impossible à remonter à un public non averti permettant ainsi une visualisation de l'objet technique sous plusieurs angles sans aucun danger pour le visiteur.

La maquette numérique à échelle 1:1 de cette machine à vapeur rend ainsi possible une restauration virtuelle complète à moindre coût. La mise en animation du modèle par sa cinématique associée permet également de comprendre son fonctionnement dynamique en ajustant les paramètres de vitesse et de rotation du piston ou du volant.

4.4.1 METHODOLOGIE DE CONCEPTION DE LA MAQUETTE NUMERIQUE

4.4.1.1 Choix du logiciel et modules utilisés

Ces travaux ayant été effectués au sein du Laboratoire M3M de l'UTBM, le logiciel utilisé a été un outil de CAO. L'éventail d'outils disponibles étant très large et les modules à utiliser n'étant pas déterminés, le choix se porta sur les deux logiciels alors leaders sur le marché : PROENGINEER 2000i² et CATIA V5.

Après comparaison, le logiciel CATIA a été retenu car son module d'animation cinématique est plus évolué que celui de PROENGINEER. De plus, CATIA possède un moteur de rendu réaliste plus performant (application de textures, gestion de l'éclairage, incorporation dans un environnement). Enfin, le module Conception et analyse ergonomique permet l'incorporation et l'animation de mannequins numériques dans le modèle virtuel afin de simuler les situations d'usages de l'objet.

Trois ateliers de CATIA V5 furent utilisés dans cette réalisation : Part Design, Assembly Design, et DMU Kinematics :

- L'atelier Part Design est utilisé pour concevoir chaque élément de la maquette. C'est le module de base servant à la définition de la géométrie de chacun des composants.
- L'atelier Assembly Design est utilisé pour assembler chacun des composants définis par le module Part Design. Ce module sert donc à *monter* les composants les uns par rapport aux autres.
- Le module DMU Kinematics est utilisé pour gérer les liaisons intervenant entre chacun des éléments de la maquette. Il permet également, une fois toutes les liaisons définies,

d'animer le modèle en précisant une commande selon une loi mathématique (angle, course, vitesse, accélération...) Enfin, grâce aux nombreux outils de ce module, il est possible de réaliser des analyses des différents mouvements du mécanisme.

4.4.1.2 Méthode de modélisation

Pour réaliser une DMU d'un objet patrimonial, les différents composants peuvent être modélisés de deux façons.

La première, la plus directe, consiste à modéliser directement la géométrie de chacune des pièces avec le module Part Design, puis de les assembler géométriquement les unes avec les autres par le biais du module Assembly Design. Enfin on les anime avec le module DMU Kinematics. Cette méthode, la plus intuitive, nécessite de connaître avant même le début de la modélisation, la géométrie et les dimensions de chacun des éléments ; ce qui n'est pas le cas ici.

La deuxième méthode utilisée consiste à créer le *squelette filaire* du mécanisme. Chaque élément est défini par des points, des lignes et des plans de référence.

La création de ce squelette nécessite peu de données. Exemple : dans le cas d'une bielle, seule la distance entre ses axes est nécessaire (figure 79). La deuxième étape consiste à mettre en place les liaisons cinématiques entre ces *éléments de référence*. Enfin, il convient d'*habiller* ce squelette avec des formes volumiques en les liant au mécanisme pré-contraint (figure 80).

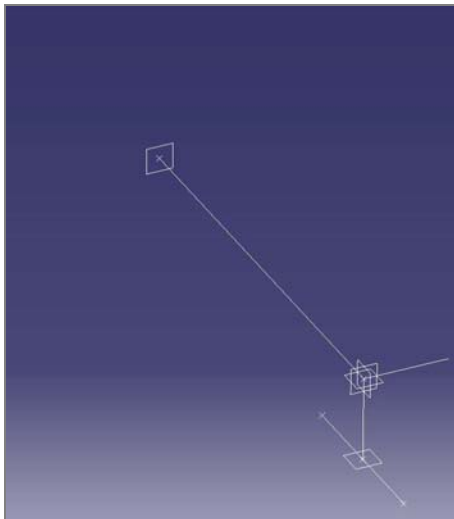


Figure 79 : MACHINE PIGUET : MODELE FILAIRE DU PISTON

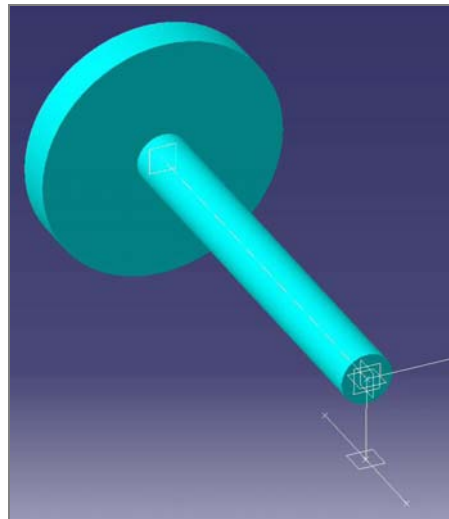


Figure 80 : MACHINE PIGUET : HABILLAGE DU MODELE FILAIRE DU PISTON

Ainsi, nous avons suivi la méthodologie illustrée par la figure 81 [LAROUCHE & al 2005a] [LAROUCHE & al 2005b] :

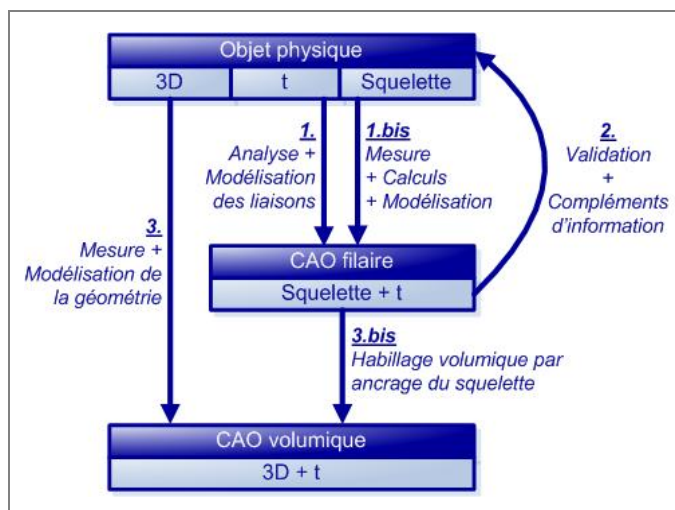


Figure 81 : METHODOLOGIE DE MODELISATION EN CAO 3D+T D'UN OBJET PATRIMONIAL

La démarche se résume en trois étapes principales :

1. passage de l'objet physique à son modèle CAO filaire sous la forme d'un *squelette + t*,
2. itération entre le modèle filaire et l'objet physique afin de valider et figer la dynamique d'usage,
3. réalisation de la maquette numérique dynamique par la modélisation volumique en ancrant l'habillage sur le squelette.

En terme de modélisation CAO, un objet physique se définit comme suit :

- la *notion 3D* est la géométrie tridimensionnelle caractérisant le composant, la pièce, le produit, l'objet...
- le *squelette* : il s'agit de l'*âme* de l'objet, son dimensionnement principal pour lequel le composant est la raison d'être, il assure la fonction.
- le *t* est la notion de temporalité : c'est le mouvement global de la mécanique de l'objet. Ce mouvement est la somme de liaisons. Chaque liaison (figure 82) est définie par les éléments suivants :
 - désignation mécanique de la liaison,
 - Eléments E1 et E2 à lier :
 - Désignation,
 - Caractéristiques nécessaires à la liaison (exemple : axes).

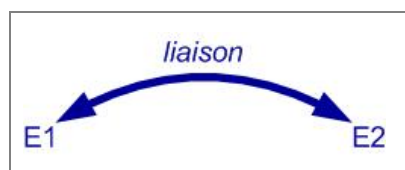


Figure 82 : REALISATION D'UNE LIAISON CINEMATIQUE

Le modèle filaire CAO est donc l'association des squelettes et des liaisons les animant. Le modèle volumique CAO 3D+t représente la machine dans sa dynamique d'usage.

4.4.2 LE TRAVAIL DE MODELISATION ET D'ARCHEOLOGIE INDUSTRIELLE AVANCEE

Le travail d'archéologie industrielle réalisée sur cette machine à vapeur PIGUET s'est déroulé selon une méthodologie en six étapes :

1. analyse du fonctionnement du mécanisme,
2. établissement d'un schéma cinématique en version papier,
3. prise des dimensions de la machine sur le site du CREUSOT-MONTCEAU²⁸⁵,
4. modélisation 3D de la structure filaire de la machine,
5. modélisation des liaisons cinématiques et animation du squelette,
6. modélisation de la géométrie de la machine par *habillage* du squelette.

4.4.2.1 Rappel des caractéristiques techniques de la machine étudiée

Cette machine est une machine à vapeur de marque PIGUET. Elle est :

- de type horizontal,
- à droite ; le volant étant situé à droite du piston,
- à tiroir-plans ; système de distributeur pour la vapeur d'admission et d'échappement,
- mono-cylindrique ; contrairement aux machines à doubles effets de WOOLF qui sont constituées de plusieurs cylindres,
- à condensation et à détente variable par le régulateur à boule.

Ses dimensions (bielle, manivelle, piston, volant d'inertie) sont de 4.40 mètres de largeur, 6.40 mètres de longueur, et 4.20 mètres de hauteur. Son piston mesure 40 cm de longueur pour une course de 80 cm. C'est pourquoi elle porte la référence 40X80 T.P.²⁸⁶

Son rôle originel est la production d'énergie (mécanique ou électrique).

4.4.2.2 Etude des classes d'équivalence de la cinématique

Comme précisé ci-avant, la première étape consiste à réaliser une étude cinématique de la machine afin de regrouper les pièces. Trois groupes sont identifiés :

- la partie *puissance*,
- la partie *régulateur*,
- la partie *commande*.

Le premier groupe est la partie *puissance*. Il s'agit du système bielle/manivelle fournissant l'énergie motrice. On distingue à gauche de la figure 83 le cylindre dans lequel le piston coulisse. A l'intérieur du carter se trouve la bielle. Le vilebrequin (également

²⁸⁵ Lors de la réalisation de ce projet de rétro-patrimonialisation, nous n'étions pas encore équipés en technologies de numérisation 3D. Nous les utiliserons plus tard dans un autre cas d'étude.

²⁸⁶ Les initiales T.P. signifient Tiroir-Plans.

dénoté manivelle au 19^{ème} siècle) devant se trouver sur la droite de la photo n'est plus monté sur la machine ; celui-ci est entreposé séparément.



Figure 83 : MACHINE PIGUET N°135 : PARTIE PUISSANCE

Le second groupe identifié est la partie *régulateur*. Il se compose, au premier abord, seulement du régulateur à boules (figure 84). Une liaison par courroie relie le régulateur au vilebrequin de la partie *puissance*. Il est mis en rotation par un système d'engrenages concentriques. De plus, l'action de la force centrifuge va induire un changement de position d'une bielle : c'est la partie *commande*.

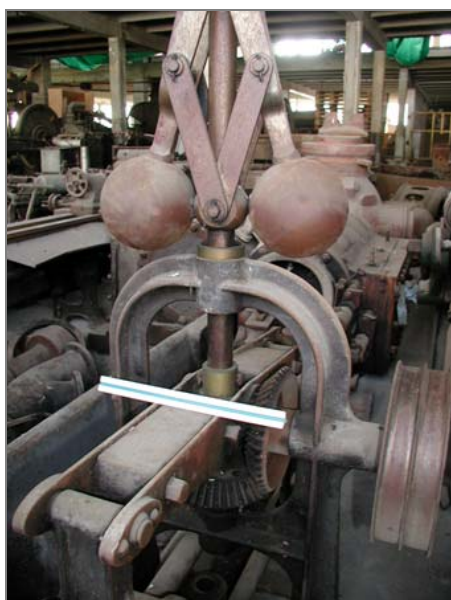


Figure 84 : MACHINE PIGUET N°135 : PARTIE REGULATEUR A BOULES

Le groupe *commande* consiste en deux systèmes de bielles manœuvrant des pistons dans le cylindre. Comme vu précédemment dans l'étude de la technologie DUVERGIER/PIGUET, le régulateur fait varier la course de la troisième bielle se trouvant à l'extrémité droite de la machine. Celle-ci commande alors le mécanisme à tiroir-plans gérant

l'admission et l'échappement de vapeur dans la machine. La figure 85 montre la tige de piston rentrant dans le cylindre (à gauche) ainsi que les deux bielles prolongées par deux pistons rentrant dans le tiroir-plans (à droite).

De plus, une commande manuelle permet d'agir directement sur le débattement du régulateur et donc, par conséquent, sur l'admission de vapeur (figure 86). Comme apparaissant sur la photographie, cette manivelle est partiellement détruite.



Figure 85 : MACHINE PIGUET : PARTIE COMMANDE
DANS LE CYLINDRE

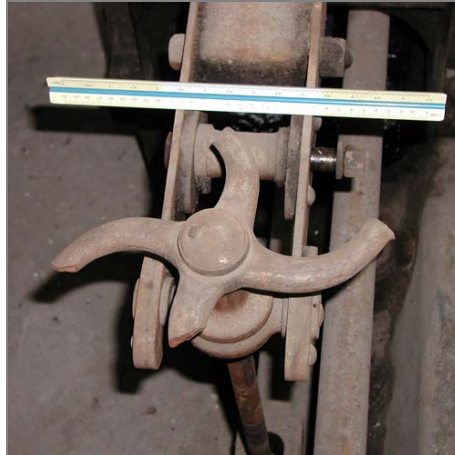


Figure 86 : MACHINE PIGUET : PARTIE COMMANDE
MANUELLE

4.4.2.3 Définition des liaisons et schéma cinématique

La création du schéma cinématique est un point critique dans la phase de modélisation. Cependant, elle s'avère nécessaire pour la création du modèle complet. La détermination des liaisons entre chaque composant est essentielle pour éliminer les degrés de liberté du mécanisme. En effet, le module cinématique de CATIA ne peut simuler un mécanisme si le degré de liberté de celui-ci n'est pas nul.

Cette étude cinématique a tout d'abord donné lieu à un premier document intermédiaire en version papier (figure 87).

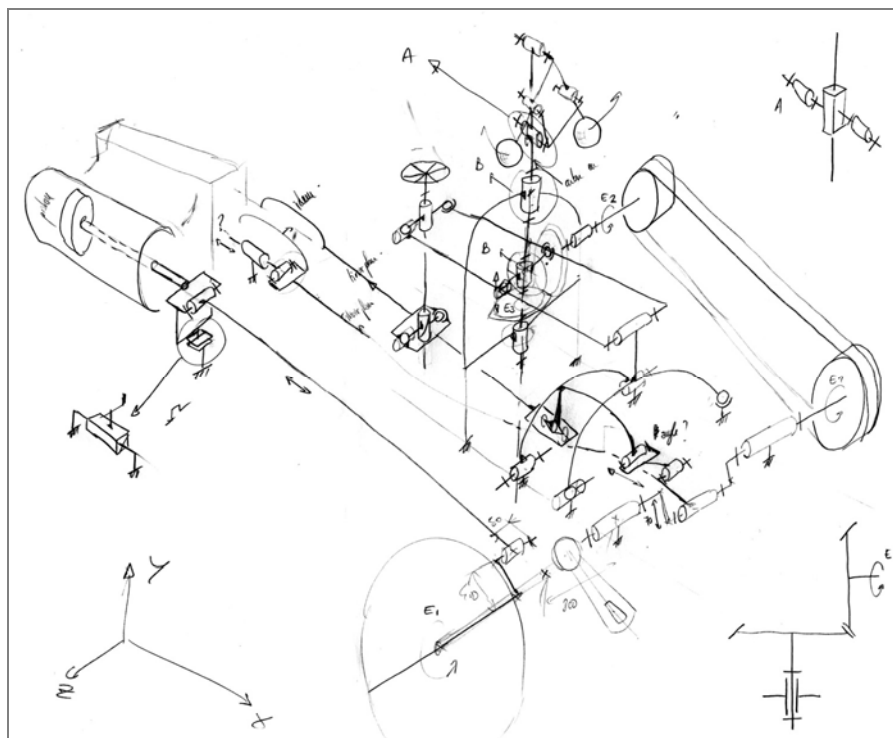


Figure 87 : SCHEMA CINEMATIQUE DE LA MACHINE A VAPEUR PIGUET – DOCUMENT MANUSCRIT²⁸⁷

Avant de définir les liaisons d'un mécanisme, il convient d'assembler les composants à l'aide de contraintes pouvant être des contraintes d'alignement, de contact, de distance... Le tableau de la figure 88 précise les éléments de référence nécessaires à la définition des liaisons :

Liaison	Point	Ligne	Plan
Pivot		2	2 normaux
Prismatique (Glissière)		2	2
Rotule	2		
Engrenage		2 + ratio	2 normaux
Courbes roulantes (Engrenages concourants)		2	
Point sur courbe (ponctuelle)	1	1	

Figure 88 : ELEMENTS DE REFERENCE NECESSAIRES A LA DEFINITION DES LIAISONS

La *liaison pivot* est utilisée pour assembler un composant en rotation par rapport à un autre. C'est le cas ici de l'arbre d'entrée sur le bâti, de l'arbre de sortie courroie sur le bâti, du groupe régulateur sur le bâti, de l'arche sur le bâti.

La *liaison prismatique* est également utilisée pour assembler un composant en rotation par rapport à un autre ; mais elle rajoute un degré de translation sur l'axe de rotation, c'est

²⁸⁷ Source : [MARTIN 2002]

pourquoi on la nomme couramment *liaison glissière*. C'est le cas ici des trois pistons sur le bâti ainsi que de la glissière sur le mât de régulateur.

La *liaison engrenage* est utilisée pour transmettre le mouvement entre les deux poulies de l'arbre volant et de l'arbre sortie courroie. En effet, il n'existe pas de liaison par courroie dans CATIA. Ainsi, la *liaison engrenage* permet de *biaser le système* en prenant, ici, un rapport de multiplication de 1,5²⁸⁸.

La *liaison courbes rouler* est utilisée pour les engrenages coniques entre le régulateur et l'arbre sortie courroie. On utilise cette liaison car la liaison engrenage ne fonctionne pas dans le cas des engrenages concourants.

Afin d'optimiser les degrés de libertés du mécanisme, nous avons utilisé des liaisons différentes pour les systèmes bielle/manivelle. En effet, l'utilisation de deux *liaisons pivot* pour les extrémités des bielles 1 et 2 ainsi que sur le levier s'est avérée impossible car le système aurait été surcontraint. Aussi, deux liaisons rotules ont été utilisées à la place. Malgré tout, après modélisation sous CATIA, le système n'est pas simulable : le module cinématique détecte qu'il reste un degré de liberté : la rotation de la bielle sur son axe. C'est pourquoi nous avons ajouté une liaison point sur courbe sur chacune des bielles et sur le levier afin de supprimer cette rotation.

La modélisation filaire est effectuée élément par élément comme cela est décrit dans l'annexe 19. L'assemblage filaire terminé, celui-ci se présente comme illustré par la figure 89. Ce modèle cinématique 3D+t étant simulable, nous avons pu passer à la phase de modélisation *cosmétique* des composants.

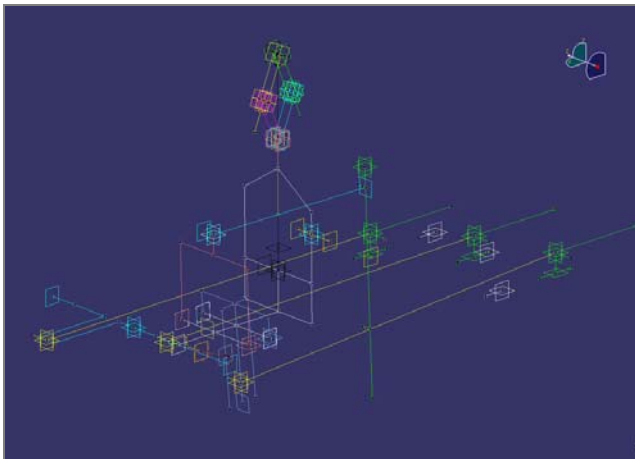


Figure 89 : MODELE CAO 3D+T FILAIRE DE LA MACHINE PIGUET

²⁸⁸ Notons qu'en réalité, celui-ci est de 1,35 sur la machine. Cependant, ce choix a été effectué pour des raisons de commodités de visualisation des simulations dynamiques : lorsque l'arbre du volant fait deux tours, cela permet au régulateur d'en faire trois ; le rapport des engrenages concourant est ainsi de 1,5.

4.4.2.4 Modélisation volumique et habillage du squelette

L'annexe 20 détaille les composants de modélisation volumique de la machine à vapeur. Ainsi, avec 21 éléments et 26 liaisons cinématiques, l'assemblage final est simulable et se présente comme illustré par la figure 90 réalisée avec textures en rendu réaliste sous CATIA. Nous avons également ajouté un mannequin numérique manœuvrant la vis de réglage de commande d'admission de vapeur afin de pouvoir donner un référentiel d'échelle.

Cependant, on notera que l'habillage du bâti n'est pas complet dans la modélisation volumique 3D ; et ce, pour deux raisons :

- Un point de vue esthétique : en modélisant le bâti intégralement, celui-ci aurait caché certains éléments nécessaires à la compréhension du fonctionnement interne de la machine.
- Un point de vue technique : le bâti est une pièce difficile à modéliser. En effet, son mode d'obtention étant le moulage, de nombreuses surfaces complexes sont à réaliser. Pour obtenir un bâti et une double enveloppe de cylindre fidèles à la réalité, il aurait fallu démonter la machine ; ce qui n'est pas permis, étant donné qu'elle est considérée comme un objet patrimonial.

Par ailleurs, d'autres éléments n'ayant pas été récupérés ou disparus lors du démontage de la machine et qui sont indispensables à son fonctionnement ont dû être repensés intégralement. C'est le cas du levier de commande qui n'est pas complet et qu'il a fallu reconcevoir.

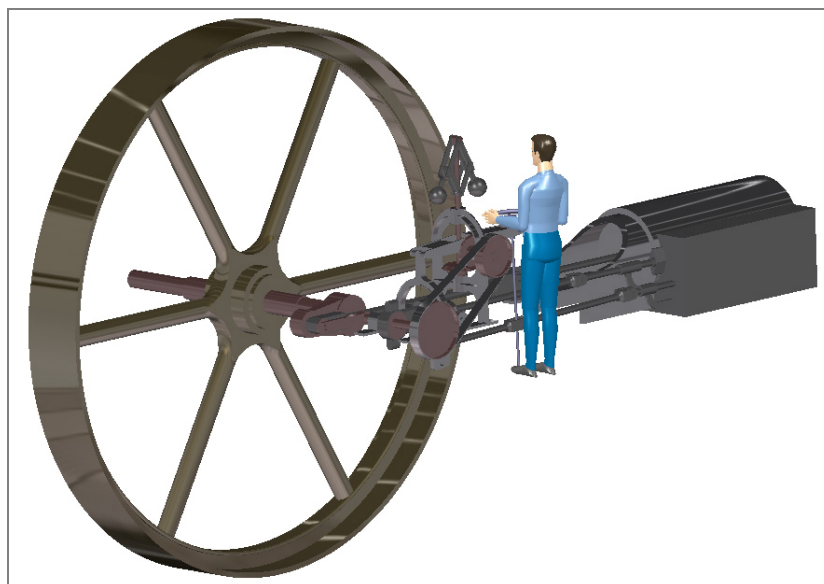


Figure 90 : L'ASSEMBLAGE FINAL VOLUMIQUE EN RENDU REALISTE DE LA MACHINE PIGUET

4.4.3 VALORISATION DE LA DMU : APPLICATIONS MUSEOGRAPHIQUES EN WEB3D

Pour faire suite à cette première étude de modélisation mécanique, un projet de *Musée de la vapeur vivante* est envisagé par l'Ecomusée du CREUSOT-MONTCEAU à la demande de son conseil scientifique [COTTE 1999]. Il est alors souhaité remonter la machine à vapeur FIGUET mais il est difficile de concilier les règles de sécurité d'accueil du public et un budget limité, le projet est donc reconsidéré. L'ECOMUSEE du CREUSOT-MONTCEAU nous demanda alors de proposer une solution allégée, didactique et autonome pour valoriser ces premiers travaux de machines virtuelles.

Afin de répondre au cahier des charges, nous avons mené un projet de recherche en partenariat avec le département informatique de l'ÉCOLE POLYTECHNIQUE de l'UNIVERSITE DE NANTES et l'équipe IVC²⁸⁹ de l'IRCCyN : réaliser une application générique de valorisation en Web3D.

Cependant, issue d'une recherche scientifique, la solution ne pouvait satisfaire une demande de type client car elle n'était qu'à l'état d'ébauche et de nombreuses améliorations de sa programmation étaient nécessaires pour aboutir à un produit final viable. Aussi, nous avons opté pour une solution de mise en œuvre uniquement dédiée au cas d'étude en réalisant une application didactique de type FLASH.

4.4.3.1 Développement d'une interface HTML couplée à une base de connaissances

Au vu de la multiplicité des initiatives dans le domaine de la muséographie et des défis à relever en terme d'interopérabilité²⁹⁰, il fut décidé de suivre les recommandations préconisées par le MINISTERE de la CULTURE et de la COMMUNICATION pour l'exploitation d'informations numériques à caractère patrimonial [DALBERA & al 2003] :

- Structuration des dossiers numériques basée sur le langage XML,
- Utilisation de logiciels libres,
- Diffusion sur le web.

L'objectif était donc de développer une interface Web simple et intuitive en prenant la DMU comme donnée initiale. L'idée de départ consistait donc à récupérer les données CAO dynamique pour les convertir en XML puis les exploiter afin de représenter graphiquement l'objet [ROCHARD & al 2005c].

Les recherches se sont d'abord orientées vers les possibilités d'extraction de données numériques depuis un modèle CAO : aussi bien les volumes des composants que la dynamique de l'objet. Cependant, comme vu dans l'état de l'art du chapitre 3, lors d'un export depuis un logiciel de CAO, les nombreux formats d'échange et de conversion de

²⁸⁹ IVC = Image Vidéo Communication

²⁹⁰ Voir partie 3.4.3.3

données²⁹¹ ne contiennent pas les caractéristiques dynamiques de l'objet modélisé. La seule solution consiste à reprogrammer manuellement les fichiers en rajoutant les lignes de codes nécessaires à la dynamique. Ce travail ne pouvant être automatisé, nous nous sommes orientés vers une autre solution.

La technique de réalité virtuelle utilisée repose sur le principe de projection synchronisée dans un repère sphérique d'images préenregistrées.

Les logiciels de CAO permettent de visualiser une scène dynamique depuis un point d'observation virtuel fixe. De plus, il est possible de capturer cette scène sous la forme de fichiers d'animation vidéo ou de fichiers d'images. Une macro a donc été codée pour capturer la scène selon un point de vue et durant toute la durée de la cinématique de la machine ; puis le point de vue est changé et la capture recommence. Une base de données référence ces images qui sont ensuite utilisées pour re-construire l'animation en synchronisant les sauts de points d'observation décidés par l'utilisateur.

Ainsi, la scène est d'abord capturée aux mêmes instants (t_i) depuis plusieurs points d'observation (P_o) pendant une période correspondante à un cycle entier des mouvements de l'objet²⁹². La scène est ensuite recomposée depuis le point d'observation choisi par le spectateur. La figure 91 illustre cette méthodologie [ROCHARD & al 2005b].

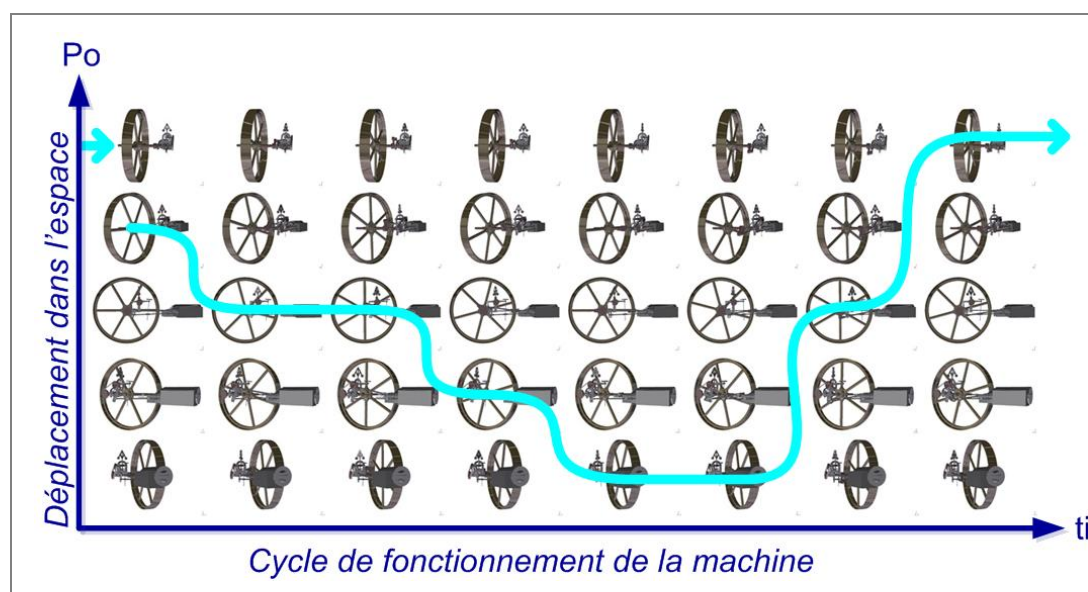


Figure 91 : MATRICE ILLUSTRANT LE CONCEPT DE VISUALISATION D'OBJETS EN DYNAMIQUE

Le nombre d'images à stocker est égal au produit du nombre de points d'observation par le nombre d'intervalles de temps. Cette quantité d'images est stockée dans une base de données. Celle-ci indexe les images en fonction de leur point d'observation et de leur instant

²⁹¹ STL, STEP, IGES, VRML...

²⁹² Exemple : la rotation entière d'une roue de bicyclette.

de capture. Elle peut également référencer des connaissances propres à chaque image pouvant être ainsi affichées simultanément.

Afin d'exploiter cette base de connaissances, le produit développé est constitué d'une page internet se décomposant en trois zones (figures 92 et 93) :

- La zone *Animation* contient la représentation virtuelle de l'objet modélisé. La machine est visualisée en 3D+t. L'interaction avec l'utilisateur s'effectue grâce à des boutons directionnels : il peut ainsi se déplacer autour de l'objet (à gauche, à droite, en bas, en haut) et agir sur le zoom (avant, arrière). Il a également la possibilité d'interagir avec la dynamique en ralentissant ou en augmentant la vitesse de fonctionnement du mécanisme.
- La zone *Connaissances*. L'utilisateur a ici la possibilité de choisir les informations qu'il souhaite obtenir à propos de l'objet représenté. Des hyperliens génériques affichent l'historique de la machine, son mode de fonctionnement... En outre, une liste déroulante recense les différentes pièces qui composent l'objet. En sélectionnant l'une d'entre elles, la représentation dynamique dans la zone animation change de point d'observation, de façon graduelle, jusqu'à ce que la pièce sélectionnée soit observable au premier plan.
- La zone *Affichage des connaissances*. Cet espace est réservé pour l'affichage des connaissances sélectionnées dans la zone précédente. Tout type de média peut être visualisé : textes descriptifs/explicatifs, photographies, vidéos, commentaires/extraits sonores...

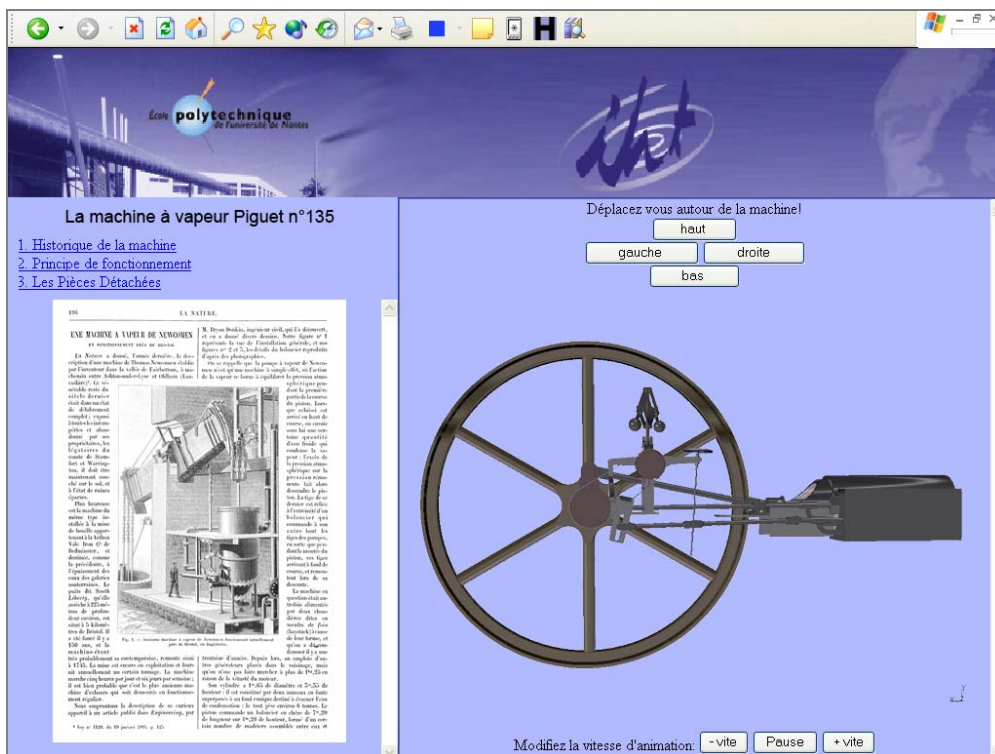


Figure 92 : INTERFACE PRINCIPALE DU MODULE INFORMATIQUE DE VISUALISATION D'OBJETS TECHNIQUES



Figure 93 : REPARTITION DES ZONES DE LA PAGE INTERNET

4.4.3.2 Application autonome muséographique

Cependant, l'application précédente demande des ressources matérielles informatiques très pointues et ajoute des difficultés de maintenance du système si utilisé dans un cadre muséographique. Aussi, nous avons mené un deuxième projet qui a abouti à une application totalement autonome et indépendante du système d'exploitation.

Nous avons opté pour une solution Web3D utilisant la technologie FLASH de la société MACROMEDIA²⁹³ (rachetée il y a peu par la société ADOBE). Créé en 1996, le format SWF est éprouvé dans de nombreuses applications : sites internet, jeux vidéos distribués sur le web, animations, créations multimédias... Il présente la particularité d'être autonome et disponible sous tout type de plate-forme PC comme MAC ; selon les dernières statistiques, plus de 95% des internautes ont le plug-in ADOBE FLASH PLAYER installé sur leur poste. En effet, si le logiciel de création est propriété de la société ADOBE, les produits réalisés avec ce dernier sont, eux, libres de droits. De plus, le programmeur réalise lui-même le scénario d'exploitation et le visiteur n'a donc en aucun cas à utiliser des fonctionnalités complexes comme sur les logiciels de CAO.

L'application développée propose trois parties principales :

1. Les caractéristiques techniques de la machine à vapeur PIGUET n°135,
2. Son historique avec ses différentes phases de vie,
3. L'explication de son fonctionnement.

La dernière partie est illustrée de nombreuses vidéos issues de la maquette numérique CAO. En effet, comme vu dans l'état de l'art du chapitre précédent et suite aux résultats ci-avant de la première tentative de valorisation, la problématique d'interopérabilité des données dynamiques nous empêchant d'exporter le modèle complet, nous avons choisi de

réaliser des vidéos sous différents angles de vue : vues d'ensemble, vues de détails en enlevant certains composants ou en les mettant en transparence... De plus, l'utilisateur possède des boutons spéciaux afin de pouvoir mettre la vidéo en pause, de pouvoir avancer / reculer d'un pas... L'intérêt de l'utilisation du format FLASH réside également dans la résolution d'un deuxième problème d'interopérabilité : celui de la nécessité d'installation de codec²⁹⁴ pour lire une vidéo. FLASH étant universel, son codec vidéo l'est aussi !

La figure 94 est une impression d'écran de cette application FLASH de la Machine à vapeur PIGUET n°135. Vous trouverez également en annexe 21 différentes vues de ce module.

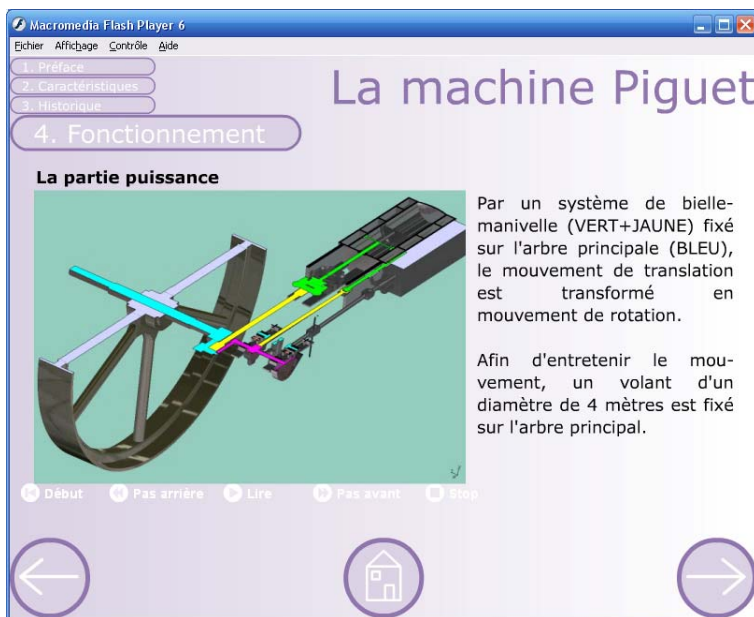


Figure 94 : APPLICATION DIDACTIQUE DE LA MACHINE A VAPEUR PIGUET N°135

²⁹³ <http://www.macromedia.com>

²⁹⁴ Comparable aux différents formats de support des vidéos (VHS, Hi8, DV...), il existe également de nombreux formats pour lire les vidéos sur informatique (MPG1, MPG2, divX, Xvid...).

4.5 PROBLEMES SOULEVES PAR L'ETUDE DE LA MACHINE PIGUET ET PERSPECTIVES

A l'issue de ces premiers travaux, plusieurs étapes ont été enchaînées pour construire une maquette numérique et la valoriser.

Outre les problématiques liées à l'utilisation et l'interopérabilité des outils, l'introduction d'un modèle virtuel soulève des questionnements en terme de conservation du patrimoine et de valorisation muséographique :

- des problèmes de sémantiques reliant les vestiges de l'objet présent et les archives provenant du passé,
- une définition de la précision requise du modèle virtuel,
- la mise en conformité pour un refonctionnement éventuel en toute sécurité dans le Musée.

4.5.1 ANCIENNE MACHINE OU NOUVELLES MACHINE : QUELLE DMU POUR QUELLE TEMPORALITE ? UN PROBLEME DE SEMANTIQUE ET DE SOURCES.

Un problème, insoupçonné au départ, est apparu lors de la phase de modélisation : la différence constatée entre les quelques plans retrouvés et la machine réelle stockée dans les réserves de l'ECOMUSEE du CREUSOT-MONTCEAU²⁹⁵.

Une fois conçue et fabriquée, la machine continue à évoluer au cours de sa phase d'exploitation et de maintenance. Aussi, des améliorations sont apportées pour palier les erreurs de conception comme le dysfonctionnement ou un taux de défaillance trop élevé d'un composant, un problème de qualité des matériaux utilisés...

Les plans retrouvés semblent correspondre à la phase de conception de la machine. Or les courriers de correspondances nous informent de quelques modifications mineures effectuées. Mais les rapports des monteurs de PIGUET ne sont pas assez précis pour nous renseigner sur les modifications ayant été réalisées. Il est parfois très difficile de mettre en corrélation cette importante quantité d'archives avec les ruines de la machine physique.

De plus, l'exploitation de telles sources pose un certain nombre de questions. On peut se demander quelle est la raison de l'absence de dimensions fonctionnelles et d'échelle ou encore de l'incomplétude des dessins dont les conventions sont éloignées des nôtres. Ces problèmes de compréhension du mécanisme pourraient surprendre tout ingénieur d'aujourd'hui suite à l'utilisation d'une sémantique technique ancienne pour laquelle un *dictionnaire temporel* serait nécessaire. Par exemple, nous avons vu dans la description technique du produit PIGUET l'évolution du terme *Bague en caoutchouc* qui est devenu

²⁹⁵ Nous verrons dans le chapitre 5 que l'objet physique doit être considéré comme une source d'archives au même titre que les documents papiers.

Boudin en caoutchouc et qui se désigne désormais par le terme de *Joint d'étanchéité en caoutchouc*.

Ce constat est donc en mesure de poser de nombreuses questions aux historiens des techniques lors de tout travail d'archéologie industrielle avancée. Que restitue-t-on ? Une machine conçue mais qui ne peut pas fonctionner ou ne peut pas atteindre les performances attendues ? Quelles précautions doit-on prendre lors de la restitution ? Comment montrer sur de telles maquettes numériques les incertitudes de restitution afin de ne pas faire passer une fausse vérité auprès d'un public non averti ?

4.5.2 COMPLETUDÉ DE LA DMU EN VUE D'OBTENIR UNE MAQUETTE NUMÉRIQUE DE RÉFÉRENCE : ENTRE DÉTAILS ET ENVIRONNEMENT COMPLET.

Afin de compléter le modèle existant, il serait opportun de définir le degré de précision souhaitée. Tout comme on détermine le grain de la restitution d'un tirage photographique ou la résolution d'un écran par ses pixels, le niveau de détail de la DMU doit être ajusté : les boulons, les ressorts... doivent-ils être représentés ?

Dans cette même optique, la maquette pourra être complétée par son environnement manufacturier. La première étape consisterait à prendre en compte le système de création de la vapeur. En effet, la partie chaudière avec ses raccordements n'a pas encore été étudiée ; le condenseur non plus. La difficulté essentielle réside dans le fait que la chaudière de 1946 n'a pas été sauvée et que plus aucune des chaudières ayant été utilisées avec la machine à vapeur PIGUET n°135 n'existent à ce jour. Pourtant, restituer un process complet nécessite de capitaliser la globalité de la chaîne opératoire : alors pourquoi ne patrimonialiser que la machine à vapeur et pas sa chaudière, sa dynamo ou son alternateur ?

Ainsi, à travers l'utilisation d'un autre module du logiciel CATIA V5, il serait possible de représenter les flux thermiques²⁹⁶. Cette étude représente également un intérêt certain dans le cadre des SPI afin de permettre une validation des capacités de la chaudière, de la machine à vapeur et du système complet.

L'objectif est d'insérer la machine à vapeur au milieu de son environnement afin de la restituer dans un contexte. Grâce à cette mise en situation dynamique d'usage, il pourrait également être envisagé une représentation du fonctionnement virtuel des machines de la scierie qu'elle entraînait : arbres de transmission, poulies, courroies... et/ou des génératrices électriques à laquelle la machine à vapeur était couplée.

Cette représentation permettrait d'étudier et de représenter les flux autres que thermique : flux électriques mais également flux produit intervenant dans la redécomposition

²⁹⁶ Des add-ins pour CATIA V5 existent afin d'étudier les flux thermiques, fluides... c'est le cas de FLUENT. Cependant, ces outils étant destinés à la conception et non à de l'imagerie de synthèse, le résultat s'effectue sous la forme d'équations ou de graphiques (voir partie 3.3.4.3).

du processus engendré par le couplage de ces machines. Exemple : matérialisation et visualisation du flux énergétique et de ces différentes transformations.

Par cette simulation dynamique en usage, il serait ainsi possible, grâce à la CAO et au CFD, de déterminer le rendement mécanique et/ou électrique global du processus industriel.

4.5.3 LA SECURITE DANS LES MUSEES ET LA PERSPECTIVE D'UNE EVOLUTION EN REALITE VIRTUELLE

Tel que conçu à l'origine du *Musée de la vapeur*, le projet repose sur la nécessité de mettre en œuvre des machines statiques ou fonctionnelles à l'échelle 1:1 [COTTE 1999]. Avec un passé riche en rebondissements et une technologie de *pointe*, la machine à vapeur FIGUET devait y tenir une place centrale. Aussi, la décision fut prise de faire réassembler l'objet technique ancien pour qu'il fonctionne à nouveau.

Cependant, après étude socio-technique, nous nous sommes rendus compte qu'il avait été mal entretenu durant sa troisième phase de vie : certaines pièces internes aux mécanismes ont été déformées et sont sûrement devenues fragiles. Une remise en service sans changer les pièces critiques aurait donc été dangereuse pour le public comme pour le personnel du Musée.

Anticiper sur la phase de restauration de l'objet en vue d'un refonctionnement pourrait être une des missions de la modélisation CAO. A travers une étude ergonomique des machines et de l'environnement associé, une analyse des risques en situation d'usage pourrait ainsi conduire à des préconisations quant à l'utilisation de machines fonctionnelles dans le futur *Musée de la Vapeur* de l'ECOMUSEE du CREUSOT-MONTCEAU [SHAHROKHI 2006].

De plus, si la reconstruction s'avère nécessaire, la DMU pourrait fournir la base de refabrication des pièces.

Enfin, au vu de l'avancée des travaux actuels en Réalité Virtuelle²⁹⁷, il est fortement envisagé une visite virtuelle interactive du spectateur autour de la machine :

- Naviguer dans l'usine 3D virtuel dans laquelle la machine fonctionnait originellement : simulation avec lunettes 3D pour navigation passive ou utilisation d'un Sas cube pour une immersion totale du visiteur,
- Combiner la DMU avec la mise en place de retours haptiques pour pouvoir *toucher* virtuellement la machine et ses composants : simulation virtuelle du fonctionnement par le visiteur en actionnant la vis de réglage, en mettant la machine en défaut par l'introduction de corps étrangers dans la tuyauterie détériorant ainsi le cylindre...

Par ailleurs, une restitution sonore de son fonctionnement avec évolution des sons en fonction du déplacement du spectateur dans le monde virtuel serait à étudier. Seule

problématique : comment capturer un son qui n'existe plus suite au démantèlement de la machine et qu'aucune situation contemporaine ne pourrait re-simuler ?

Désormais, c'est dans cette nouvelle perspective que le *Musée de la vapeur* pourrait aboutir. L'utilisation de vestiges de machines ne se ferait qu'à titre d'artefacts inertes : la somme de problèmes comme la mise en sécurité ou l'entretien aurait été considérable.

²⁹⁷ Voir chapitre 3 et sous réserve des modifications suggérées dans le paragraphe 4.5.2 sur la représentation effective de la machine dans son environnement avec ses flux d'énergies, de produits et de process.

4.6 SYNTHÈSE DU CAS D'ÉTUDE

Dans ce chapitre, nous avons étudié un objet technique ancien :

C'est une machine à vapeur conçue en 1860 par Alphonse DUVERGIER, ingénieur ARTS-ET-METIERS. Elle est si performante qu'en 1890, près de 600 machines sont produites et vendues à travers le monde entier. En 1898, quatre exemplaires sont achetés à PIGUET, le successeur de DUVERGIER. Les machines à vapeur sont installées à MONACO pour produire de l'énergie électrique afin d'éclairer le Palais et le casino de MONACO. Mais, en 1917, la compagnie décide changer de technologie et l'une des machines à vapeur revient en FRANCE à MOULINS (03) dans une scierie. Treize ans plus tard, la n°135 déménage encore et parvient dans une autre scierie à LA ROCHE-EN-BRENIL (21) près de DIJON en FRANCE. Couplé à des génératrices électriques, elle fonctionne ici pendant près d'un demi-siècle. Mais en 1977, produire de l'électricité à l'intérieur de sa propre entreprise n'est plus rentable et la machine est démontée puis stockée dans les réserves de l'ECOMUSEE DU CREUSOT-MONCEAU.

L'étude socio-économico-technique effectuée a permis d'enrichir la connaissance de cet objet technique ancien. Associer l'histoire des techniques et la science de l'industrie se révèle donc possible et nécessaire de par l'interaction procurée par les deux disciplines.

L'hypothèse n°1 du chapitre 2 (interopérabilité théorique du GI et de l'HT), validée en théorie par le chapitre 3, est donc désormais également validée en pratique dans ce chapitre 4.

D'un point de vue pragmatique, l'intérêt du virtuel renforce alors l'idée que refaire fonctionner des *machines anciennes* hors de leur *système technique* n'est qu'utopie ! Comprendre le *contexte* d'évolution permet de cerner les inflexions de la technologie en les interprétant dans le langage de la machine pour lequel l'analyse d'un technologue est indispensable. A l'illustration de cette étude de cas, *l'archéologie industrielle avancée* nécessite plusieurs phases : capitalisation → conservation → valorisation.

Comme GINGRAS le suggérait, le cas pratique développé dans ce chapitre 4 valide alors l'hypothèse n°2 du chapitre 3 (interopérabilité pratique du GI et de l'HT).

Cependant, afin de pouvoir considérer *l'objet technique ancien* dans son *système technique complexe* aussi bien contextuel que temporel, les *études historiques* et la *reconception mécanique* doivent se synchroniser.

A ces fins, notre recherche va désormais s'orienter vers la mise en place de deux composantes indispensables à toute démarche produit-processus.

On distingue :

1. Une *sémantique* commune pour décrire le domaine étudié de *l'objet* aussi bien dans ses aspects *internaliste* qu'*externaliste* sur l'ensemble des *étapes* de l'étude → proposition d'un *méta-modèle d'information* dans le chapitre 5 et application dans le chapitre 6,
2. Un *processus* robuste pour conserver l'intégralité des *connaissances* et phaser les *métiers inter-disciplinaires* intervenant dans un projet de *patrimoine technique et industriel* → proposition d'une *méthodologie* dans le chapitre 6 et applications dans les chapitres 6 et 7.

5. VERS UN PROCESSUS FORMALISE ET UN SYSTEME D'INFORMATIONS GLOBAL

Comme démontré à l'issue de l'étude du besoin dans le chapitre 2, notre action de recherche n'entend pas se cantonner au patrimoine matériel ou immatériel mais se propose de *mixer* ces différents domaines avec leurs environnements annexes et connexes. Notre travail s'inscrit donc dans le cadre préconisé par l'UNESCO pour :

La mise en œuvre d'une méthodologie de recherche afin de sauvegarder et valoriser le patrimoine matériel et immatériel à visées technique et industrielle.

Le cas d'étude du chapitre 4 a démontré que les études socio-économiques et historico-techniques ainsi que le travail d'ingénierie numérique sont complètement autonomes. Des problématiques apparaissent en terme de sémantique des classes manipulées et en terme de méthodologie d'application des modèles ontologiques et des outils utilisés²⁹⁸.

Le travail historique classique de monographie a très peu évolué et se propose toujours de relater une histoire vécue... Pourtant, comme l'atteste l'exemple de la machine à vapeur FIGUET, l'analyse des données et des connaissances produites montre que de fortes corrélations peuvent s'induire entre les SPI²⁹⁹ et les SHS³⁰⁰. Il manque donc un guide pour conduire ces études patrimoniales et les enrichir de toutes les informations possibles.

C'est l'objet de ce chapitre 5 dans lequel nous allons, à l'aide de l'exemple déjà traité, construire un modèle de situations d'usages. Cependant, l'archéologie industrielle avancée d'objets techniques anciens fait appel à de nombreux domaines scientifiques comme l'illustre l'état de l'art du chapitre 3. Ainsi, la patrimonialisation du domaine industriel induit une complexité multidimensionnelle aussi bien au temps présent (chapitre 2) que dans le passé (cas d'étude du chapitre 4).

²⁹⁸ Voir annexe 1 sur le langage utilisé en modélisation UML.

²⁹⁹ SPI = Sciences Pour l'Ingénieur

Dans ce chapitre :

1. Nous étudierons dans un premier temps les différentes taxonomies des classes d'équivalence mises en jeu pour caractériser un objet technique ancien dans sa situation d'usage idéalisée.
2. Puis, nous définirons le concept de *schème* afin d'établir les corrélations multi-dimensionnelles et multi-temporelles de la complexité de ces classes.
3. Enfin, nous terminerons ce chapitre par une synthèse de la vision produit-processus de la patrimonialisation d'un objet technique ancien.

Cette ultime étape permettra de construire le Digital Heritage Reference Model qui est appelé à devenir la nouvelle base de référence muséographique.

De plus, nous avons vu dans le chapitre 2 que, aussi bien sur le plan international qu'en FRANCE, de nombreuses structures soutiennent la conservation et la valorisation du patrimoine. Cependant, peu, voire aucune, ne propose une méthodologie de travail en fonction de la typologie d'objets à patrimonialiser. Une exception est faite par l'UNESCO qui propose, à travers son guide [UNESCO 2005], des lignes directrices issues de l'expérience de ses évaluations sur environ un millier de sites très divers de par le monde.

Ces éléments d'appréciations nous permettront de valider l'ensemble de nos modèles ontologiques et ainsi contribuer à une meilleure intégration de la complexité dans la sauvegarde du patrimoine culturel immatériel comme le suggère la Convention de l'UNESCO (article 13 alinéa c [UNESCO 2003]) :

Encourager les études scientifiques, techniques et artistiques ainsi que des méthodologies de recherche pour une sauvegarde efficace du patrimoine culturel immatériel, en particulier du patrimoine culturel immatériel en danger.

³⁰⁰ SHS = Sciences Humaines et Sociales

5.1 ANALYSE DU CAS D'ETUDE DE LA MACHINE A VAPEUR PIGUET N°135 : HYPOTHESE N°3

Dans l'étude de la machine à vapeur PIGUET n°135, plusieurs outils ont été utilisés. Les nombreuses étapes franchies valident ainsi l'hypothèse n°2 de cette problématique de recherche. Les trois stades de transformation de l'objet sont :

1. Digitalisation / Capitalisation des connaissances,
2. Modélisation / Organisation des connaissances,
3. Situations dynamiques - Réalité Virtuelle.

On entend ici par le terme *connaissance* l'intégralité des concepts manipulés lors de la transformation des données en informations puis en connaissances et en compétences [GARDONI 1999]. Ainsi, par extrapolation de la définition du patrimoine immatériel [UNESCO 2003], il s'agit ici de l'ensemble des données matérielles et des archives patrimoniales qui, devenant intelligibles, sont transformées en connaissances. Ensuite, elles subiront à leur tour un autre processus d'exploitation pour être transformées à nouveau en informations, en données ou atteindre un stade plus évolué portant le statut de compétences [BERIO & al 2007]. On notera que tout au long de ce processus de transformation, une complexité supplémentaire apparaît : la problématique confrontant la sémantique du passé et la sémantique du présent. Celle-ci est d'autant plus présente lorsqu'il est question de termes techniques et parfois, un dictionnaire passé-présent serait nécessaire aux technologues.

La figure 95 synthétise cette démarche de l'évolution des connaissances sur le cas d'étude de la machine à vapeur PIGUET n°135. Cette synthèse ne fait pas apparaître les compétences nécessaires pour dérouler ce processus car elles feront l'objet du chapitre 7.

La phase intermédiaire est un nouveau concept que nous proposons de mettre en œuvre dans le cas d'une patrimonialisation d'objets à caractères techniques ou industriels : le *Dossier d'Oeuvre Patrimonial Technique*.

Enfin, de la phase de capitalisation à la phase de valorisation, l'intégralité du processus nécessite d'être guidé par un méta-modèle de données. Le *Digital Heritage Reference Model* permet ainsi d'intégrer l'ensemble des domaines mis en jeu.

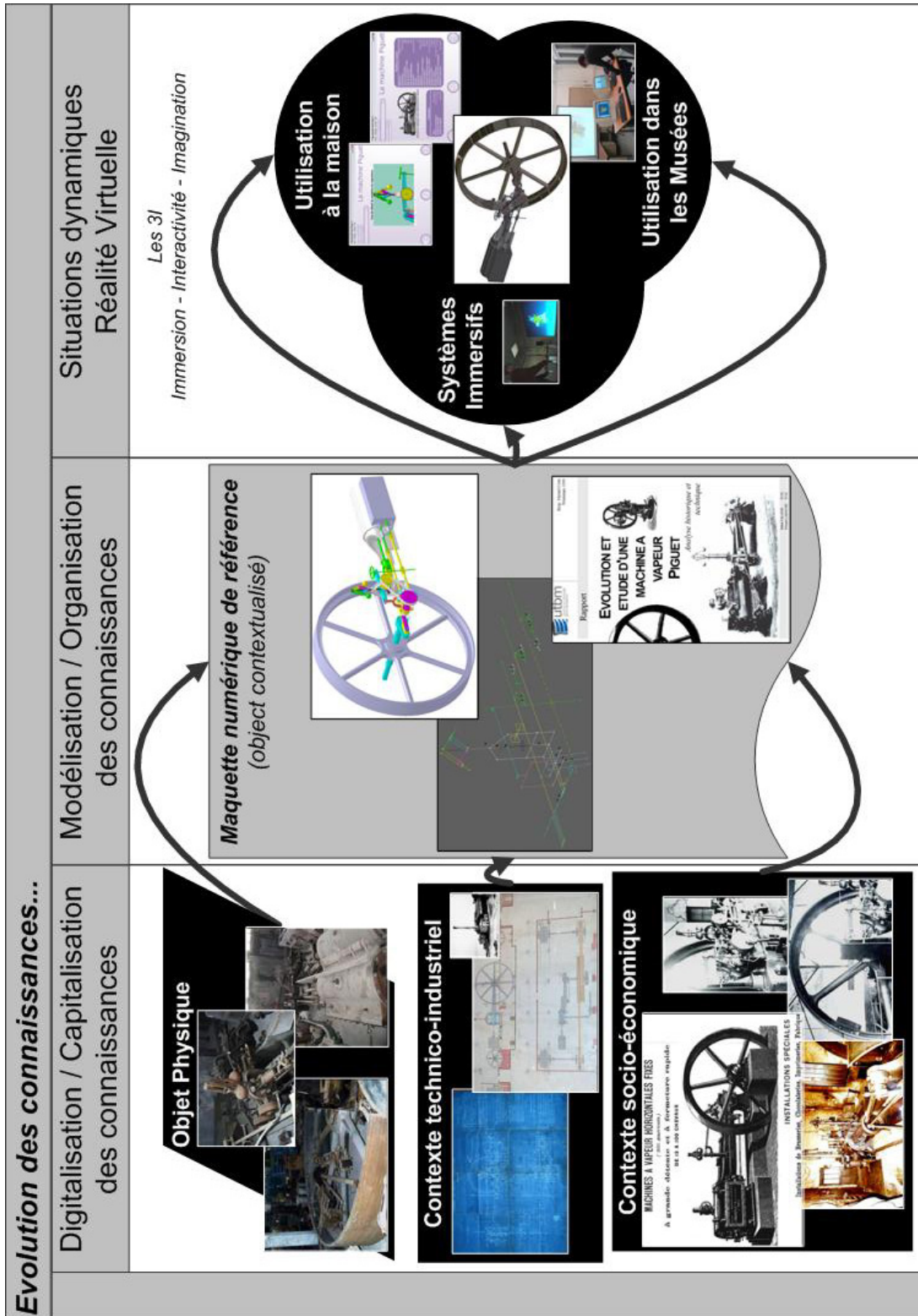


Figure 95 : SYNTHÈSE DE L'ÉVOLUTION DES CONNAISSANCES DU CAS D'ÉTUDE DE LA MACHINE À VAPEUR PIGUET

5.2 VERS UNE METHODOLOGIE GENERALE ET UN DOSSIER D'OEUVRE PATRIMONIAL TECHNIQUE

5.2.1 LE PROCESSUS DE PATRIMONIALISATION

A l'aide de la synthèse de la figure précédente, nous pouvons désormais proposer une modélisation processus globalisante pour capitaliser et valoriser le patrimoine scientifique, technique et industriel. Les trois états et les deux processus sont synthétisés sur la figure 96.

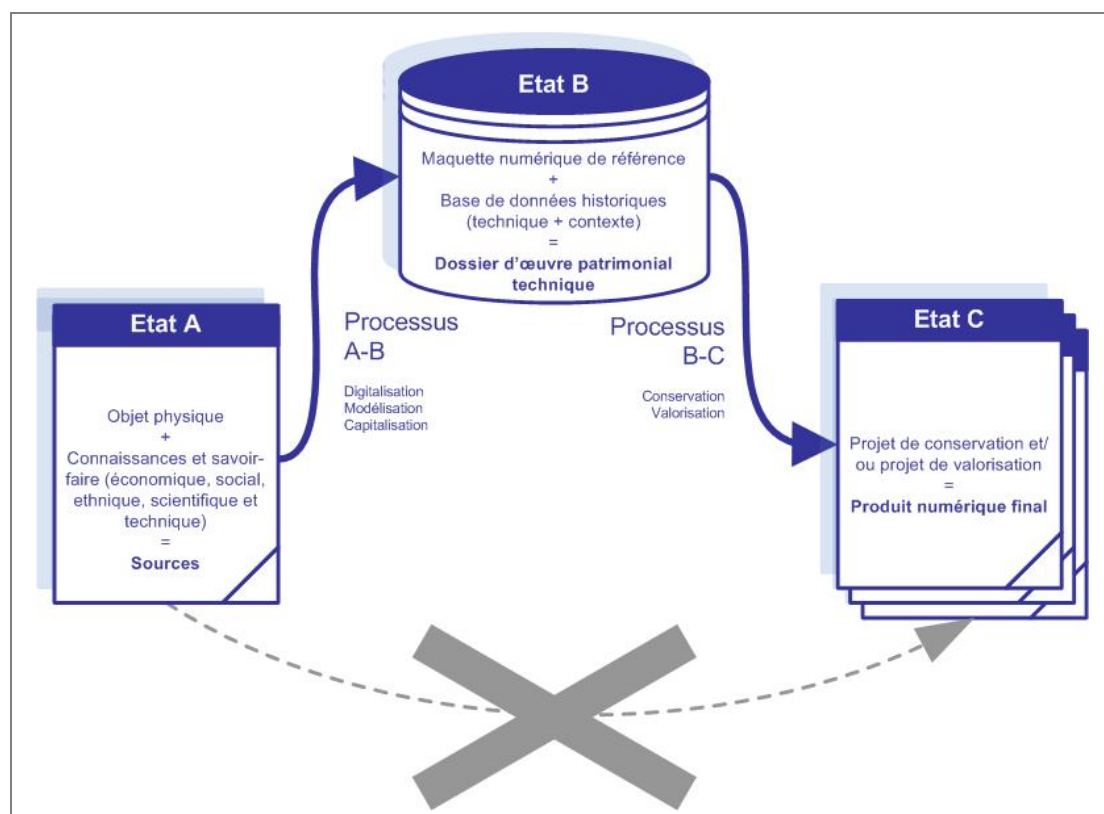


Figure 96 : METHODOLOGIE GENERALE POUR LA CONSERVATION DU PATRIMOINE TECHNIQUE ET INDUSTRIEL

Passer directement de l'état A à l'état C n'est pas recommandé. En effet, les différentes possibilités de finalités de l'état C³⁰¹ démontrent que chaque but encouru fait appel à des connaissances diverses ; de plus, celles-ci peuvent ne pas se recouper entre les différentes finalités. Aussi, il est nécessaire de capitaliser un maximum d'éléments dès le début de la phase d'archéologie industrielle. La production de l'état B consiste en l'implémentation d'un modèle structuré et complet : le *Dossier d'Oeuvre Patrimonial Technique*³⁰².

³⁰¹ Voir partie 5.2.4 ci-après

³⁰² On notera toutefois que le terme *œuvre* n'est pas approprié ici. En effet, une *œuvre* est synonyme d'unicité artistique. Or, un *produit industriel* n'est pas, *a priori*, une *œuvre* : il serait donc préférable d'utiliser le terme *artefact* (voir définition ci-après). A titre d'information, au Canada, les muséologues francophones utilisent couramment la terminologie *Dossier d'artefact* pour renseigner un objet patrimonial. Cependant, afin de s'adapter à la muséologie française, nous conserverons l'appellation *Dossier d'œuvre*.

Les besoins déterminés dans les chapitres 2 et 3 peuvent désormais se traduire par les hypothèses de changement d'états de l'objet distinguant ainsi deux phases principales :

- Le besoin explicite peut se valider par l'hypothèse du processus A-B s'interrogeant sur les moyens et la méthodologie de sauvegarde du patrimoine technique et industriel,
- Le besoin latent, sous-entendu par tous, correspond à l'hypothèse du processus B-C envisageant de nouvelles possibilités de valorisation et d'utilisation de cette nouvelle culture technique du passé.

Dans la suite de cette partie, nous allons détailler ces trois états et analyser les classes d'équivalences manipulées pour chacune d'elles.

5.2.2 ETAT A : LA VUE VESTIGES ARCHEOLOGIQUES INDUSTRIELS

5.2.2.1 Description

La première phase concerne l'acquisition des données. Elle consiste à capitaliser l'ensemble des informations physiques de la *chose étudiée* ainsi que les connaissances et/ou savoir-faire externes connus : connaissances socio-économiques, connaissances technico-industrielles... c'est ce que nous désignons dans une terminologie archéologique par une **trace**. Ainsi, cette nouvelle action de capitalisation franchie, il est obtenu un **corpus** de données non organisé associé à la *chose étudiée* définissant une représentation intermédiaire non encore explicité : ce sont les **sources**.

Il s'agit du travail classique de l'histoire des techniques consistant à regrouper la documentation à caractère technique ou *externaliste*³⁰³. Lors de cette phase, il convient d'établir la liste des données internes et externes en fonction des sources disponibles. Ces sources à caractère historique sont par ailleurs rarement complètes. Elles nécessitent souvent des recoupements, des enquêtes complémentaires sur des machines de la même génération ou de générations voisines, voire des extrapolations.

La première catégorie concerne des plans, des données archéologiques, anthropologiques ou ergonomiques, des restes de machines³⁰⁴... La deuxième catégorie est constituée par des données économiques, sociales, architecturales, paysagères... [LAROUCHE & al 2005c].

Cette capitalisation peut s'effectuer grâce aux techniques de KM comme vu dans le chapitre 3 ; nous incluons dans cette classe d'équivalence **KM** aussi bien les méthodes des SPI que le travail classique de l'HT. Cet ensemble de données matérielles capitalisées est

³⁰³ Il est entendu par externaliste les informations sur le contexte économique et le contexte social de l'objet technique étudié.

³⁰⁴ Dans la suite de ce manuscrit, nous nommerons les restes de machines par des bribes (voir partie 5.2.5.2 ci-après).

généralisé par la classe d'équivalence **traces** qui permettra de définir le **contexte** ; nous détaillerons cet aspect dans la suite de ce chapitre³⁰⁵.

Puis, *a posteriori* ou en simultanément, un travail de numérisation des données, c'est-à-dire de prise de cotes, est à mener. Les premiers outils à utiliser sont bien entendu le pied à coulisse et le mètre à ruban. Cependant, afin de gagner en temps de mesure et afin de pouvoir prendre en charge des machines complexes, la numérisation 3D peut être utilisée grâce à son large éventail d'outils comme nous l'avons présenté dans le chapitre 3 : théodolite à balayage laser, scanner laser 3D avec reconstruction topographique en temps réel³⁰⁶ [SAITO & al 1991]...

5.2.2.2 Synthèse

Reprenons l'ontologie décrivant cette phase **d'archéologie industrielle** telle que nous l'avons initiée à la fin du chapitre 3 lors de la formulation de l'hypothèse de niveau 2³⁰⁷.

Nous utiliserons désormais l'appellation **traces** pour désigner les **données de départ**. En effet, l'objet ayant été atrophié par une non utilisation, son usage ne peut être restitué comme à l'originel, il ne reste donc que des **vestiges archéologiques industriels**. De plus, les machines industrielles ayant pu être détériorées ou détruites en partie, les éléments de travail archéologique ne peuvent prendre en compte la globalité de l'objet. Aussi, les vestiges sont composés de **bribes de l'objet** technique étudié.

Nous incluons également la sous-classe **sources** représentée par les données matérielles et immatérielles dans la classe **traces**. Outre l'objet lui-même, les **sources** sont le témoin de l'existence de ce patrimoine et contribuent à garantir son authenticité³⁰⁸.

La sous-classe **outils** inclut les méthodes de **KM** ainsi que les outils de **numérisation 3D**.

Enfin, *en sus* des deux sous-classes d'équivalence des **outils** et des **traces**, nous rajoutons la classe **homme** tel que définie par extension du triptyque du patrimoine. En effet, pour mettre en forme le fonds de capitalisation, une intervention humaine est nécessaire. La

³⁰⁵ Voir partie 5.3.3 ci-après.

³⁰⁶ Voir chapitre 6 pour la méthodologie de numérisation 3D des objets technico-industrielles

³⁰⁷ Rappel : l'archéologie industrielle avancée est définie par les données de départ (objets+traces) ainsi que les outils archéologiques (KM, numérisation 3D, outils de modélisation/simulation, visualisation d'usages en Réalité Virtuelle).

³⁰⁸ On notera qu'usuellement, les historiens définissent deux types de sources. Les sources primaires comprennent l'objet ainsi que toute les informations s'y rapportant directement et dans le temps de l'action. Les sources secondaires sont les informations indirectes, les commentaires, les informations d'*après-coup* ainsi que toute étude *a posteriori*. Notre proposition de classification diffère donc de cette typologie car elle extrait l'objet technique du corpus documentaire. Elle permet ainsi de réaliser des études, nouvelles pour le champ patrimonial, dont l'objet est le principal sujet.

taxonomie de l'homme mentionnée ci-dessous n'est pas restrictive. En fonction du projet archéologique, les métiers intervenant sur les **données de départ** pourront être étendus. On décline principalement :

- les historiens travaillant sur les **sources**,
- les cognitivistes³⁰⁹ possédant la **méthodologie de KM**,
- les métrologistes réalisant la mesure, à l'aide d'outils manuels ou de la **numérisation 3D**.

L'ontologie de la figure 97 synthétise l'ensemble des classes d'équivalence de cette phase d'**archéologie industrielle**.

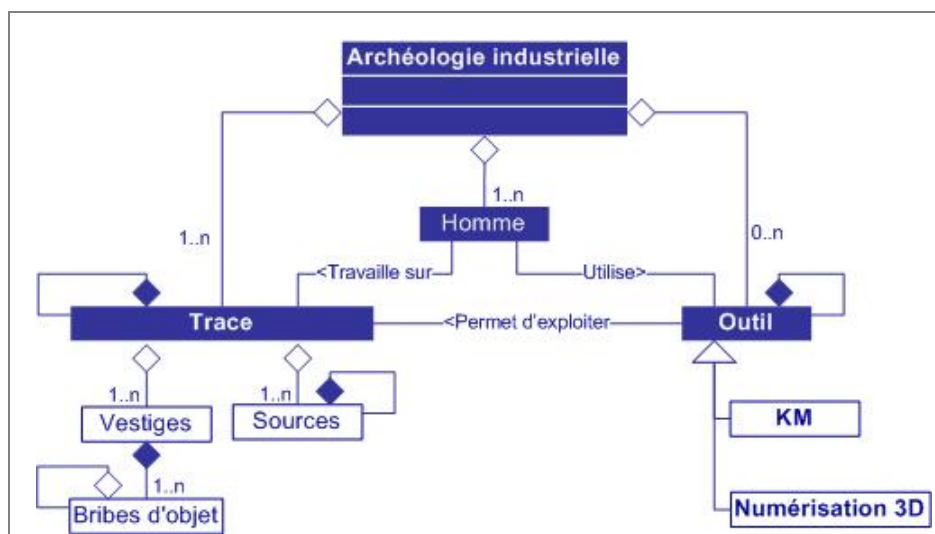


Figure 97 : DIAGRAMME DE CLASSES DE LA VUE VESTIGES ARCHEOLOGIQUES INDUSTRIELS

5.2.3 ETAT B : LA VUE DOSSIER D'OEUVRE PATRIMONIAL TECHNIQUE

5.2.3.1 Description

Les données implicites et explicites ayant été rassemblées, il convient désormais de les organiser, de les étudier et de les inter-relier. Il s'agit ici de la phase de compréhension technique et/ou scientifique de l'objet. Précisons que l'ensemble des informations ayant pu être capitalisées au préalable est la phase indispensable pour mener à bien cette tâche de compréhension et ainsi permettre de construire un modèle numérique complet. En effet, lorsqu'il s'agit d'**objets techniques anciens**, les expériences déjà menées par notre groupe de recherche ont montré que, outre le travail sur l'objet en lui-même à travers une phase de prise de cotes ou de numérisation 3D, l'appréhension de l'objet ne peut se faire que grâce à son contexte et donc à la mise en corrélation des informations et données issues des connaissances extérieures et des enquêtes anthropologiques [LAROCHÉ & al 2006c].

³⁰⁹ Le cognitiviste est l'ingénieur de la connaissance.

L'idée initiale, telle que proposée par notre hypothèse de la définition de l'**archéologie industrielle avancée**, dans la première phase de nos recherches, est d'utiliser les outils numériques pour étudier des machines du passé. Il s'agit alors de produire un objet virtuel qui sera au centre du processus de patrimonialisation : il s'agit d'une DMU³¹⁰. Cette nouvelle représentation intermédiaire de l'objet permettra alors d'être déclinée en plusieurs types de valorisation. C'est pourquoi la DMU devient LA référence ; nous la nommons la **maquette numérique de référence**.

La **maquette de référence** CAO apporte une grande qualité dans la restitution. Elle respecte la géométrie et les dimensions des pièces ainsi que les lois fondamentales de la cinématique et de la dynamique. L'un des apports les plus importants de la **maquette de référence** est la restitution du fonctionnement des machines par le mouvement des pièces et des volumes dans l'espace, dans une très grande fidélité technique. La **maquette numérique de référence** permet de dépasser la question du vieillissement et de l'usure des **objets techniques** en les immortalisant dans leur fonctionnement d'usages.

De plus, une base de données historiques doit être associée à la **maquette numérique de référence**. Cette base sert à la fois de support à la réalisation de la **maquette de référence** mais également à fournir la documentation aussi bien technologique que contextuelle de l'environnement de l'objet technique. Faisant intervenir toutes les données à caractères scientifique, technique et dynamique de la machine, ces **sources** permettent de valider la DMU créée. L'ensemble peut être qualifié de **dossier d'œuvre numérique** et structuré selon un système à base de connaissances tel qu'utilisé contemporanément dans les entreprises [HATON & al 2007].

Un état intermédiaire structuré est donc indispensable pour contenir l'ensemble des informations, des données et des connaissances aussi bien matérielles que immatérielles : c'est que ce l'on appelle, par extension à la définition muséographique du Dossier d'Oeuvre : le **Dossier d'Oeuvre Patrimonial Technique**. Cet état B permet, en lui-même, la gestion des connaissances.

5.2.3.2 Synthèse

Nous pouvons définir une nouvelle ontologie de cette représentation intermédiaire de l'objet pour qualifier la classe d'équivalence **dossier d'œuvre patrimonial technique** (figure 98). La structure est similaire à l'ontologie précédente de l'**archéologie industrielle**. Cependant, cette nouvelle phase faisant intervenir les **outils** du numérique afin, entre

³¹⁰ DMU = Digital Mock-Up

autres, de créer une DMU et stocker la base de connaissances historiques, nous l'appellerons **archéologie industrielle avancée**³¹¹.

On notera toutefois une évolution de la sous-classe **sources** en une nouvelle classe d'équivalence : les **connaissances**. En effet, comme vu au début de ce chapitre à travers l'analyse du cas d'étude de la machine à vapeur PIGUET n°135, la première phase a permis de transformer les **sources** patrimoniales en **connaissances**. Ainsi, une nouvelle relation bijective qui n'existait pas encore lors de la phase **d'archéologie industrielle** se crée entre la sous-classe **maquette numérique de référence** et la sous-classe **connaissances**.

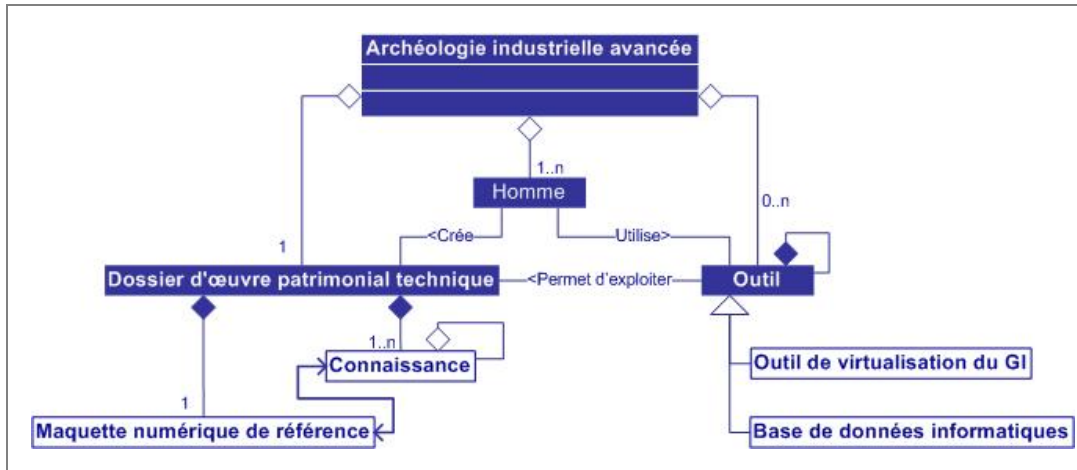


Figure 98 : DIAGRAMME DE CLASSES DE LA VUE DOSSIER D'ŒUVRE PATRIMONIAL TECHNIQUE

5.2.4 ETAT C : LA VUE PRODUIT NUMERIQUE FINAL DE VALORISATION

5.2.4.1 Description

A partir de ce **dossier d'œuvre patrimonial technique**, il est possible de le décliner en différents nouveaux objets intermédiaires de représentations. Plusieurs possibilités d'utilisation de cette maquette à des fins de valorisation sont envisageables (état C) [LAROCHÉ & al 2005d] :

- Sauvegarde en archéologie industrielle : lorsqu'un programme de sauvetage d'objet patrimonial voit le jour, il faut réagir rapidement et sauvegarder un maximum d'éléments avant que ceux-ci ne soient détruits,
- Reconstruction : réalisation d'une maquette physique de l'objet³¹²,
- Thésaurus virtuel : il s'agit de réaliser une bibliothèque numérique de machines,
- Utilisation didactique pour experts ou universitaires : outre une exploitation pédagogique des maquettes numériques d'objets anciens, il est également possible d'envisager une

³¹¹ Voir la définition de l'*archéologie industrielle avancée* dans l'hypothèse 2 (partie 3.5).

³¹² Voir partie 3.4.1 de ce manuscrit.

réutilisation de ces connaissances dans un cadre industriel pour innover en incrémental ou en rupture,

- Valorisation muséographique pour tout type de public : avec utilisation des outils audiovisuels ou des technologies de RV³¹³.

Ainsi, la démarche de valorisation de l'objet technique ancien permet de boucler le processus en proposant au public, grâce à l'état C, de pouvoir naviguer dans l'état B et d'accéder aux informations de l'état A.

Cependant, nous n'étudierons pas dans ce manuscrit les détails de ces différentes finalités de valorisation. Celles-ci sont illimitées et ne représentent pas l'objectif de cette problématique de recherche. En effet, si le **dossier d'œuvre patrimonial technique** est complet, tout type de valorisation est envisageable. Aussi, dans la suite de ce chapitre, nous axerons le travail de modélisation conceptuelle sur la première phase de capitalisation.

5.2.4.2 Synthèse

L'ontologie de cette phase de valorisation se structure également comme les ontologies des phases précédentes. L'ontologie de la figure 99 détaille cette nouvelle représentation intermédiaire de **l'objet technique ancien** étudié : c'est la classe **produit numérique**. Cette terminologie n'est pas restrictive et laisse ainsi la possibilité à de nombreuses finalités. La taxonomie du **produit numérique final** comprend deux classes :

- **L'artefact** : ce terme, fortement utilisé par les conservateurs de Musées, détermine une représentation de l'objet. De plus, il s'agit d'une visualisation partielle de l'objet car l'objet réel n'existe plus dans son état d'origine.
- **L'hypertexte**³¹⁴ : il s'agit de pouvoir restituer les données accumulées et connaissances produites. Il a la capacité de permettre la compréhension et la restitution de l'objet dans son contexte. Dans un cadre muséographique, l'hypertexte remplace les étiquettes pour lesquelles le choix du contenu est toujours très délicat : faut-il mettre une simple légende, un descriptif de l'objet, raconter une histoire... ? Pour espérer être lu, l'étiquette doit se limiter à 50 mots : n'est-ce pas une notion restrictive de la valorisation de connaissances ? Ainsi, à l'opposé, le numérique tend à mettre à la disposition de tous l'intégralité du corpus descriptif de l'objet, c'est cette définition de l'hypertexte que nous utiliserons.

³¹³ RV = Réalité Virtuelle

³¹⁴ Voir partie 3.4.2.3 de ce manuscrit.

La taxonomie de la classe **homme** inclut deux catégories globalisantes :

- Les **émetteurs** : ce sont les personnes réalisant les projets de valorisation muséographique,
- Les **récepteurs** : ce sont aussi bien les élèves lors d'une utilisation didactique, que les experts et le grand public.

De même, afin de ne pas restreindre les possibilités de valorisation et au vu de l'avancée rapide des technologies, nous ne détaillerons pas la classe **outils**. D'une manière générale, il est simplement possible de distinguer deux catégories :

- Les **outils créateurs** des produits numériques,
- Les **outils restitueurs** des produits numériques.

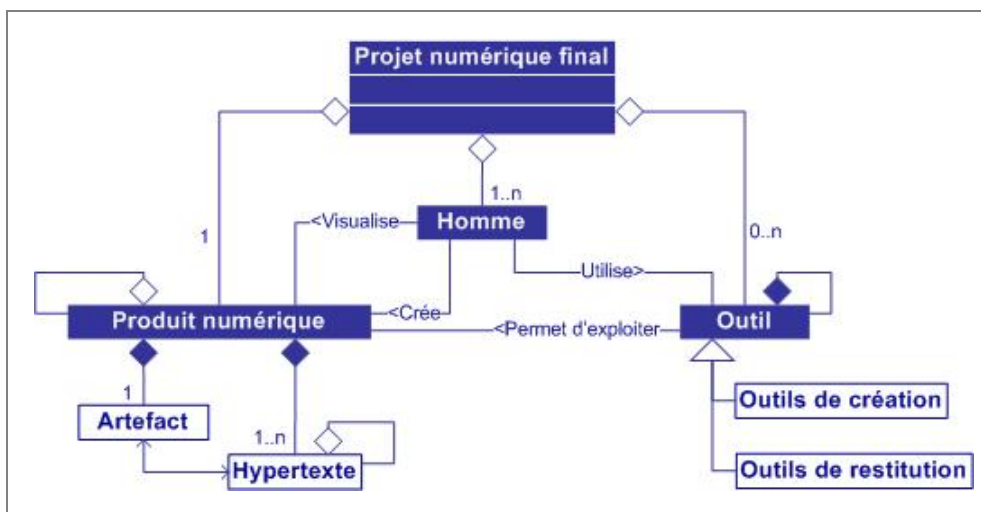


Figure 99 : DIAGRAMME DE CLASSES DE LA VUE PRODUIT NUMERIQUE FINAL DE VALORISATION

5.2.5 SYNTHÈSE DES ÉTATS DU PROCESSUS DE PATRIMONIALISATION

La figure 100 propose de coupler la méthodologie générale pour patrimonialiser un **objet technique ancien** avec les ontologies décrivant ses différentes phases.

Il est ainsi possible de tracer l'axe temporel du processus de patrimonialisation (de gauche à droite).

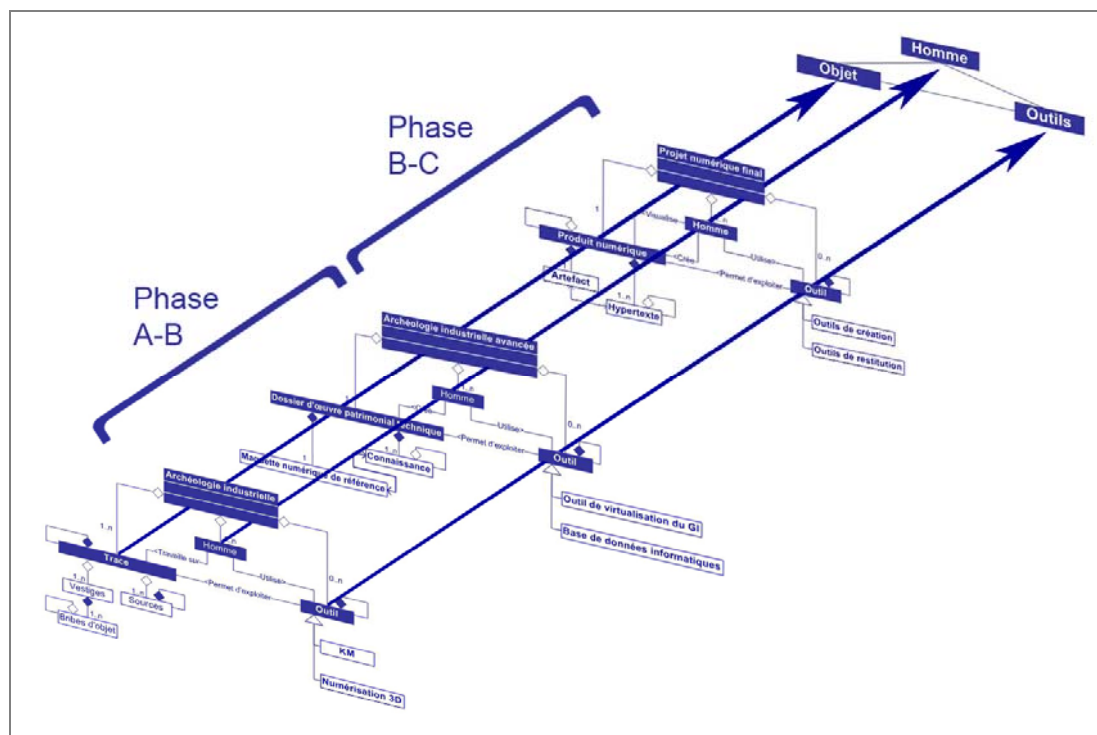


Figure 100 : REPARTITION TEMPORELLE DES REPRESENTATIONS INTERMEDIAIRES DU PROCESSUS DE PATRIMONIALISATION NUMERIQUE

Les structures ontologiques des phases étant les mêmes, il s'agit en fait de différents usages permettant des représentations intermédiaires. On distingue alors une situation d'usage générique utilisée lors du processus de patrimonialisation (figure 101).

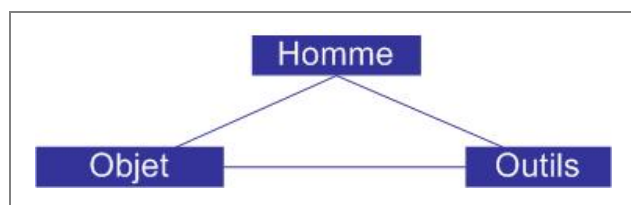


Figure 101 : LA SITUATION D'USAGE GÉNÉRIQUE LORS D'UNE ACTIVITE DE PATRIMONIALISATION NUMERIQUE

Cette ontologie se compose de trois classes d'équivalence. Chaque classe possède une taxonomie propre dont les composants sont issus des différentes phases :

- La classe **outils** a été développée dans l'état de l'art du chapitre 3.
- La classe **homme** ne sera pas détaillée ici afin de ne pas restreindre les possibilités et les champs d'application de la démarche.
- La classe **objet** est définie comme l'objet d'étude du processus de patrimonialisation. Celle-ci nécessite en revanche d'être analysée.

Associer cette *situation d'usage générique* avec la *méthodologie de patrimonialisation numérique* conduira à créer un méta-modèle ontologique orienté *produit et processus* comme nous le concluons à l'issue de ce chapitre 5. Cependant, nous devons d'abord définir l'objet technique ancien étudié.

5.2.5.1 L'objectum : entre les professionnels et les amoureux du patrimoine

*Pourquoi cet objet est beau ? Pourquoi n'est-il pas beau ?
Pourquoi j'aime bien cet objet ? Pourquoi je ne l'aime pas ?*

Ces interrogations, nous nous les posons souvent et ce, quelle que soit la situation. Mais s'il est question de patrimoine et plus précisément s'il est question de patrimoine technique et industriel, comment pouvoir justifier qu'une vieille machine soit belle et qu'il faut la conserver ? Tout est une question de référentiel propre à chacun, de ressenti... mais également de temps et de moyens disponibles par la structure de conservation.

Considérant le point de départ du processus de patrimonialisation, les fondements de ce processus reposent sur cette notion difficile à formaliser. En effet, lorsqu'un objet tend à disparaître, nombreux sont ceux qui sont prêts à tout pour le sauvegarder. Dans quel but ? Pour quelle finalité ? Aucune réponse ne peut être fournie et personne ne sait l'expliquer mais tout le monde s'accorde pour dire que l'objet doit être préservé. En réalité, ceci s'explique par l'émotion que l'objet procure ou a procuré :

- pour ceux l'ayant côtoyé dans leur vie professionnelle ou leur vie quotidienne ou personnelle,
- parce qu'il s'agit d'un objet appartenant à notre histoire pouvant être un symbole clef de notre développement,
- ...

L'appellation la plus appropriée pouvant être donnée à ce ressenti est celle de la définition latine du mot objet³¹⁵, il nous affecte sentimentalement et le rend, par conséquent, inexplicable : c'est *l'objectum*.

Objectum = ce qui est placé devant ou chose qui affecte les sens.

Cependant, notre démonstration pour nommer *l'objectum* doit être nuancée avec les missions des professionnels de la culture et du patrimoine.

En effet, c'est avant tout par les valeurs patrimoniales de sa signification historique qu'un objet est estimé. D'une manière générale, comme c'est le cas des expertises réalisées pour l'UNESCO, une étude approfondie doit faire apparaître trois niveaux :

1. La valeur esthétique de l'architecture générale et des paysages ainsi que la relation **Objet / Homme** incluant la communauté locale, la mémoire...
2. La valeur historique de l'argumentaire de conservation présentée par les Etats Partis quant à l'intégration et la compréhension de l'objet.
3. La valeur significative exceptionnelle sur un plan universel au regard d'études comparatives de la macro-histoire.

³¹⁵ Source : *Le grand robert de la langue française*, Volume 4, pp. 2043-2046

Malgré tout, comme le *coup de cœur* décrit précédemment est réservé ordinairement aux non-initiés, tout expert du patrimoine n'est jamais indifférent face aux objets du passé, témoins de l'évolution de notre société.

L'**objectum** est le premier objet intermédiaire représentatif de l'origine du processus de patrimonialisation.

5.2.5.2 Une transformation d'objets intermédiaires

Ainsi, nous considérons l'objet patrimonial étudié comme un objet possédant plusieurs états intermédiaires. Les évolutions de ces états sont conditionnés par un axe temporel : celui du temps du processus de patrimonialisation.

La figure 102 présente les 4 états et les 3 actions traduits de la méthodologie générale.

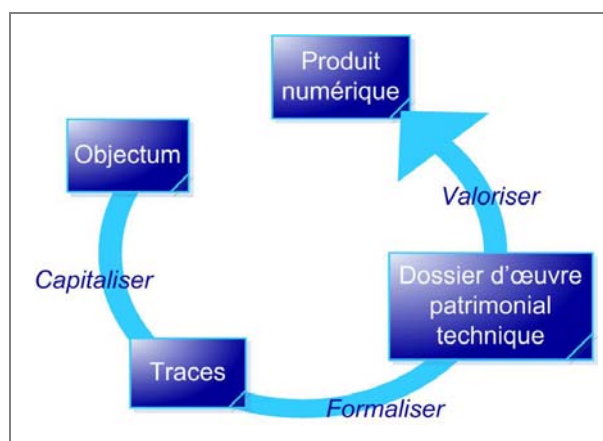


Figure 102 : L'OBJET PATRIMONIAL : UNE TRANSFORMATION EN DIFFERENTS ETATS INTERMEDIAIRES

A chaque état de la classe **objet**, nous avons vu précédemment que des sous-classes sont manipulées. Le tableau de la figure 103 synthétise l'intégralité des éléments mis en jeu dans le processus de patrimonialisation et identifie les sous-classes d'équivalences concernées.

	Phase	Action	Etat	Sous-classes manipulées	
0			Objectum	Vestiges	Archives
1	Capitalisation / Acquisition	Archéologie industrielle	Traces	Bribes	Sources
2	Interprétation / Formalisation / Modélisation / Stockage	Archéologie industrielle avancée	Dossier d'œuvre patrimonial technique	Maquette numérique de référence	Connaissances
3	Exploitation / Valorisation	Projet numérique de valorisation	Produit numérique	Artefact	Hypertexte

Figure 103 : SYNTHÈSE DES ÉLÉMENTS MANIPULÉS LORS DU PROCESSUS DE PATRIMONIALISATION NUMÉRIQUE

La phase 0 est mentionnée dans le tableau à titre indicatif. La définition de la classe **objectum** fait émerger de nouvelles problématiques de recherche à mener en sociologie.

Or, cette réflexion n'étant pas au cœur des domaines concernés ici, nous ne la détaillerons pas par la suite.

Une représentation temporalisée, comme précédemment établie pour le processus de patrimonialisation, met en exergue une relation hiérarchisante des deux classes manipulées pour définir l'objet d'étude (figure 104). Ces classes ne forment en réalité qu'un seul et même **objet** possédant des **états** différents. Il ne s'agit donc pas d'une classe d'association ordinaire mais d'une relation temporelle permettant de définir une lecture ontologique pour une période donnée. Cette notation est mentionnée dans la suite de nos diagrammes de classes par une flèche sans origine ni fin, inclinée à 45°, sur la relation entre deux classes d'équivalence (et ce, quel que soit la relation : taxonomie, composition, agrégation, relation simple).

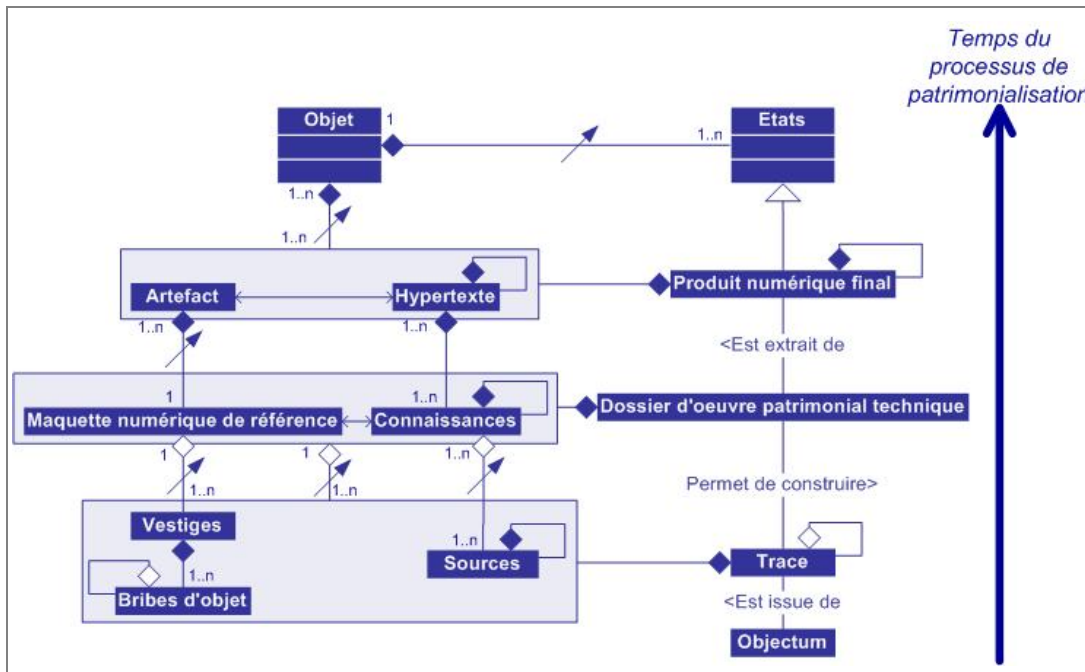


Figure 104 : ONTOLOGIE TEMPORELLE DECRIVANT L'OBJET ETUDIE

On notera qu'une relation d'agrégation et non de composition joint la sous-classe **vestiges** et la sous-classe **maquette numérique de référence**. En effet, dans le cadre d'un travail **d'archéologie industrielle avancée**, il se peut qu'un projet de patrimonialisation émerge pour un objet n'existant plus ne présentant ainsi plus aucun **vestige**. Aussi, c'est uniquement grâce à certaines typologies de **sources** qu'il sera possible de comprendre **l'objet** et de créer la DMU. Ce fut le cas de l'exemple cité précédemment sur l'automobile de Léonard de Vinci³¹⁶. Aussi, une relation d'agrégation relie les données de départ et son modèle virtuel fonctionnel traduit dans un langage contemporain.

³¹⁶ Voir partie 3.3.4.4

Le lien relationnel de complémentarité bijective entre *l'objet numérique* et ses données/*connaissances* intervient à partir du *dossier d'œuvre patrimonial technique*. Comme précisé dans la partie 5.2.3.2 ci-avant, c'est l'intelligibilisation des *sources* qui va créer les connaissances immatérielles et ainsi permettre à *l'objet* de prendre le statut *d'objet patrimonial* en répondant aux critères d'authenticité et d'intégrité de l'UNESCO [UNESCO 2005]. L'ontologie de la classe *patrimoine industriel* décrite dans la partie 2.1.5 prend alors tout son sens. Nous reviendrons sur cette définition dans la suite de ce chapitre au paragraphe dédié à la notion de *contexte*.

5.2.5.3 Le modèle d'usage générique du processus de patrimonialisation

Afin de globaliser les multiples transformations intermédiaires de l'objet étudié, nous avons, dans cette partie de chapitre, analysé conceptuellement les données à manipuler. Les infrastructures ontologiques de chaque phase sont identiques et manipulent les mêmes classes d'équivalence mais à des états différents : chaque représentation est dirigée par le facteur temps.

Au bilan, il se déduit un nouveau modèle d'usage qui se base sur celui défini en début de chapitre auquel il est rajouté la notion de temporalité. L'ontologie de la figure 105 décrit le modèle d'usage générique guidant l'activité de patrimonialisation *d'objets techniques anciens*.

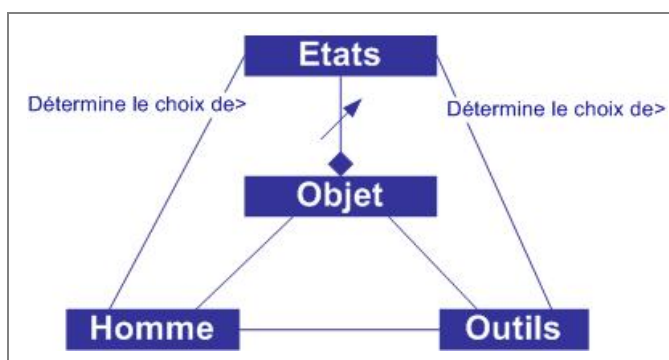


Figure 105 : MODELE D'USAGE GENERIQUE DU PROCESSUS DE PATRIMONIALISATION

Remarquons que, grâce à la relation temporelle établie entre les classes *états* et *l'objet*, *l'état* va permettre d'instancier les classes *hommes* et *outils* en déterminant ainsi les besoins liés à la phase d'*archéologie industrielle avancée*.

5.3 L'OBJET TECHNIQUE ANCIEN IDEALISE AVANT PATRIMONIALISATION

Dans la vue processus développée dans la partie ci-avant, nous avons mis en exergue le facteur temps. Celui-ci intervient dans la définition des modes de représentation intermédiaire des **objets techniques**. Les ontologies générées pour chaque phase décrivent alors un modèle d'usage générique de la démarche de patrimonialisation.

Cependant, il convient de coupler cette vision processus à une vision produit. Comme démontré dans le chapitre 2, l'objet technique ne prendra son attribut **patrimoine industriel** que si celui-ci est contextualisé. Or ce sont les **données de départ** qui sont à l'origine de la contextualisation patrimoniale. Une description du domaine ontologique des **traces** est donc nécessaire. Ainsi, par propagation des caractéristiques et des attributs de la taxonomie temporelle de la classe **objet**, l'ensemble des représentations intermédiaires³¹⁷ contribuera à patrimonialiser **l'objet**.

Aussi, arrêtons-nous sur la classe **objet** dans son état **traces** et donc dans la temporalité de **l'objet** juste avant que celui-ci ne devienne **patrimoine**. Notre hypothèse, comme illustrée par la figure 106, propose de définir la classe **objet** par ses multiples dimensions de description infrastructurale, architecturale et temporelle.

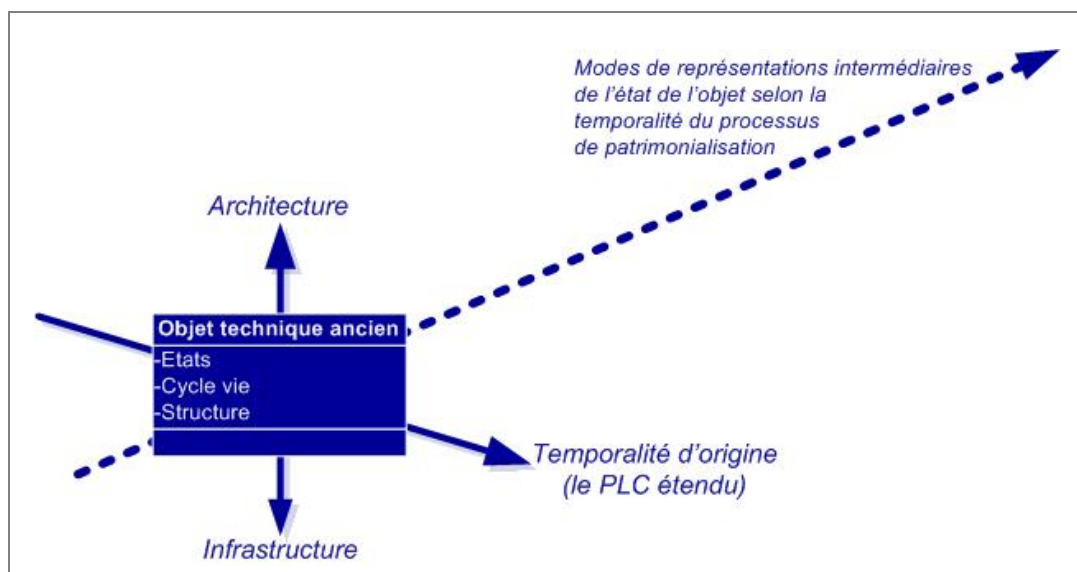


Figure 106 : HYPOTHESE D'UN OBJET TECHNIQUE ANCIEN A MULTI-NIVEAUX SELON DES DESCRIPTIONS INFRASTRUCTURALE, ARCHITECTURALE ET TEMPORELLE

Dans cette partie de chapitre, nous tenterons de définir ce qu'est un **objet technique industriel ancien** dans un cadre patrimonial à la lumière des études et des réflexions sociologiques ainsi que des connaissances mises en jeu grâce au KM. Nous allons tout d'abord analyser un objet dans son aspect *internaliste*. Puis, nous étudierons la contextualisation de **l'objet** grâce aux **sources**.

³¹⁷ Voir partie 5.2.5.2

5.3.1 L'OBJET TECHNIQUE DANS SON CARACTERE INTERNALISTE

5.3.1.1 Définition et aspect fonctionnel

L'objet pris dans son caractère intrinsèque, du point de vue géométrique, est un élément fini, déterminé et limité. Mais l'objet pris dans son contexte ne peut être considéré comme un élément fini et déterminé, tout comme les objets intermédiaires [VINCK 2004], il fait partie d'une dynamique, d'un processus global. L'objet technique tel que nous le considérons ici, est un objet réel remplissant une **fonction**.

De plus, d'une manière générale, nous avons vu précédemment que les conservateurs de Musées préfèrent utiliser le terme d'artefact. En effet, le temps ayant pu dégrader l'objet, celui-ci n'est plus comme à son état original lors de sa phase d'utilisation et prend, par conséquent, un autre statut : celui **d'artefact**.

*Définition d'artefact*³¹⁸

Vient du latin artis factum = fait de l'art. Phénomène d'origine humaine, artificielle ; produit de l'art ou de l'industrie humaine

C'est pourquoi dans le triptyque du patrimoine³¹⁹, nous avons préféré utiliser le terme d'artefact à celui d'objet ; l'artefact possédant en lui-même une taxonomie d'utilisation en phase de valorisation dont l'objet physique est un des composants. Le biologiste Jacques MONOD définit l'artefact comme suit [MONOD 1970] :

Tout artefact est le produit de l'activité d'un être vivant qui exprime ainsi, et de façon particulièrement évidente, l'une des propriétés fondamentales qui caractérise tous les êtres vivants sans exception : celle d'être des objets doués d'un projet qu'à la fois ils représentent dans leurs structures et accomplissent par leurs performances (telles que, par exemple, la création d'artefacts).

L'artefact est la conséquence d'une action, d'un évènement ou d'une pensée émanant exclusivement de l'humain. La production artistique peut conduire à la création d'un artefact où celui-ci est au cœur du processus, il représentera la finalité de la création.

L'industrie humaine peut, elle aussi, se finaliser en une production. L'**artefact**, dès lors appelé **objet**, est qualifiable et quantifiable. Il est de l'ordre du réel et possède une **structure physique** et une **fonction**³²⁰.

L'objet peut être pensé de la structure vers la fonction ou de la fonction vers la structure [LABROUSSE 2004]. Ici réside la différence essentielle entre la production artistique et la production de l'industrie humaine (la pensée fonctionnelle). L'artefact considéré comme art pourra, en outre, ne pas posséder de **fonction**. A l'inverse, l'industrie humaine pensera en

³¹⁸ Source : *Le grand robert de la langue française*, Volume 4, pp. 814

³¹⁹ Voir partie 2.1.2

³²⁰ On notera que la fonction est souvent associée à la notion de performance en GI. Ce qui n'est pas le cas pour un objet dit patrimonial !

priorité la fonction et adaptera la **structure** en conséquence ; les designers utilisant souvent cette devise [CPNI 2004] :

La forme suit la fonction.

5.3.1.2 Les caractéristiques

L'humain, de façon innée et dans une situation de normalité individuelle et sociale, tendra vers la perfection intrinsèque pour s'adapter au mieux à son environnement [SIMONDON 1989]. Il allie alors la **forme** et la **fonction** de l'artefact en créant une **structure** physique fonctionnelle. D'un point de vue rationnel, les éléments composants cette **structure** physique fonctionnelle présentent plusieurs **caractéristiques** :

- **caractéristiques géométriques** liées à la **structure physique** issue de la pensée humaine : points, lignes, courbes, surfaces et volumes selon trois dimensions,
- **caractéristiques géométriques** liées à la **fonction** : points, lignes, courbes, surfaces et volumes selon trois dimensions,
- **caractéristiques techniques** liées à la **fonction** et à la **structure**. Il s'agit ici de la mécanique interne avec, par exemple, les matériaux déclinant les propriétés physiques et chimiques. Ce peut également être le cas de la couleur qui peut être associée aux propriétés chimiques si celle-ci intervient à la source primaire du matériau ou si elle est normalisée comme un élément extérieur répondant à une **fonction**,
- **caractéristiques dites esthétiques**. Elles n'interviennent et n'influent pas dans la caractérisation de l'objet mais viennent en compléter les définitions. Elles peuvent être d'ordre géométrique ou technique par un choix sans justification rationnelle du matériau (physique et chimique).

5.3.1.3 La structure interne

Reprenant une typologie de type fractal, les éléments caractéristiques de l'objet donnés dans la définition de l'artefact présentent une **structure** à plusieurs échelles :

- **l'atome** = élément de base avec son nuage électronique apte aux liaisons chimiques et à l'ionisation,
- **la matière** = agrégat d'atomes formant des molécules ou des cristaux ; assemblage atomique, ionique ou moléculaire présentant des propriétés physique et chimiques liées à ses constituants élémentaires : **les atomes**,
- **l'élément constitué** = composé de matière selon une géométrie définie : les caractéristiques géométriques élémentaires,
- **l'assemblage d'éléments (objet inerte)** = répondant à la **fonction** définie par l'humain : les caractéristiques géométriques et techniques,
- **l'assemblage d'éléments (objet en mouvement)** = répondant à la **fonction** définie par l'humain : les **caractéristiques géométriques** et les **caractéristiques techniques**.

5.3.1.4 Aspect dynamique

A ce stade de *l'objet*, celui-ci est structuré, caractérisé et fonctionnel.

Ainsi, en plus de ses multi-vues, l'objet possède également une variable interne de temporalité. La classe **temps** sera représentée par son **état** dans le cas d'une description *internaliste* de *l'objet*. En effet, à l'exception de la production artistique, il est souvent remarqué que la production humaine ayant pour origine une **fonction** initiale en sera détournée quelque peu ou aura des conséquences non souhaitées suite à la **structure** qui lui en aura été donnée³²¹ [LABROUSSE 2004].

Dans le cas de notre problématique de recherche sur les **objets techniques anciens**, nous reprenons les classes citées précédemment mais en associant la notion de **dynamique** à la classe **caractéristiques** et à la classe **fonction**.

5.3.1.5 Synthèse : modèle d'usage fonctionnel internaliste de l'objet technique ancien

L'ontologie de la figure 107 synthétise notre approche de *l'objet technique ancien* dans son aspect *internaliste* et pour un statut en *usage*.

Désormais, il ne s'agit plus de la classe **artefact** comme proposé dans la définition de *l'objet* mais de la classe **objet technique ancien** ; les attributs de cette dernière classe étant plus riches sémantiquement que la classe **artefact**³²².

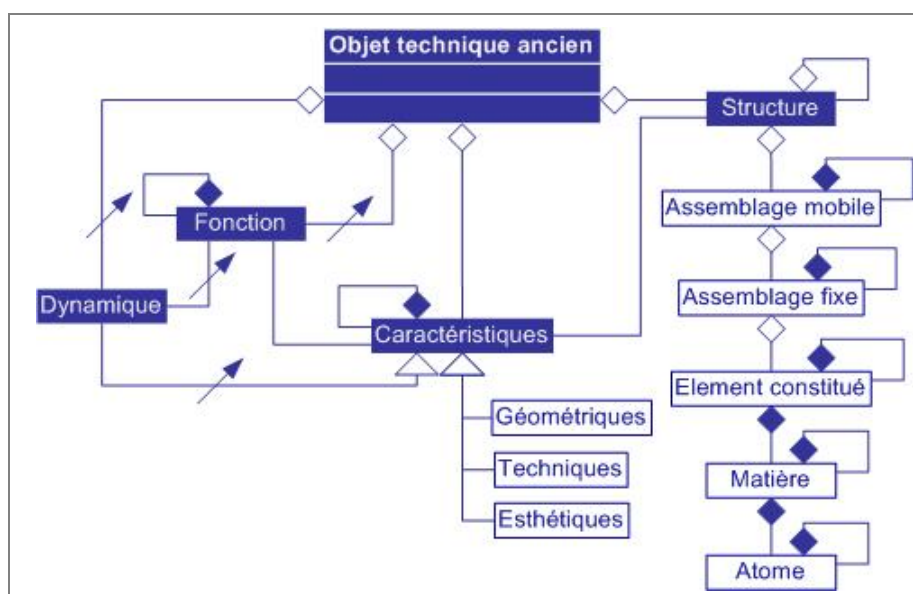


Figure 107 : MODELE D'USAGE GENERIQUE DE L'OBJET DANS SON CARACTERE INTERNALISTE

³²¹ Voir chapitre 6

³²² Voir partie 5.2.4.2

Dans notre champ d'étude, la numérisation 3D aura pour objectif de capturer la **structure** de l'objet dans ses aspects **géométriques**. Mais, lors d'un travail **d'archéologie industrielle avancée**, les **sources** viennent compléter les **caractéristiques techniques, esthétiques et dynamiques**. Il est alors possible d'en déduire la **fonction** de l'objet. Les aspects **dynamiques et fonctionnels** sont donc dirigés par le **temps** fonctionnel de l'objet et vont ainsi statuer sur ses différents états en usage.

Cependant, nous avons vu au début de ce chapitre que la phase **d'archéologie industrielle** induit une taxonomie des **traces** selon les **sources** et les **vestiges archéologiques de l'objet technique**. L'objet étant parfois détérioré, celui-ci n'est donc plus dans son état originel d'usage. C'est une des raisons d'être de la classe **structure** permettant alors de représenter les **bribes d'objet**. Ainsi, en fonction des **bribes** retrouvées, certaines sous-classes de la **structure** peuvent être présentes et d'autres non.

La mise en corrélation de l'ontologie des **états de l'objet** avec celle de **l'objet technique** permet alors de guider une partie de la phase de transformation des **vestiges archéologiques** en un **dossier d'œuvre patrimonial technique**. La figure 108 implémente les liaisons entre ces deux ontologies : les **états** alimentent **l'objet technique ancien** et réciproquement.

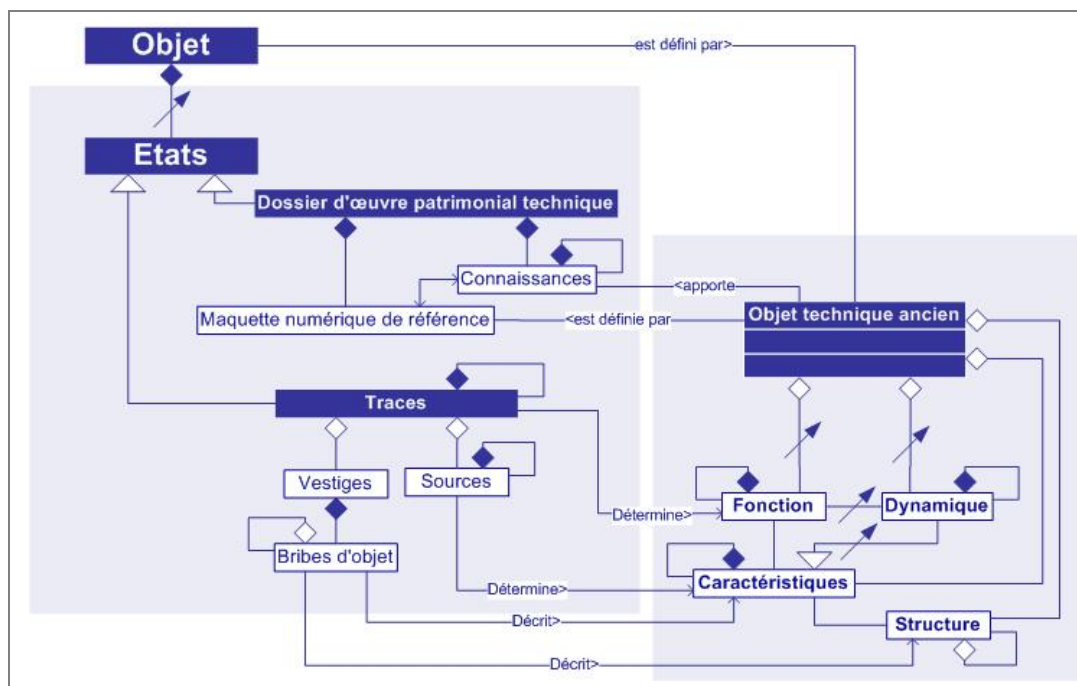


Figure 108 : TRANSFORMATION DES VESTIGES ARCHEOLOGIQUES EN OBJET TECHNIQUE

5.3.1.6 Validation du modèle

Ainsi, l'ontologie précédente permet de valider en partie les conditions d'authenticité spécifiées par l'UNESCO dans le paragraphe 82 du *Guide d'orientations pour la mise en oeuvre de la Convention du patrimoine mondial* [UNESCO 2005] :

- forme et conception, les critères sont à valider par les classes **structure** et **caractéristiques**,

- matériaux et substance, les critères sont à valider par la classe **caractéristiques**,
- usage et fonction, les critères sont à valider par les classes **fonction** et **dynamique**.

Pour les derniers attributs d'authenticité, la validation doit être effectuée par d'autres classes d'équivalence que nous allons détailler par la suite. En effet, la description ontologique de ce domaine n'est que la première partie de la phase de transformation patrimoniale : elle statue uniquement pour l'instant sur l'objet dans son caractère internaliste. Or un objet patrimonial technique est défini par un patrimoine matériel et un patrimoine immatériel³²³, la transformation des **sources** en **connaissances** va également participer à la construction du modèle d'usage de **l'objet technique ancien** idéalisé avant patrimonialisation.

Dans la suite de cette partie, nous allons détailler les classes d'équivalence intervenant dans la description externaliste de **l'objet technique ancien**.

5.3.2 QUEL OBJET POUR QUEL USAGE ?

5.3.2.1 Les usages des objets techniques dans leur état d'origine

La discrétisation de l'objet vue précédemment va plus loin que de simples considérations géométriques et techniques : il peut y être associé les conséquences de sa création aussi bien sur l'humain que sur l'environnement. La définition courante présente l'objet comme une chose solide ayant unité et dépendant de son usage. Il peut être :

- Un objet matériel, hétéroclite, de pesanteur, de forme, matière, grandeur,
- Un objet fabriqué, à saisir, à acheter, à manier,
- Un objet à ranger, à classer par catégories, à énumérer, à reconnaître, à identifier, à nommer,
- Un objet naturel et artificiel, manufacturé, intégré dans un système d'objets, associé à un usage personnel ou de grande consommation.

Cette classification reprend les catégories proposées par le Ministère de la Culture aux Musées de FRANCE lorsqu'ils doivent établir les fiches d'inventaire de leurs objets. La liste la plus exhaustive correspond aux définitions ethnologiques des objets domestiques telles qu'il l'est prescrit aux Musées des ARTS ET TRADITIONS POPULAIRES [de VIRVILLE & al 1977] :

- Luminaire, pour l'éclairage artificiel : matériaux, supports et accessoires,
- Foyer-chaleur : allumage du feu, les feux d'âtre, les producteurs ou dispensateurs de chaleur,
- Alimentation : les aliments et leurs traitements,
- Entretien : essentiellement le linge,

- Fabrication-textile,
- Linge de maison,
- Métrologie,
- Contenants,
- Mobilier,
- Dévotion : objets évoquant une religion ou coutume,
- Bibelots-souvenirs,
- Ages-de-la-vie : objets présentant un caractère idéologique ou fonctionnel commémorant une ou différentes étapes de la vie de leurs propriétaires.

Du côté du Gouvernement français, depuis 1986, l'Inventaire général a mis en œuvre un programme de repérage national du patrimoine industriel qui recense et étudie tous les lieux de production qu'ils soient en activité ou non. Cette opération est actuellement menée dans 18 régions de France et considère aussi bien les bâtiments industriels que les machines de production. Les informations recueillies font l'objet de dossiers et de notices informatisées ; cette documentation est mise à disposition par le biais des bases de données MERIMEE et PALISSY³²⁴. Cependant, lorsque la base est interrogée sur le contenu de son patrimoine industriel, scientifique et technique, seuls les éléments des catégories suivantes ressortent :

- bateaux,
- trains et locomotives,
- voitures anciennes,
- instruments scientifiques ou techniques.

En terme de sauvegarde et de finalité muséographique, ROLLAND-VILLEMOT classe les objets techniques anciens en cinq types de collections [ROLLAND-VILLEMOT 2001] :

- les collections scientifiques (objets illustrant l'histoire d'une discipline),
- les collections techniques (la recherche technique en tant que démonstrateur ou transmetteur de savoir-faire),
- les collections industrielles (représentant une branche de l'industrie avec la chaîne opératoire complète de transformation de la matière première en produit fini),
- les collections concernant le transport et les communications,
- le patrimoine de l'industrie, entendu de manière générale, qui réunit tout ce qui d'une manière ou d'une autre est lié à l'industrie : bâtiments, archives, mémoires, savoir-faire, machines...

³²³ Voir chapitre 2 : la définition du patrimoine technique et industriel selon l'UNESCO.

³²⁴ <http://www.mediatheque-patrimoine.culture.gouv.fr>

5.3.2.2 Classification

D'une manière générale, sont sauvegardés les objets des listes précédentes car ils sont facilement transportables ou esthétiquement corrects. Mais tout ce qui semble un peu compliqué à patrimonialiser ou qui n'est pas *beau* n'est pas pris en compte. Essayons d'élargir cette typologie des objets techniques anciens en analysant les usages pour lesquels ils sont ou ont été destinés.

Jocelyn de NOBLET propose de classer les objets à caractère technique, scientifique et/ou industriel selon trois catégories [de NOBLET 2005] :

1. les objets de la vie courante que l'on possède (les objets domestiques),
2. les objets de la vie courante que l'on utilise mais que l'on ne possède pas,
3. les objets que l'on n'utilise pas, que l'on ne possède pas mais qui sont indispensables à la création et/ou l'utilisation des objets de la vie courante.

Exemple : 1 → la voiture personnelle / 2 → le train / 3 → le transformateur électrique alimentant les catenars.

Les deux premières catégories sont donc celles usuellement traitées par les Musées et l'Inventaire des Monuments Historiques³²⁵. Les objets que l'on n'utilise pas sont généralement associés aux transports³²⁶. Cependant, en tant que technologue et historien, il est de notre devoir de pointer les objets issus de la création de l'homme qui sont peu ou pas connus du grand public mais qui s'inscrivent dans la genèse d'une technique plus connue³²⁷. Ainsi, la dernière catégorie de De NOBLET représente les objets industriels manufacturés mais également les machines industrielles leurs permettant d'être créés. C'est sur cette typologie d'objets techniques que notre travail de recherche se base. André LEROI-GOURHAN propose la répartition suivante [LEROI-GOURHAN 1943] :

1. l'outil manuel qui relève du domaine de l'artisanat (exemple : marteau, scie),
2. la machine automatique (exemple : les perceuses),
3. la machine-outil (exemple : le tour),
4. l'outil programmé (exemple : le métier jacquard),
5. l'outil automatique (exemple : le robot assembleur),

Le métier jacquard³²⁸ est l'ancêtre de l'ordinateur. En effet, nous sommes en 1943 et LEROI-GOURHAN ne connaissait pas encore les nombreux changements qui allaient s'effectuer dans la typologie des objets qu'il a prescrit. Malgré tout, la courbe de progression reste la même et c'est ce concept de complexité du Système Technique que nous retiendrons.

³²⁵ Comme vu dans le chapitre 2 sur les prescriptions quant à la sauvegarde du patrimoine, cet inventaire ne couvre pas que l'architecture. Il intègre également les objets ou artefacts permettant de compléter la contextualisation de l'œuvre classée.

³²⁶ Voir ci-avant le contenu des inventaires du Ministère de la Culture.

³²⁷ Voir chapitre 6 sur l'exemple du canot à vapeur de la DCNS site d'INDRET (44).

³²⁸ Dans le domaine des automates se développant depuis le 16^{ème} siècle, le mécanicien français Joseph Marie JACQUARD construit en 1801 un métier à tisser la soie entièrement automatique dont la programmation est assurée par des cartes perforées.

5.3.2.3 Généralisation : le concept des poupées russes

Pour illustrer la complexité multidimensionnelle internaliste, externaliste et temporelle des objets techniques, Bruno JACOMY déclare [JACOMY 1994] :

Robots, automates, machines-outils sont de la même famille, celle des êtres artificiels créés par l'homme pour le seconder ou l'imiter. [...]
La machine est devenue, que nous le voulions ou non, une compagne dont nous ne pourrions guère nous passer : celle qui, aujourd'hui, me permet de taper ce texte, celle que nous utilisons pour nous assister dans nos tâches quotidiennes, celles qui, aussi, ont pris notre place dans les usines, les laboratoires, les ateliers. [...]
La machine n'existe que grâce à – ou à cause de – l'homme. L'homme a créé, depuis les premiers outils qui lui ont permis de le seconder, des machines toujours plus performantes, plus complexes. Le sens que nous donnons à la machine est très large, tout simplement parce que tous les êtres artificiels sont au fond, de même nature...

Dès lors, comment catégoriser les objets techniques ?

Les objets techniques sont présents à toutes les échelles de notre vie, dans chaque société et dans tous les usages comme le stipule LEROI-GOURHAN.

Selon le point de vue de l'historien, l'analyse du contexte dit industriel est axée sur trois niveaux de détails :

1. premièrement la machine,
2. deuxièmement l'atelier et son bâtiment,
3. troisièmement l'usine.

En terme de systémique, cette hiérarchie s'explique par le fait que la machine est incluse dans l'atelier qui est lui-même inclus dans l'usine : c'est le *concept des poupées russes* comme l'illustre la figure 109.

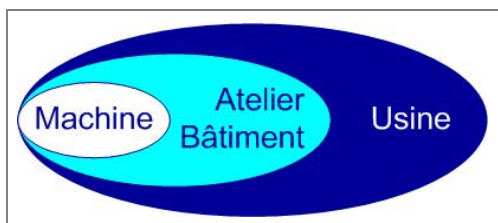


Figure 109 : LE CONCEPT DES POUPEES RUSSES

L'archéologie industrielle peut aussi bien étudier l'objet technique manufacturé ou l'objet technique manufacturé³²⁹, que ce dernier soit de type machine ou de type usine. Faisant ainsi varier le niveau d'échelle, on distingue deux extrêmes représentant les deux axes opposés de cette dimension :

³²⁹ On entend ici par objet manufacturé l'objet fabriqué et par objet manufacturé l'objet créant l'objet manufacturé.

- Le détail le plus petit possible, visible à un niveau macroscopique. Il s'agit de la partie interne sous-jacente à une structure matérielle, elle compose ***l'infrastructure*** de l'objet.
- Une vision d'ensemble la plus large possible. Il s'agit de la structure d'organisation, c'est ***l'architecture***.

Que l'objet industriel soit analysé dans son aspect infra ou archi, il possède donc une structure commune. L'étude va tout d'abord placer le curseur à une position (n) pour analyser une infrastructure (n) dans son architecture (n) ; puis, le curseur est déplacé à une position (n+1) pour étudier une autre infrastructure (n+1) dans son architecture (n+1). Il en découle une relation associative de type *parents-enfants* où le système est à échelle réglable. On notera qu'ainsi, les attributs de l'architecture vont se propager dans l'infrastructure ; et *vice-versa*.

Cependant, ce niveau multidimensionnel est plus complexe car il fonctionne sur la base d'un système pyramidal. En effet, par exemple, si le domaine de l'architecture considérée est l'atelier, alors l'infrastructure pourra posséder plusieurs enfants, donc plusieurs machines.

Cet exemple est illustré graphiquement par la figure 110.

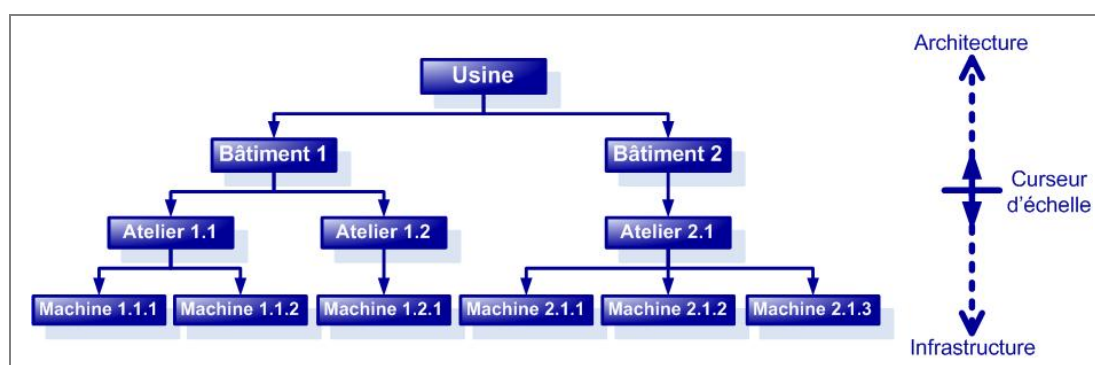


Figure 110 : EXEMPLE DE NIVEAUX MULTIDIMENSIONNELS D'OBJETS TECHNIQUES ANCIENS

5.3.2.4 Synthèse : le concept des boîtes noires / boîtes blanches

Ce concept de niveaux multidimensionnels a été abordé dans le chapitre 2 lors de la réalisation de l'ontologie de description du ***patrimoine industriel***. Cette classe d'équivalence était alors nommée ***typologie*** de ***l'objet technique ancien***.

Or nous avons vu précédemment que la description *internaliste* de ***l'objet*** incluait également une classe ***structure***. Celle-ci répond également à ces niveaux multidimensionnels mais à l'échelle de l'objet.

Nous pouvons ainsi fusionner ces deux classes d'équivalence sous l'appellation ***typologie structurante*** des ***objets techniques anciens***.

La ***typologie structurante*** des objets techniques anciens se décompose donc en deux sous-classes : ***l'infrastructure*** et ***l'architecture***. Outre l'héritage qui les rattache à la classe ***typologie structurante***, dans le cas d'un objet pris à un instant temporel donné, une relation d'agrégation les unie.

Par exemple, la relation *père-fils* couramment utilisée en UML est un cas particulier de la **typologie structurante**.

L'ontologie de la figure 111 définit cette nouvelle classe d'équivalence.

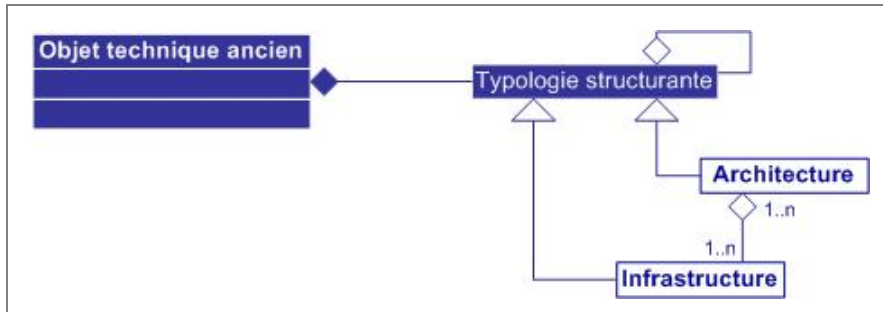


Figure 111 : POSITIONNEMENT DES CLASSES OBJET TECHNIQUE ANCIEN ET TYPOLOGIE STRUCTURANTE

Tout comme nous avons introduit une notation de simplification pour renseigner une notion de temporalité entre deux classes manipulées, nous proposons d'utiliser une autre notation appropriée pour mentionner une relation de multidimensionnalité. Une double flèche sans origine ni fin, inclinée à 45° et positionnée sur la relation entre deux classes d'équivalence, renseigne alors sur la nature multi-dimensionnelle du lien relationnel (et ce, quel que soit la relation : taxonomie, composition, agrégation ou relation simple). Ainsi la lecture graphique des diagrammes de classes peut en être simplifiée.

Dans le cas de l'ontologie précédente, la figure 112 illustre cette simplification de représentation de la classe **typologie structurante**.

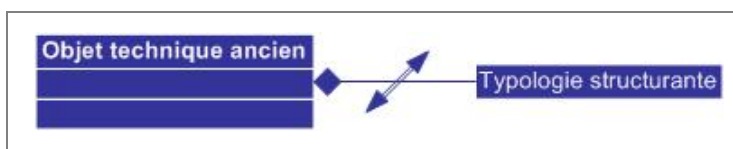


Figure 112 : POSITIONNEMENT SIMPLIFIE DES CLASSES OBJET TECHNIQUE ANCIEN ET TYPOLOGIE STRUCTURANTE

Cependant, dans le cas où l'objet technique est étudié selon les paramètres de la phase de *formalisation*³³⁰, une dichotomie apparaît dans la structure de l'objet : il s'agit du *concept des boîtes noires et des boîtes blanches*.

Prenons l'exemple de la téléphonie. En 1830, le premier télégraphe des frères CHAPPE se compose de tours positionnées sur deux points culminants : une pour l'émission et une pour la réception. En 1858, MORSE reprend ces deux composants à travers son télégraphe électrique. Jusqu'à cette période, la communication est effectuée en mode asynchrone. Mais suite aux travaux du français BOURSEUL, BELL invente le premier appareil téléphonique en 1876. Dès lors, la communication est synchrone car chaque interlocuteur possède un

appareil identique possédant deux composants indépendants et essentiels au fonctionnement : l'émetteur (le microphone) et le récepteur (écouteur). Ces deux composants sont associés dans une *boîte blanche* pour laquelle on connaît ses constitutants. De nos jours, un téléphone est considéré pour son usage. Outre les fabricants, plus personne ne se soucie de la décomposition du *combiné* en éléments simples. Plus aucune différenciation n'est effectuée sur les deux éléments que BELL séparait à l'époque : il s'agit désormais d'une *boîte noire* où tout est intégré.

Ce concept des *boîtes noires/boîtes blanches* est souvent source d'interrogations dans l'étude d'objets techniques anciens. Dans la périodisation concernée, certaines données étant floues, les concepteurs/utilisateurs posaient des postulats ; c'était pour eux une *boîte noire*. De nos jours, les équations permettent de valider ces dires et ainsi d'affiner les calculs : nous détaillons donc l'ensemble des éléments, il s'agit d'une *boîte blanche*. Mais les boîtes peuvent également être réversives : la *boîte blanche* dans le passé et la *boîte noire* dans le présent car les théories sont désormais acquises et ne nécessitent plus de justification. Exemple : parler de masse ou de poids est équivalent, l'équation $P=m.g$ n'est plus à justifier car admise.

Le concept des *boîtes noires/boîtes blanches* est donc l'encapsulation de la relation entre la classe *infrastructure* et la classe *architecture*. Ce concept se représente donc par la classe **typologie structurante** et se traduit par une relation de temporalité entre ses deux sous-classes (figure 113). Dans le chapitre 7, nous illustrerons ce concept des *boîtes noires/boîtes blanches* par le cas d'étude du Canot à vapeur de 1861.

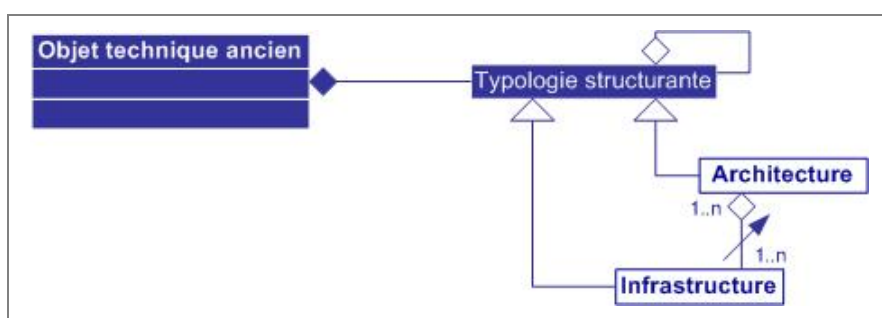


Figure 113 : LIEN TEMPOREL ENTRE L'ARCHITECTURE ET L'INFRASTRUCTURE DE LA TYPOLOGIE STRUCTURANTE

De plus, dans le cas d'une reconstruction de *l'objet*, il sera possible de récupérer certains composants structurels de *l'objet technique ancien*. Les composants appartiendront donc à plusieurs états des modes de représentations intermédiaires de *l'objet*. Un lien de temporalité est alors nécessaire entre *l'architecture* et *l'infrastructure* de la *typologie structurante* de *l'objet technique ancien*. Pour des raisons de simplification du domaine ontologique, on utilisera uniquement un lien temporel : si le curseur temps est placé au présent, alors le lien simple se justifie également.

³³⁰ Voir tableau de synthèse de la partie 5.2.5.2

Enfin, on notera également un lien avec la **raison d'être** établie dans la partie 2.1.3.3 de ce manuscrit lors de la définition du **patrimoine industriel**.

Au bilan, cette gestion de la diversité des **typologies d'objets** se synthétise par l'ontologie de la figure 114.

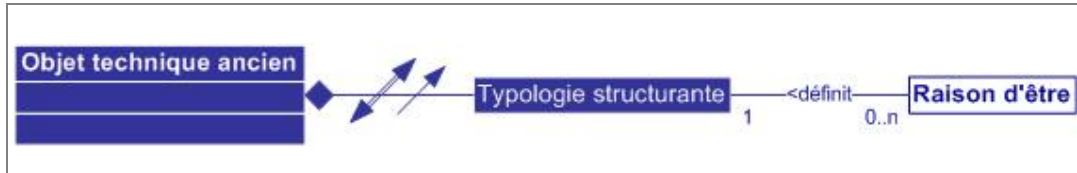


Figure 114 : LES NIVEAUX MULTIDIMENSIONNELS DE LA TYPOLOGIE DES OBJETS TECHNIQUES ANCIENS

Avant toute démarche de capitalisation de connaissances techniques anciennes, il conviendra donc de s'interroger sur le **domaine d'activité** de **l'objet** dont il est question et sur la **typologie** de la machine. Cet ensemble définit alors un **usage** de l'objet qui permettra de simplifier la démarche de recherche de **traces** ou **d'informations**.

5.3.3 UN OBJET DANS SON ENVIRONNEMENT : DESCRIPTION DE SES CONTEXTES MULTIDIMENSIONNELS ET MULTI-TEMPORELS

Nous allons voir dans cette partie qu'un objet possède une deuxième *peau*. Après avoir analysé **l'objet technique ancien** dans son caractère *internaliste*, nous l'étudions ici dans son aspect *extérieure* mettant ainsi en exergue la notion de **contexte** liée aux **sources**.

Nos premières réflexions nous amènent à établir une comparaison de l'encapsulation des *connaissances* décrivant un **objet technique ancien** avec la définition de la *sémiotique*. Cette théorie des signes a été développée par les philosophes américains au début du 20^{ème} siècle [MORRIS 1938].

La *sémiotique* est l'étude des signes et de leur signification. Elle étudie la façon dont le cerveau produit, communique et codifie la signification. Elle concerne tous les types de signes ou de symboles : les mots, les gestes, les sons, les concepts, les idées ou les pensées... Trois sous-domaines la définissent :

- la *syntaxe* qui étudie la façon dont les morphèmes libres (les mots) se combinent pour former des syntagmes (nominaux ou verbaux) pouvant mener à des propositions, lesquelles peuvent se combiner à leur tour pour former des énoncés,
- la *sémantique* qui étudie les signifiés,
- la *pragmatique* qui s'intéresse aux unités linguistiques dont la signification ne peut être comprise qu'en contexte.

CANDLOT reprend ce concept dans ses travaux de doctorat. Il l'adapte à sa théorie du triangle sémiotique mais déforme ainsi la définition même de la hiérarchisation de la notion

de sémiotique [CANDLOT 2006]. L'utilisation du concept de la *sémiotique* est plus adaptée aux **objets techniques anciens**. Il permet de cerner *l'objet* dans son intégralité en mettant en corrélation les connaissances le définissant. Cette encapsulation de la *sémiotique* reprend le concept des *poupées russes*. La métaphore de *l'objet technique ancien* par la taxonomie de la *sémiotique* est illustrée par la figure 115.

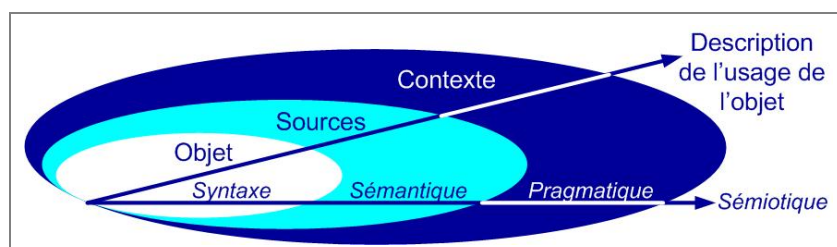


Figure 115 : LA METAPHORE DE LA SEMIOTIQUE AU PATRIMOINE INDUSTRIEL

Après avoir analysé la *syntaxe* de l'objet dans la partie précédente, nous allons étudier ici la *sémantique* et la *pragmatique* de *l'objet*. Les *contextes* de *l'objet technique ancien* seront ainsi déduits grâce aux *sources*.

5.3.3.1 Les sources du patrimoine technique et industriel

Comme vu dans la partie 3.2.2 de ce manuscrit, de nombreuses sources sont utilisées en *archéologie industrielle* pour comprendre un système socio-technique.

Les méthodes utilisées pour capitaliser et organiser ces connaissances ne sont pas formalisées mais sont toujours similaires. De plus, dans le cas où il serait souhaité de faire une étude technique précise d'un objet, la méthodologie devra prendre en compte le système global l'entourant. Dès lors, les outils de la conception peuvent apporter une réponse à cette problématique : transposer les méthodes de capitalisation des connaissances au domaine de la sauvegarde du patrimoine industriel et technique. Pour ce faire, la nouvelle démarche de capitalisation de connaissances techniques *anciennes* peut être initiée à partir des méthodes existantes : MOKA, MKSM, REX, MEREX, KADS, méthode des lignées, des antagonistes... [AMIDON 2002] [DIENG-KUNTZ & al 2001] [ERMINE & al 1996] [MICADO 2002]

Ces méthodes prennent appui sur un corpus de *données* que nous nommons par la classe d'équivalence *sources*. Un *corpus de sources* est défini comme un recueil de pièces ou de documents concernant une même discipline. Il doit être délimité car, sinon, il devient inopérant comme le stipule le linguiste Roland BARTHES [BARTHES 1974] :

Le corpus : quelle belle idée ! A condition que l'on veuille bien lire dans le corpus le corps : soit que dans l'ensemble des textes retenus pour l'étude (et qui forme le corpus), on recherche, non plus seulement la structure, mais les figures de l'énonciation ; soit qu'on ait avec cet ensemble quelque rapport amoureux (faute de quoi le corpus n'est qu'un imaginaire scientifique).

Les archives techniques, les plans et les descriptions de machines sont des documents particulièrement fragiles en tant qu'archives, sur la longue durée. Ils sont souvent les premiers à disparaître. Quand ils sont conservés, ils comportent des **informations** essentielles et nécessaires à la compréhension de ***l'objet technique ancien***. Plus le temps passe et plus il deviendra difficile de bien comprendre ces documents, surtout si l'objet technique ne leur est pas associé³³¹. Comme vu en synthèse du cas d'étude PIGUET, ces sources posent des problèmes de langage pour lesquels un dictionnaire passé-présent serait nécessaire aux technologues. Aussi, elles sont souvent confiées à des spécialistes avertis de l'histoire des techniques mais qui ne sont pas pour autant les mieux indiqués pour comprendre les subtilités techniques.

Les collections photographiques, les films et les enquêtes ethnologiques, les documents sonores sur le travail industriel sont également des éléments documentaires importants. On peut par exemple citer les grands fonds photographiques industriels comme le fonds SCHNEIDER au CREUSOT, le fonds ALSTOM–SACM à BELFORT, le fonds HENNEBIQUE à l'IFA à PARIS... Ces documents sont généralement utilisés pour des approches d'esthétique du patrimoine, d'architecture ou d'émotion du témoignage. Ils sont encore insuffisamment exploités sur le plan technique. Et pourtant, ils sont susceptibles d'apporter des **informations** nombreuses et capitales à la compréhension de ***l'objet technique ancien***, notamment sur les conditions d'implantation et d'utilisation des machines dans leur environnement.

De plus, compte tenu de l'échelle de temps couverte par ces archives, on constate que les dimensions sociale, économique et administrative ressortent plus clairement que la dimension strictement technologique. Ces **sources** décrivent le **contexte socio-économique**.

Dans le chapitre 3 sur l'état de l'art, nous avons déjà listé un nombre important de **sources**. La **forme** sous laquelle sont mises à disposition ces connaissances peut être de **natures** différentes :

- Documents écrits,
- Enquêtes ethnographiques orales,
- Photographies...

Le **fond** définit des catégories principales permettant d'enrichir la compréhension de l'objet technique selon une échelle multidimensionnelle. Les **sources** présentent donc également une structure à multi-niveaux enrichissant ***l'objet*** aussi bien à un niveau ***internaliste*** qu'à un niveau ***externaliste***. C'est ce que les historiens nomment le plan de **classement**. Il répond en général à la **typologie structurante** de l'objet étudié. Ainsi, la machine à vapeur PIGUET n°135 a pu aussi bien être analysée dans sa description technologique que dans ses contextes socio-économiques.

³³¹ Voir le concept des boîtes noires / boîtes blanches ci-après dans ce chapitre.

L'analyse de ses **sources** permet de changer *l'état de l'objet étudié* en transformant les **données** et les **informations** en **connaissances** (figure 116).

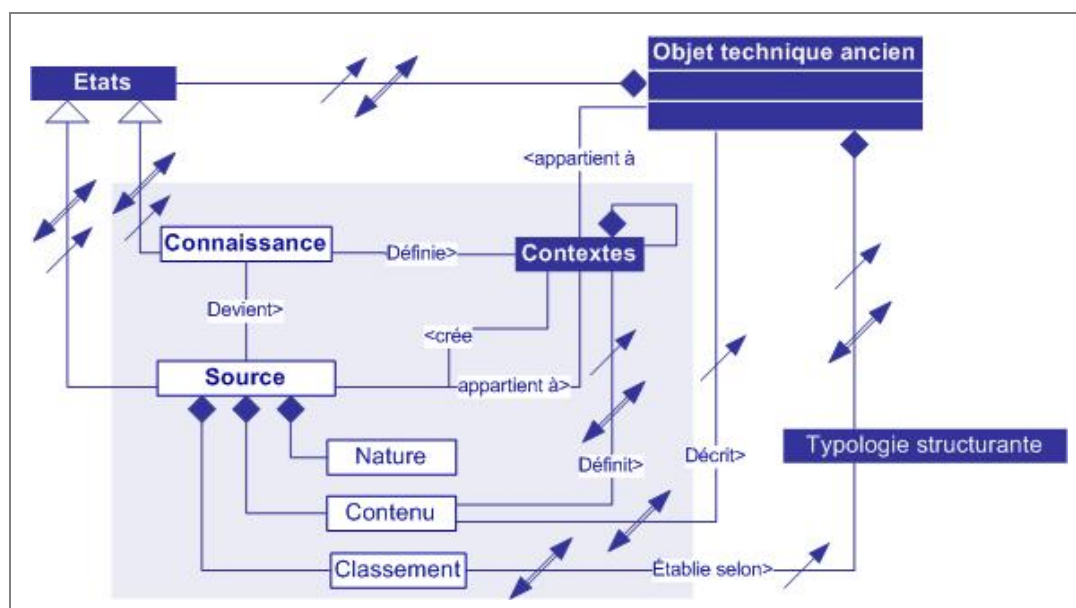


Figure 116 : LES LIENS SOURCES-CONTEXTE

Une description de l'ensemble des **sources** ne peut être exhaustive et il serait limitatif de prétendre à en établir une liste standard. La recherche de **sources** réside dans la capacité à pouvoir décrire l'intégralité de *l'objet technique ancien* dans ses multiples dimensions :

- *Dimension structurelle*, ce sont les *multi-contextes* de *l'objet technique ancien*,
- *Dimension temporelle*, c'est la description du *cycle de vie du produit*.

Implémentons l'ontologie précédente avec ces nouvelles notions que nous allons tout d'abord expliquer.

5.3.3.2 Un contexte à multi-niveaux pour les objets techniques anciens

Nous avons vu précédemment que le concept des poupées russes induit une **typologie structurante** de l'objet technique. Nous pouvons donc définir que :

Une machine est conçue selon une technologie précise, construite et utilisée pour un but déterminé. Elle est placée dans un atelier et mise en interaction avec d'autres machines de ce même atelier générant ainsi une organisation de la production.

Outre l'axe dimensionnel structurant de ***l'objet technique ancien***, il est également possible de relier la notion de ***contexte*** à ***l'objet*** comme abordée dans la partie 3.2.2 de ce manuscrit. L'étude de la ***typologie structurante*** distingue trois ***contextes*** directement liés à la définition des ***objets techniques*** et répondant également au concept d'encapsulation par inclusion des ***poupées russes*** (figure 117) :

- Le ***contexte technique/technologique***,
- Le ***contexte organisationnel***,
- Le ***contexte social***.

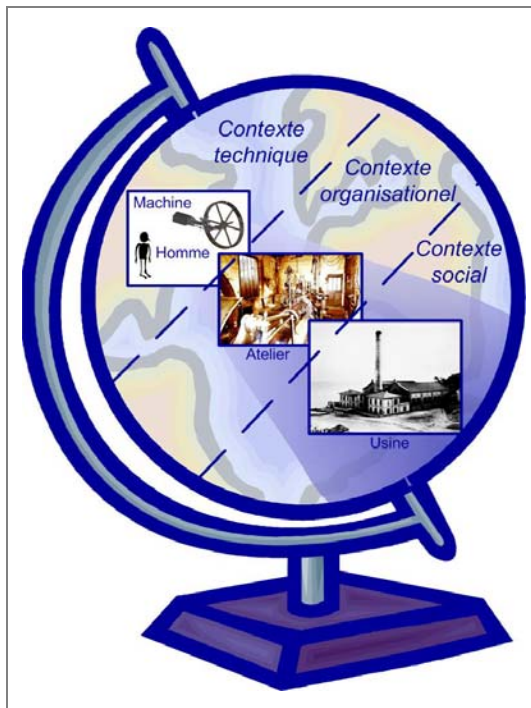


Figure 117 : LES CONTEXTES AUTO-ENCAPSULES SUR LES NIVEAUX MULTI-DIMENSIONNELS DE L'OBJET TECHNIQUE ANCIEN

Le ***contexte technologique*** est défini par l'approche historique comme la prise en compte du temps global d'évolution du produit en fonction des évolutions humaines. Ce temps global est différent du temps d'évolution de la TERRE (*earth time*) car il peut être augmenté ou réduit. Il n'est pas uniforme car il dépend des périodes temporelles de l'évolution humaine.

Comme vu précédemment³³², le PLC³³³ est comparable avec la génétique biomédicale : il permet de cartographier les ***caractéristiques*** d'un ***objet*** tout comme l'analyse de l'ADN définit le génome humain. Il est ainsi possible de tracer les progrès technologiques de ***l'objet*** considéré. On obtient alors une visualisation graphique de l'évolution des technologies en fonction, par exemple, des énergies exploitées par ***l'Homme***. Les modèles

³³² Voir partie 3.2.1

³³³ PLC = Product Life Cycle

de situation d'usage utilisés en SPI³³⁴ proposent des exploitations similaires : en complément d'une vue fonctionnelle, d'une vue structurelle et d'une vue comportementale, une vue évolutionniste du produit peut y être ajoutée ; c'est le design-for-X [HASAN 2000] [OUAZZANI & al 1998].

Mais l'analyse des technologies ne peut être suffisante en elle-même. **L'environnement** des machines doit également être capitalisé : c'est le **contexte organisationnel**. Les études se concentrent alors sur les flux créés ou utilisés par la machine. En terme d'ingénierie mécanique, on parle de fluides ou de courants. En terme d'ingénierie de productique, on distingue les flux de produits, les interactions entre les machines de l'usine ou les interactions entre la machine et ses ouvriers-utilisateurs³³⁵. C'est pourquoi nous le nommons le **contexte organisationnel**. Nous avons vu dans le chapitre 3 que la capitalisation des **connaissances** se concentre aujourd'hui sur le PLC et le savoir-faire. Mais qu'en est-il de l'organisation entre projets ou des organisations de l'entreprise ? Pourquoi ne pas également les capitaliser ? D'une manière générale on observe que c'est avant tout par l'organisation managériale que le succès d'un produit est assuré. Ce fut le cas de la TWINGO de RENAULT pour laquelle une gestion de projets encore jamais tentée a permis de réaliser de la conception collaborative à moindre coût [MIDLER 1993]. Capitaliser les évolutions de l'objet ou de l'entreprise selon un axe temporel est nouveau pour les SPI mais cette approche permet d'enrichir la compréhension du contexte dans lequel l'objet a été créé/utilisé et peut-être même envisager de décrire ses futurs sauts technologiques. Par conséquent, mettre en place des collections à caractère virtuel à partir du **Dossier d'œuvre Patrimonial Technique** (état B) pourrait être une finalité des plus intéressantes (phase B-C). Elles pourraient s'avérer utiles, non seulement pour les historiens des techniques mais également pour les industriels, afin d'identifier le contexte et les moteurs de l'innovation. Il s'agit en effet d'une veille technologique d'un nouveau type telle que Michel COTTE l'envisage : prendre en compte la filière technologique sur la longue durée permet ainsi de comprendre certaines inflexions, évolutions ou tendances de l'innovation [COTTE 2005b] [CRUBLEAU & al 2003].

De plus, les historiens accordent un rôle essentiel à la place de l'humain dans le ST³³⁶. La définition du couple humain/technologie pointe un nouvel aspect de l'évolution de l'homme : c'est le **contexte social**. En réalité, notre société ne possède pas un temps constant mais franchit des caps par étapes successives, c'est ce que nous désignons par le terme de *temps dilaté*. Comme vu précédemment avec l'histoire de Gustave EIFFEL, il faudra attendre près d'un siècle pour que le nouveau ST des moyens de transport aérien atteigne son apogée. En somme, l'analyse du **contexte social** est également essentielle à la compréhension d'un objet, de sa technique, de l'atelier ou de l'usine. Dans presque tous les

³³⁴ SPI = Sciences pour l'Ingénieur

³³⁵ Il s'agit ici des utilisateurs de la machine ayant pour qualification le statut d'ouvrier. Ils sont plus couramment dénommés opérateurs.

³³⁶ ST = Système Technique

cas, un changement à un niveau microscopique peut avoir un impact considérable sur l'évolution de la **société** et, par conséquent, une influence sur la nature intrinsèque de **l'homme** et le cadre de son évolution. C'est l'*effet papillon* comme le suggère les théories du chaos des systèmes dynamiques de OTT [OTT 1993] [SHINBROT & al 1992] [SHINBROT & al 1993]. Nous détaillerons plus tard dans la suite de ce chapitre la classe d'équivalence **Homme**.

5.3.3.3 Définition du Système Technique étudié : liens contexte-objet

Selon les propos de KUHN sur les Révolutions scientifiques [KUHN 1970] et ce que nous avons explicité précédemment, nous avons conclu qu'il y a un manque dans les méthodes contemporaines de conservation du patrimoine : les sciences et les techniques doivent être reconsidérées à leur juste valeur au même titre que l'est actuellement le patrimoine architectural.

D'un point de vue conceptuel, un **objet**, un outil ou un *truc* tel que spécifié par l'analyse fonctionnelle externe de la méthode APTÉ peut se modéliser selon la figure 118. Il s'agit ici d'établir les liens entre le **contexte** et **l'objet**.

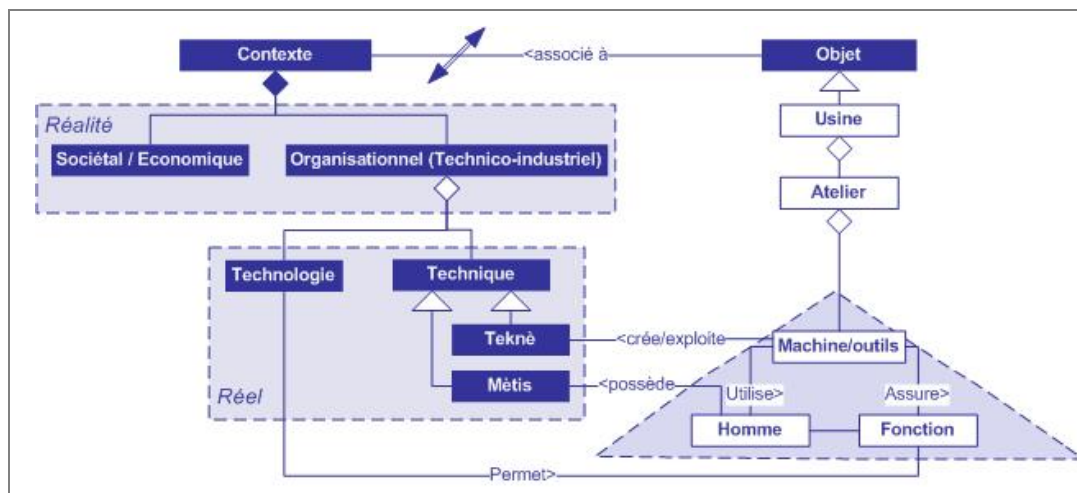


Figure 118 : DESCRIPTION DES MULTI-CONTEXTES DES OBJETS COMPLEXES

Les deux domaines mis en regard dans cette ontologie travaillent tous deux à multi-échelles :

- la classe **objet** selon une **typologie structurante**,
- la classe **contexte** selon la définition du **contexte** d'étude en interaction avec **l'objet** permettant de décrire son **Environnement** : les **technologies** et les **techniques** employées jusqu'aux modèles de comportements organisationnels et sociaux décrivant le caractère évolutif de notre **société**.

La **technique** est explicitée ici selon la dualité de la définition grecque lui donnant deux significations : la technique au sens propre du terme contemporain et le savoir-faire [ARISTOTE rééd.1992] [DENOYEL 2000] [DETIENNE & al 1974] :

- Le terme **Teknè** est défini par ARISTOTE comme une production accompagnée de raison. En ces termes, il entend que la **Teknè** est l'expression du combat de la raison de **l'homme** contre la **nature** et qu'à ce titre, elle est la base de la conception dite technique³³⁷.
- Le terme **Métis** désigne, lui une forme d'intelligence et de pensée. La **Métis** implique un ensemble complexe, mais très cohérent, d'attitudes mentales et de comportements intellectuels ; en outre, c'est la compétence nécessaire et le savoir-faire acquis pour exploiter une **Teknè**.

L'environnement est également divisé en deux concepts empruntés au domaine de la sociologie et de la pensée Darwiniste. Hannah ARENDT les définit comme un espace privé et un espace public [ARENDT 2002] : suite à un décalage d'usage, une différence est introduite entre la notion de *réalité* et la notion de *réel* :

- La **réalité** (espace public - sujet) est la projection que **l'homme** se fait du **réel**. La **réalité** est le regard du sujet sur le **réel** de **l'objet**. C'est une représentation évoluant dans un univers où les paramètres sont indépendants de la finalité choisie.
- Le **réel** (espace privé - objet) n'a pas besoin d'être pensé car il existe ; c'est l'être, l'essence même de **l'objet** sur **l'objet** en soit. Le **réel** se définit comme l'invariant de l'équation où les seuls paramètres changeants sont **l'homme** et le **temps**.

Ainsi, au vu des définitions précédentes du *réel* et de la *réalité*, il convient de préciser que, même si représentée dans le triptyque d'usage **fonction – machine – Homme**, la classe **Homme** est transversale à l'ensemble des éléments du domaine ontologique décrit ici. En effet, à chaque élément de la taxonomie des classes **objet** ou **contexte**, **l'Homme** peut être représenté comme un attribut de ces classes où il changera souvent de **nature**.

Nous reviendrons sur la classe **Homme** dans le chapitre 7.

5.3.3.4 Une rupture dans la typologie des objets techniques

Nous avons vu précédemment dans la définition du **contexte organisationnel** que dans les pratiques industrielles et les démarches d'innovation, les attitudes courantes consistent souvent à ignorer ou à mésestimer les acquis du passé. L'image d'une entreprise vieillissante auprès de ses clients est souvent redoutée par le service commercial. Les relations entre les préoccupations de marché ou d'innovation d'une part et le patrimoine industriel et la culture d'entreprise d'autre part ne sont pas toujours évidentes. Tout se passe comme s'il y avait une coupure passé – présent irrémédiable ; le seul lien intéressant le

³³⁷ Voir le triptyque du patrimoine, partie 2.1.2

créateur industriel est celui du présent avec le futur immédiat (innovation, anticipation du marché).

Dans la partie 2.1.3 de ce manuscrit, nous avons démontré qu'il existe une cartographie possible des objets manufacturés : l'artisanat, la proto-industrie et l'industrie. De plus, l'analyse du domaine ontologique précédent met en exergue que les **contextes** sont fonction de cette cartographie.

En terme de méthodes de conservation actuelles du patrimoine, on observe également que si des moyens importants ont toujours été mobilisés pour procéder au sauvetage archéologique traditionnel des objets apparus avant l'époque moderne et contemporaine, cette approche est encore malheureusement insuffisante dans le domaine du patrimoine industriel. Ceci s'explique essentiellement par le fait que jusqu'alors les démarches patrimoniales n'explorent généralement pas en profondeur la technicité de l'objet privilégiant l'aspect *externaliste* à la dimension technique intrinsèque de **'l'objet ancien**.

On peut alors envisager une grille de lecture dirigée chronologiquement de l'ontologie descriptive des multi-contextes des objets complexes.

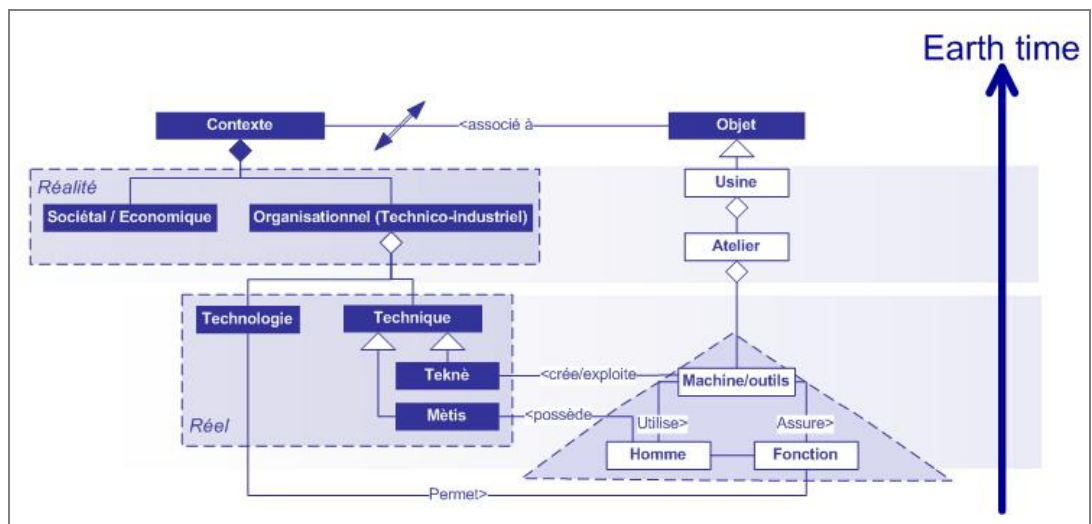


Figure 119 : LA COMPLEXITE EXTERNALISTE DE L'OBJET TECHNIQUE DANS UNE EVOLUTION TEMPORELLE

Comme l'illustre la figure 119, la transition de la description muséologique des objets s'effectue entre le *réel* et la *réalité*. En effet, on observe que dans les Musées, la *réalité* est souvent vulgarisée. Dès lors, comprendre un **objet technique industriel ancien** nécessite de prendre en compte l'intégralité des **contextes**.

Cette problématique du temps est une fois de plus récurrente dans notre travail de recherche. Aussi, analysons maintenant **'l'objet** selon un autre axe temporel : celui de son évolution.

5.3.3.5 La problématique du temps et l'accumulation de connaissances contextualisantes

Peu de méthodes de conception et de modélisation utilisées par les entreprises comme la méthode APTE, l'AMDEC³³⁸, le QFD³³⁹... prennent en compte le paramètre *temps*. Et pourtant, comme vu précédemment, la temporalité joue un rôle essentiel quelle que soit la classe conceptuelle considérée. On peut ainsi distinguer :

- Le *temps du produit*. Il s'agit de la formalisation du PLC³⁴⁰ permettant à chaque acteur d'un projet d'intégrer l'ensemble des autres domaines concernés pour le développement de son activité. Comment est née l'idée au sein du département R&D ? Comment l'objet sera-t-il utilisé par ses clients ? L'axe de travail principal est le *cahier des charges fonctionnelles*. Ce paramètre *temps* vient compléter la définition du **contexte technologique/technique**.
- Le *temps de l'environnement industriel*. Il peut-être divisé en deux parties : le *temps de fonctionnement* et le *temps du process*. Cependant, ces deux paramètres *temps* sont usuellement confondus dans un seul et même concept. Ce *temps* décrit les interactions entre le produit et les machines ou entre le produit et les humains qui produisent ou utilisent l'artefact. Ce paramètre *temps* conduit le **contexte organisationnel et social**.

Mais, dans un cadre industriel contemporain, le *temps* se déroule sur une période courte. En effet, si une capitalisation des connaissances est effectuée durant une certaine phase de vie de l'objet et une autre capitalisation est réalisée quelques années plus tard, on constate en général que peu voire aucun lien n'existent entre les deux périodes de KM.

Et pourtant, en règle générale, un objet possède plusieurs situations de vie. Prenons l'exemple d'un crayon.

Un crayon est conçu et fabriqué par une première entreprise. Ensuite, le crayon est distribué par les revendeurs et vendu aux futurs utilisateurs. Mais si l'utilisateur perd son crayon ; c'est un ami / un collègue qui va le trouver et le réutiliser à son tour. Encore, encore et encore jusqu'à ce que le crayon, arrivant en fin de vie, ne fonctionne plus et soit, par conséquent, jeté à la poubelle. Au mieux, il finira peut être recyclé mais ce n'est pas certain !

Dans cet exemple, le paramètre *temps* est considéré sur le *temps du produit* ou le *temps de l'humain* étant donné que l'action se déroule sur une période déterminée pouvant être mesurée à l'échelle d'une génération humaine.

Prenons maintenant la machine à vapeur PIGUET pour laquelle la période d'évolution concernée s'étend sur près d'un siècle et demi. Voici le bilan que nous avons dressé de la vie de l'objet dans la synthèse du chapitre 4 :

³³⁸ AMDEC = Analyse des Modes de Défaillance Et de leur Criticité

³³⁹ QFD = Quality Function Deployment

³⁴⁰ PLC = Product Life Cycle

C'est l'histoire d'une machine à vapeur conçue par Alphonse DUVERGIER en 1860. Cette machine fonctionne fort bien et est tellement appréciée des industriels qu'en 1890, près de 600 machines ont été construites et vendues à travers le monde entier. En 1898, quatre spécimens de cette machine à vapeur sont achetés par la principauté de MONACO à l'entreprise PIGUET, les successeurs de DUVERGIER. Elles sont couplées à une dynamo afin de produire de l'électricité pour éclairer le Palais du Prince et le Casino de MONTE-CARLO. Mais, en 1917, l'entreprise les exploitant décide de changer de technologie. Une de ces machines est envoyée dans une scierie près de MOULINS (03) en FRANCE. En 1930, la machine est revendue à une autre scierie près de DIJON (21). Elle fonctionne jusqu'en 1977, date à laquelle la production d'énergie dans l'entreprise devient plus chère que d'acheter l'électricité à EDF. Par conséquent, la machine à vapeur est arrêtée, rachetée et démontée par l'ECOMUSEE DU CREUSOT-MONTCEAU en 1994. Non entretenue depuis 13 ans et, par voie de conséquence devenue inutilisable, la machine est toujours stockée dans les réserves de l'ECOMUSEE.

Dans cet exemple, le paramètre *temps* de l'étude ne peut être le *temps d'évolution de l'humain* étant donné que presque trois générations peuvent témoigner de la vie de la machine. Il est donc nécessaire de prendre ici un axe de temps plus étendu : nous l'appelons *earth time*³⁴¹. Il s'agit ici du concept du *PLC étendu*.

PLC étendu = étude de la vie d'un objet selon un axe des temps universel.

Ordinairement, les historiens nomment cette notion la *périodisation*. Lors d'une étude historique, la séquence temporelle étudiée doit être fixée à ses extrémités. Tout écart en dehors de ces dates est prohibé. Cependant, dans le cas d'études d'objets à caractères technico-industriels, si un quelconque lien peut être établi avec une action très antérieure ou au contraire très postérieure à la périodisation de la chronologie de l'objet, un tel écart doit être permis si celui-ci est justifié³⁴². C'est un des principes de ***l'archéologie industrielle avancée*** : ne pas se limiter à un périmètre d'étude sous prétexte de trop s'égarer. Un objet technique est complexe de par sa nature et notre hypothèse de départ de lier les outils du présent avec le passé est en elle-même un des écarts de notre postulat de base³⁴³.

Comme abordé dans la partie 3.2.1 et complétée au regard de ces deux exemples, nous pouvons d'ores et déjà noter qu'un objet peut avoir plusieurs vies appelées *situations de vies* en HT ou *situations d'usages* en GI. Cette terminologie des phases de vie est employée

³⁴¹ Il est entendu par *earth time*, le temps d'évolution global de l'univers. A cette échelle macroscopique s'étalant sur des millions d'années, le temps d'évolution de l'homme est nanoscopique et est ainsi insignifiant.

³⁴² Dans le cas de l'étude de la machine à vapeur PIGUET n°135, la monographie de l'entreprise DUVERGIER est un des écarts réalisés. De même, l'analyse du contexte actuel de la scierie de LA ROCHE-EN-BRENIL (même en l'absence de la machine) est également une dispersion quant à la périodisation concernée ; cependant, l'analyse de ce contexte contemporain a permis de valider les hypothèses du contexte de la période d'usage de l'objet dans cette scierie.

³⁴³ On entend ici, par exemple, l'utilisation des outils de CAO contemporains pour reconcevoir des objets techniques appartenant au passé.

pour décrire l'objet depuis sa naissance jusqu'à son déclin en suivant des étapes successives :

1. Recherche et conception,
2. Fabrication,
3. Vente,
4. Vie 1,
5. Vie 2,
6. ...
7. Vie n,
8. Fin de vie (recyclage / démontage / patrimonialisation).

Aussi, une analyse réalisée en prenant comme axe de travail le cycle de vie du produit selon le temps large du *earth time* fait apparaître plusieurs typologies de **sources** ; et permet également de pointer les manques dans la documentation de **l'objet**.

Ce travail des **sources** est très délicat car il peut faire apparaître des doublons dans les *connaissances produites* suite à l'utilisation de *connaissances similaires* lors de plusieurs phases de vie. En effet, les connaissances d'un usage (n) peuvent être différentes ou égales à celle employée lors d'un usage (n+1). La recherche historique nécessite alors de traiter les **données** comme explicité dans la partie 1.3.2 de ce manuscrit et selon les deux dimensions intimement liées : *l'échelle du temps* et *l'échelle du contexte*.

De plus, l'étude des **informations** les ayant converties en **connaissances**, il est intéressant de noter que la quantité de **connaissances** mise en jeu varie tout au long du cycle de vie du produit. On distingue deux grandes catégories :

- Les *connaissances internes* définies en terme de technologie comme spécifiées par le BDF³⁴⁴,
- Les *connaissances externes* produites uniquement grâce aux tâches accomplies par l'objet.

La figure 120 illustre graphiquement l'évolution de cette masse de connaissances³⁴⁵ en fonction du *earth time*.

³⁴⁴ BDF = Bloc Diagramme Fonctionnel

³⁴⁵ Les quantités représentées le sont uniquement à titre d'illustration et ne correspondent à aucun exemple concret.

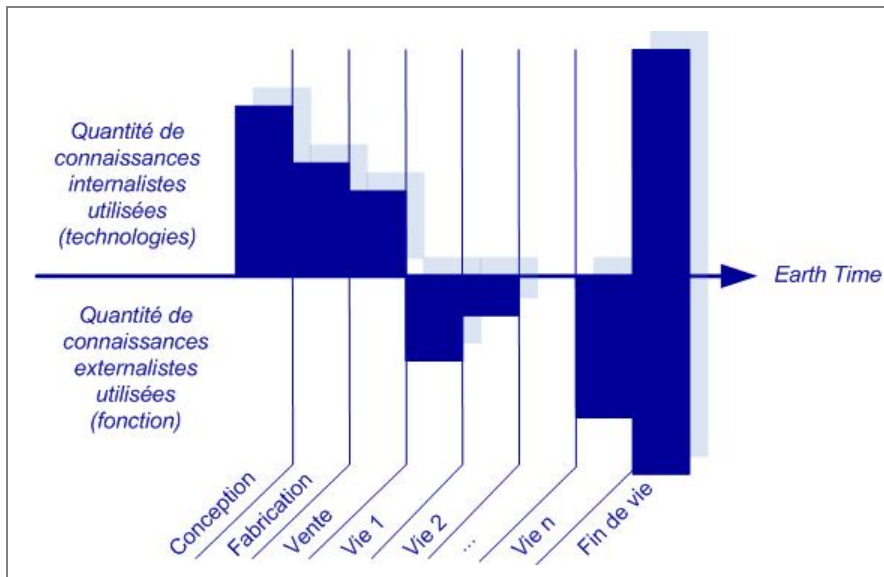


Figure 120 : PLC ETENDU EN FONCTION DE LA SOMME DE CONNAISSANCES PRODUITE PAR LES PHASES DE VIE

Durant toutes les phases de vie de l'objet, une quantité conséquente de **connaissances** s'est accumulée. La mise en relation de ces **connaissances internalistes** et **externalistes** sur un axe temporel démontre que la fin de vie de **l'objet** fait apparaître deux possibilités d'évolution de ces **connaissances** et donc deux voies d'applications :

1. **L'objet** est rejeté / ignoré, les **connaissances** sont perdues à jamais,
2. **L'objet** est patrimonialisé et le travail **d'archéologie industrielle** nécessite d'étudier les **connaissances** accumulées sur l'intégralité du **PLC étendu**.

*L'important, c'est de savoir ce qu'il faut observer.
[Edgar Poe]*

5.3.3.6 Synthèse : modèle d'usage externaliste de l'objet technique ancien

Les **sources** permettent de décrire l'objet aussi bien dans son aspect **internaliste** que **externaliste**. Les phases de capitalisation et de formalisation des **données** en **connaissances** régénèrent les **contextes** de **l'objet technique ancien** et donc permettent d'en déduire ses **usages**.

Ne prenant ici en compte que la phase **d'archéologie industrielle avancée**, ce processus interne, usuellement réalisé par les historiens lors d'un travail d'archives, se déroule comme illustré par la figure 121³⁴⁶.

³⁴⁶ On notera que la symbolique de la figure est semblable au processus établi par de Genrich ALTSHULLER pour sa théorie TRIZ [CAVALLUCCI 2007].

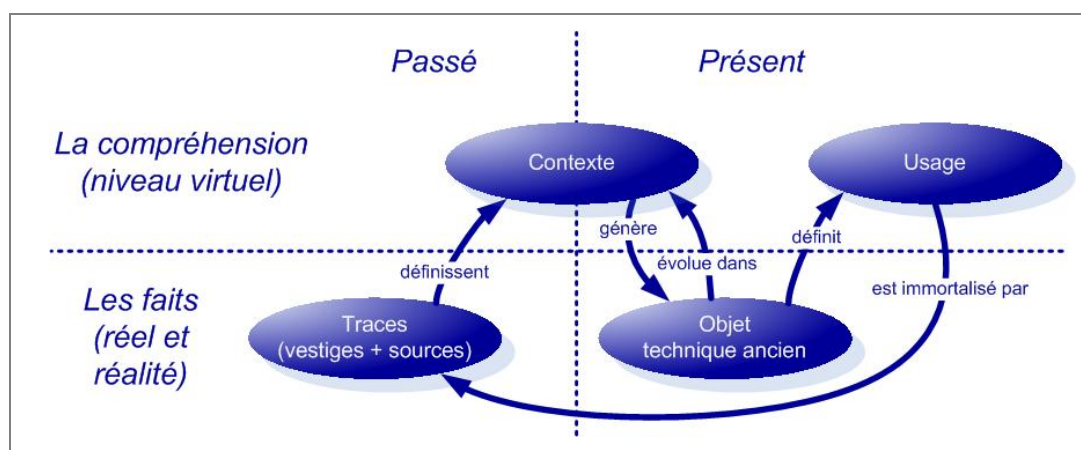


Figure 121 : PROCESSUS INTERNE DE PRODUCTION DE L'USAGE EXTERNALISTE D'UN OBJET TECHNIQUE ANCIEN

Le bouclage des **usages** aux **traces** est assuré par la variable du **temps**. Afin de justifier les utilisations des **objets**, **l'homme** va de lui-même se créer un souvenir qu'il immortalisera ou non par écrit. Avec le *earth time*, ces éléments vont alors devenir des **traces**. C'est par exemple le cas des rapports de l'APAVE réalisés lors des essais sur la machine à vapeur FIGUET n°135.

L'ontologie de la figure 122 décrit l'usage du domaine de l'aspect *externaliste* de **l'objet technique**. Précisons que, comme vu dans la partie 5.3.3.1, **l'objet technique** et les **sources** répondant aux critères de niveaux multi-temporel et multi-dimensionnel, la détermination du **contexte** de **l'objet** et donc la déduction des **usages** répond également à cette multi-temporalité. Par exemple : l'objet peut posséder plusieurs *vies* donc plusieurs **usages** temporels. De même, les activités se déroulent à multi-échelles sur toute la chaîne logistique de la **typologie structurante** de **l'objet**. C'est pourquoi le diagramme de classes de l'usage générique de l'objet dans son caractère internaliste possèdent de nombreuses relations multi-temporelles et multi-dimensionnelles.

De plus, les **sources** pouvant aider la phase **d'archéologie industrielle avancée** à décrire l'aspect *internaliste* de **l'objet**, un lien les unit avec la classe **objet technique ancien**.

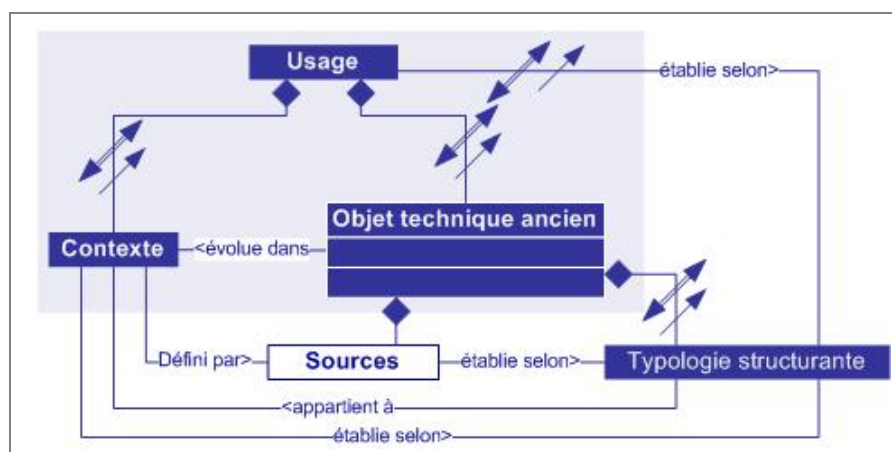


Figure 122 : MODELE D'USAGE GENERIQUE DE L'OBJET DANS SON CARACTERE EXTERNALISTE

Tout comme démontré précédemment dans la partie 5.3.1.5 sur la synthèse du modèle d'usage fonctionnel *internaliste* de ***l'objet technique ancien***, cette nouvelle ontologie décrivant cette fois-ci le caractère *externaliste* de ***l'objet*** permet également de contribuer aux conditions d'authenticité spécifiées par l'UNESCO [UNESCO 2005]. Les classes ***usage*** et ***contexte*** valident ainsi les critères :

- usage et fonction,
- traditions, techniques et systèmes de gestion,
- situation et cadre.

5.3.4 L'HOMME DANS LE SYSTEME TECHNIQUE

5.3.4.1 L'usage de l'objet technique ancien par l'Homme

L'objet technique s'inscrit dans un cycle de vie complexe formalisé par le PLC. Cependant, tout objet doit avoir un créateur et un utilisateur. Que les liens soient directs ou indirects, ***l'être humain*** est toujours en contact avec ***l'objet*** : il assemble les composants ou appuie sur le bouton de mise en route... ***L'être humain*** est présent à chaque phase de vie de l'objet / à chaque usage et possède ainsi une taxonomie de description évoluant temporellement. Par exemple, en suivant l'axe d'évolution du PLC de ***l'objet***, ***l'Homme*** se place à plusieurs niveaux :

1. L'Homme évolue dans un contexte social,
2. Il possède un besoin afin d'améliorer sa situation de vie³⁴⁷,
3. Il invente une technologie,
4. Il crée une structure physique pour accomplir la fonction de sa technologie : c'est l'objet.

A travers cette illustration, nous voyons que la sous-classe ***activité*** de la classe ***Homme*** évolue également selon la ***typologie structurelle*** de ***l'objet***.

Cette taxonomie possède également une autre dimension : elle est liée aux multi-contextes.

Par exemple, lors de la phase d'industrialisation de ***l'objet***, la ***typologie structurante*** concernée est l'usine. L'organisation interne à l'entreprise induit une hiérarchie dans les classes sociales des humains y travaillant. Au début du 20^{ème} siècle, TAYLOR crée l'OST³⁴⁸ où la segmentation de la chaîne globale implique, entre autres, une taxonomie dans la hiérarchie de l'entreprise. Ces deux catégories principales sont plus connues comme :

- Les blouses blanches représentant le personnel des bureaux (administration et conception),
- Les blouses bleues pour désigner les OS³⁴⁹.

³⁴⁷ Voir partie 2.1.2

³⁴⁸ OST = Organisation Scientifique du Travail

³⁴⁹ OS = Ouvriers Spécialisés

L'**Homme** peut être un ingénieur, un contremaître, un ouvrier... il appartient à une catégorie sociale que nous nommons **corps de métier** et il évolue dans son contexte propre. Un lien d'agrégation s'établit alors entre la classe **contexte** de la *réalité* et la classe **Homme**.

La figure 123 décrit cette première ontologie de **l'Homme** dans son **contexte** pour **l'usage d'objets techniques anciens**.

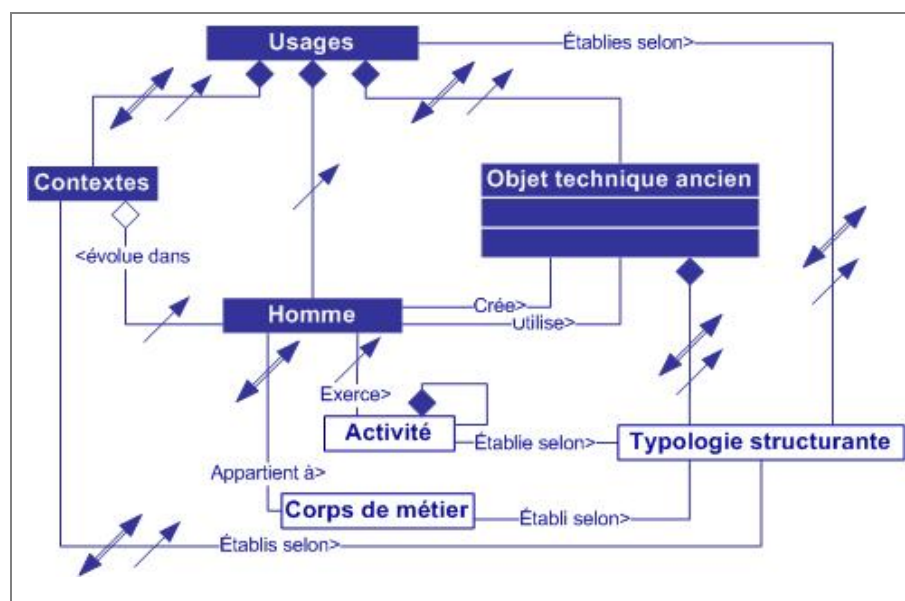


Figure 123 : LA CLASSE HOMME DANS SON CONTEXTE POUR L'USAGE D'OBJETS TECHNIQUES ANCIENS

De plus, de nombreuses entreprises peuvent travailler pour assurer l'intégralité de la chaîne du cycle de vie d'un même **objet** : fourniture de matières premières, conception, fabrication, vente, utilisation... Mais ces entreprises ne produisant pas toutes des objets matériels³⁵⁰. On désigne ainsi ces ensembles commerciaux par la classe d'équivalence **firme**. Celle-ci possède une typologie établie selon la classe **raison d'être** décrite précédemment lors de la définition de la hiérarchie structurante des **objets techniques anciens**³⁵¹. L'objectif de la **firme** va déterminer sa **raison d'être** et va permettre de définir la **typologie structurante** des **objets techniques anciens**.

L'**homme** appartient donc également à une **firme** donnée (figure 124).

De plus, dans le cas d'une valorisation de l'objet patrimonial par une institution ou une association³⁵², ces dernières transmettant des savoir-faire, la classe **firme** permet de généraliser l'ensemble de ces structures.

³⁵⁰ C'est le cas des banques.

³⁵¹ Voir partie 5.3.2

³⁵² Voir partie 2.2.1

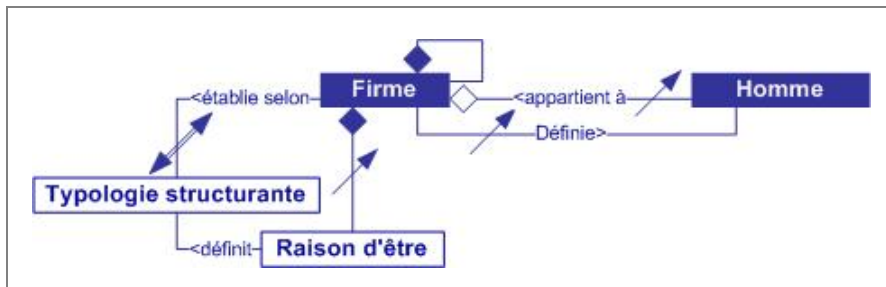


Figure 124 : LA CLASSE HOMME EN LIEN AVEC LA CLASSE FIRME

5.3.4.2 Société et civilisation

Nous avons démontré précédemment que *l'homme* évolue dans un **contexte social**. Cette association génère une période de son évolution qui se caractérise par la **civilisation**.

L'homme va alors générer des savoir-faire propres à la périodisation de la société dans laquelle il évolue. La définition des critères d'authenticité et d'intégrité de l'UNESCO propose de classer ce patrimoine immatériel dans la classe **traditions et coutumes**³⁵³ [UNESCO 2005].

L'ontologie de la figure 125 synthétise cet aspect *externaliste* abstrait entourant *l'objet technique ancien*.

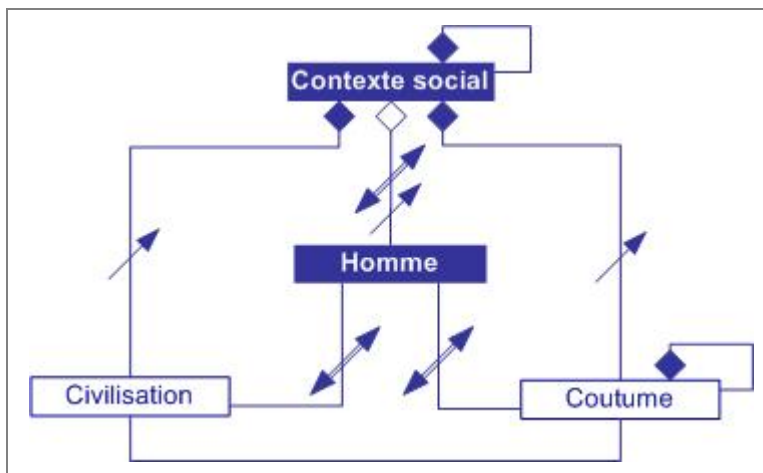


Figure 125 : LA CLASSE HOMME DANS LA SOCIETE

Notons que des relations existent entre la classe *homme* et les classes **civilisation** et **coutumes**. En effet, l'histoire démontre que ces trois classes sont indissociables. Si ce postulat n'était pas vérifié, des questions philosophiques apparaissent quant à la justification de *l'homme* : pourquoi existe-on, quel est notre rôle sur TERRE... ?

³⁵³ Voir partie 2.2.2.2 . Nous simplifierons cette classe **traditions et coutumes** par l'appellation **coutumes** dans la suite de ce manuscrit.

De plus, le travail de *l'homme* peut s'effectuer à plusieurs niveaux et pour différentes phases de vie de l'objet. Quant aux classes *civilisation* et *coutumes* générées par la classe *homme* et, en retour, l'enrichissant, l'ensemble du diagramme de classes possèdent des relations multi-temporelles et multi-dimensionnelles.

5.3.4.3 Synthèse : modèle d'usage de l'Homme et de l'objet technique ancien

Comme vu précédemment dans la description des modèles d'usage fonctionnel *internaliste* et *externaliste* de *l'objet technique ancien*, l'ontologie de la figure 126 permet également de contribuer aux conditions d'authenticité spécifiées par l'UNESCO [UNESCO 2005] :

- usage et fonction, les critères sont à valider par les classes *usages* et *contexte*,
- traditions, techniques et systèmes de gestion, les critères sont à valider par les classes *homme*, *usages* et *firme*,
- situation et cadre, les critères sont à valider par les classes *contextes*, *usages* et *firme*,
- langue et autres formes de patrimoine immatériel, les critères sont à valider par les classes *homme* et *usages*,

Cette ontologie est donc le témoin de notre société dans laquelle *l'objet technique* a été créé et utilisé.

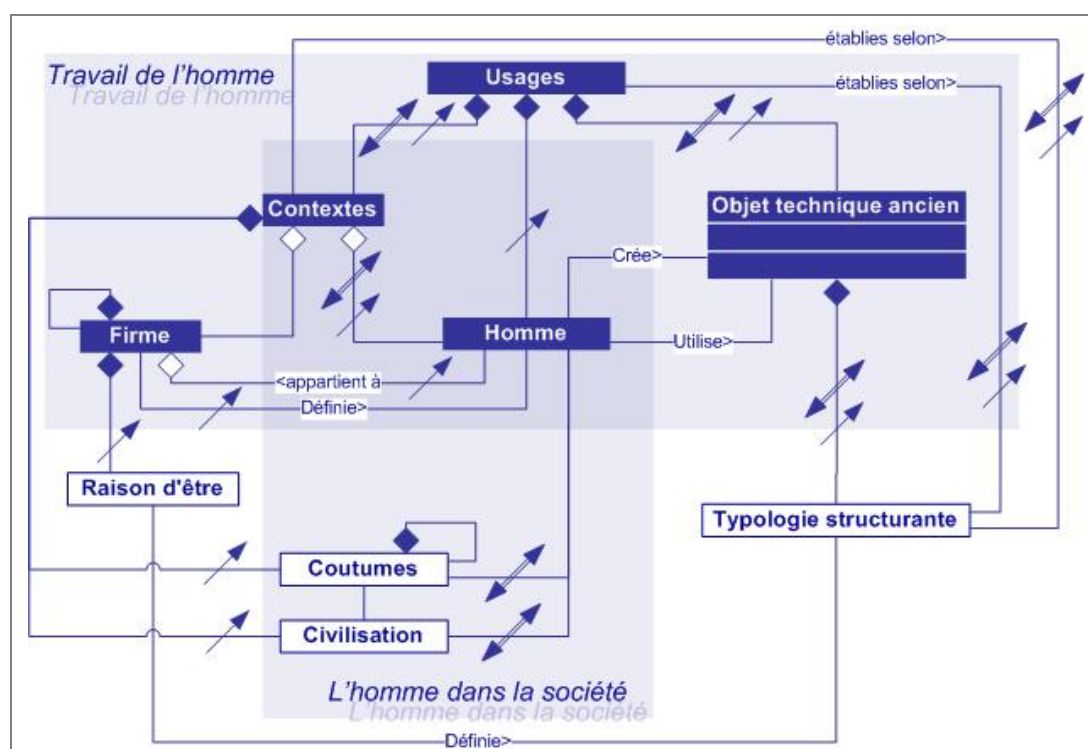


Figure 126 : MODELE D'USAGE GENERIQUE DE L'OBJET DANS SON USAGE PAR L'HOMME

Précisons que grâce à des interviews orales, également appelées enquêtes ethnologiques dans le milieu patrimonial, les **sources** peuvent prendre une **nature** différente et posséder un **contenu** vivant. Mais, afin de simplifier la visualisation graphique de cette ontologie d'usage, ce lien entre les **Hommes** et les **sources immatérielles** n'est pas représenté ici.

5.4 VERS UNE ONTOLOGIE GLOBALISANTE : LE DHRM

5.4.1 MODELE COMPORTEMENTAL GLOBAL D'USAGE DE L'OBJET TECHNIQUE ANCIEN IDEALISE : SITUATION D'USAGE VS SITUATIONS DE VIE

Apparus dans les années 1990, les recherches en GI mènent à de nombreuses modélisations conceptuelles des objets industriels [BERNARD 1996]. Les modèles d'usages visent à intégrer l'ensemble des concepts manipulés autour d'un objet en décrivant, à l'aide de la systémique, une image de cette réalité permettant ainsi de cerner les éléments à prendre en compte lors de la conception d'un produit. La sociabilisation des ST peut être rendue compte grâce à, par exemple, l'analyse des performances de l'entreprise [HASAN 2000], la prévention des risques [SHAHROKHI 2006]...

Notre proposition, ici, est également de contribuer à enrichir ses modèles d'usage en utilisant, cette fois-ci, l'histoire comme support de conceptualisation.

Le modèle FBS proposé par GERO en 1990 [GERO 1990] se révèle être une base intéressante pour la modélisation des objets d'entreprise comme HU le stipule [HU & al 2000] :

Le modèle Fonction, Comportement, Structure (FBS) est une approche pour concevoir des produits, qui représente de manière explicite les fonctions du produit, la structure du produit et les comportements internes du produit.

Ainsi, ROUCOULES propose un Système d'Information réparti en trois groupes : le *Produit*, le *Process* et l'*Organisation* [ROUCOULES 1999]. Cette typologie de modèles a récemment été étendue par LABROUSSE au modèle FBS-PPRE pour ajouter une couche *Produit*, *Process*, *Ressources* et *Effets externes* [LABROUSSE 2004].

On notera également les travaux menés grâce à la capitalisation des connaissances par AMIDON et ayant conduit à créer un *système en équilibre* selon cinq vues : la *performance* (vue économique), la *structure* (vue sociologique), les *personnes* (vue psychologique), la *technologie* (vue informatique), les *processus* (vue management) [AMIDON 2002].

D'une manière générale, ces modèles de produits ainsi que ceux de RUMBAUGH [RUMBAUGH 1995], GOMES [GOMES & al 2000] ou ERMINE [ERMINE & al 2004] suggèrent une représentation de l'objet selon trois vues [GOMES & al 2001] :

- Une *vue ontologique*, c'est l'aspect structurel. L'objet est perçu comme un ensemble d'objets agencés, comme *étant quelque chose*, c'est le point de vue de l'*être* du système.
- Une *vue phénoménologique*, c'est l'aspect fonctionnel. L'objet est perçu comme agissant, comme *faisant quelque chose*, c'est le point de vue du *faire* du système.
- Une *vue génétique*, c'est l'aspect dynamique. L'objet est perçu comme *se modifiant au cours du temps*, c'est le point de vue du *devenir* du système.

Mais, comme démontré dans la partie 5.3, le modèle d'usage des objets techniques anciens est plus complexe que celui des produits industriels contemporains pour deux raisons principales :

- Le concept des *boîtes noires* / *boîtes blanches* pour lequel une étude patrimoniale se doit de clarifier l'ensemble des paramètres de l'objet technique : plus aucune *boîte noire* ne doit exister pour un objet abouti.
- Les études historiques prennent en compte un corpus de **connaissances** plus large que celui utilisé en KM des entreprises contemporaines. L'étude d'un objet technique ancien allie capitalisation des connaissances produits, processus, métiers, entreprises, sociétales et économiques. Il s'en suit une **typologie structurante** complexe de l'objet technique, de ses contextes et de ses vies en usage.

Ainsi, les appellations des classes d'équivalence diffèrent de par le fait qu'il est question d'objets à vocation industrielle ancienne et non contemporaine. L'organisation des classes est également différente des modèles de Systèmes d'Informations modernes. Cependant, il est possible de retrouver des vues *produit*, *process* ou *organisationnelle* mais selon une lecture ontologique différente.

Le modèle comportemental de l'objet dans son usage passé est décrit par l'ontologie de la figure 127 de la page suivante.

Cette ontologie générale de ***l'objet technique ancien*** dans son usage idéalisé prend en compte deux aspects :

- l'aspect *internaliste* décrivant le niveau proche **objet**,
- l'aspect *externaliste* décrivant ***l'objet*** dans son **environnement** large.

Une majorité des classes d'équivalence présente des liens de multi-temporalité ou de multi-dimensionnalité. Elles possèdent quasi-toutes l'attribut de la classe **typologie structurante** ; cependant, afin d'alléger la visualisation graphique, les liens entre cette classe et les autres ne sont pas représentés. De plus, grâce aux héritages des attributs, il a été possible de supprimer un certain nombre de liens afin de rendre ce modèle le plus explicite possible.

Il est donc obtenu un modèle complexe que nous allons simplifier dans la suite de cette partie.

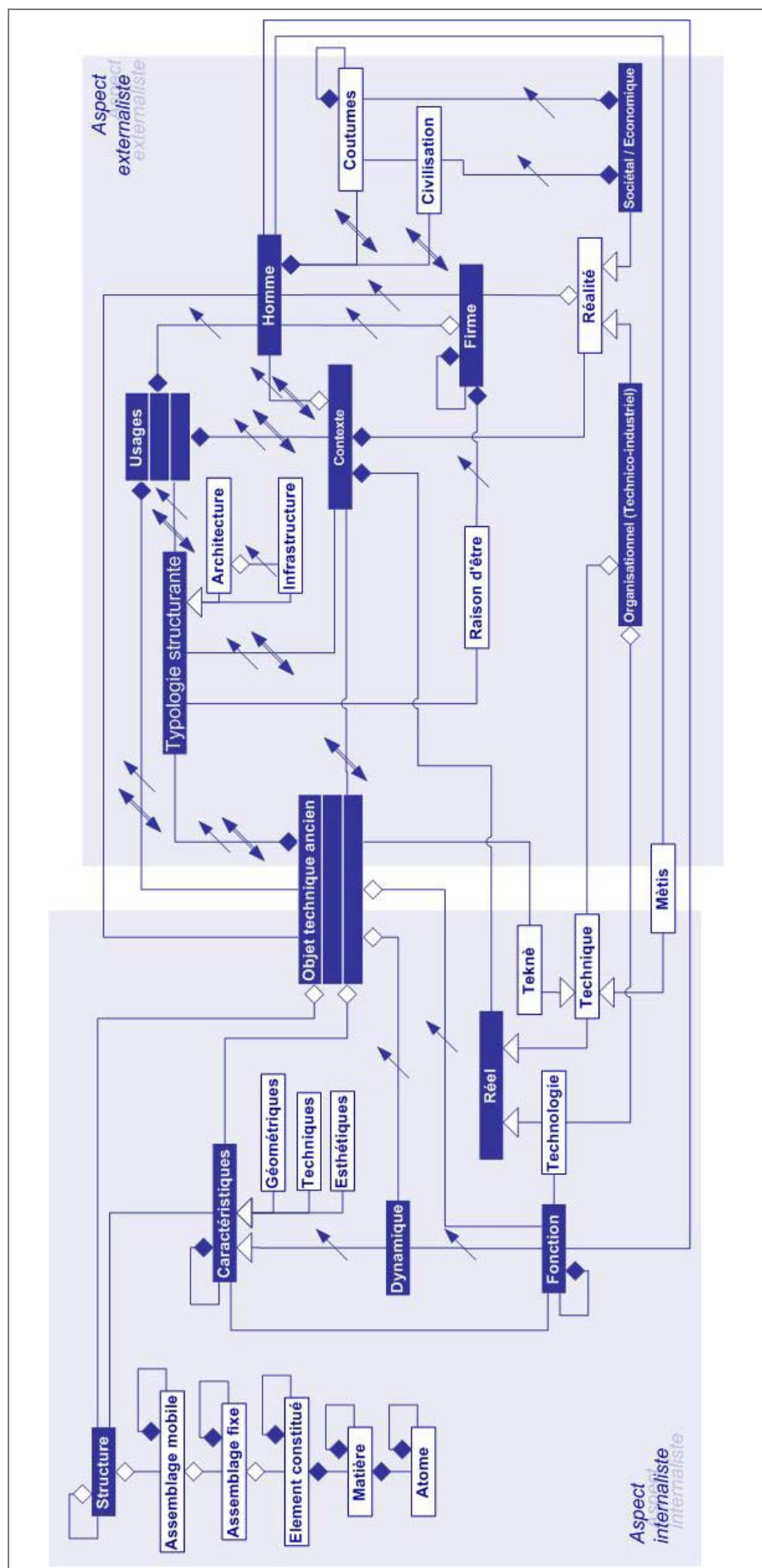


Figure 127 : MODELE D'USAGE IDEALISE DE L'OBJET TECHNIQUE ANCIEN

5.4.2 VERS UN MODELE UNIFIE

La cartographie de l'objet en utilisation dans une temporalité appartenant au passé distingue trois vues principales. De plus, comme explicité dans la partie 2.1.2 de ce manuscrit lors de la définition du patrimoine matériel naturel et culturel, ces vues valident l'hypothèse du triptyque du patrimoine en représentant ses trois catégories principales :

- ***l'objet***,
- ***l'homme***,
- ***l'environnement*** de l'objet et de l'homme.

Ces trois classes d'équivalence justifient la raison d'être de l'objet technique et appartiennent toutes à une de ses phases de vie : c'est la classe ***usage***³⁵⁴ (figure 128).

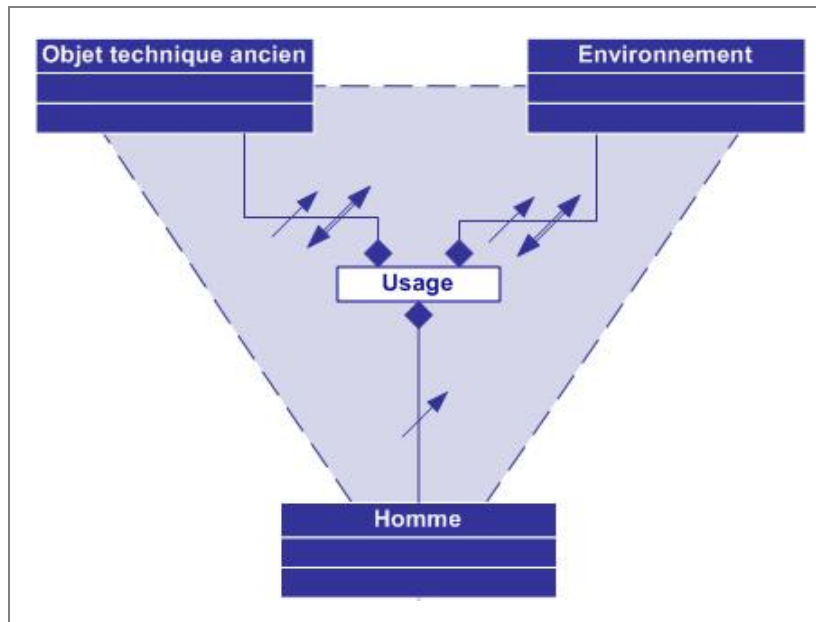


Figure 128 : LE TRIPTYQUE DE L'OBJET TECHNIQUE ANCIEN IDEALISE CONTEXTUALISE DANS SES USAGES

Or, comme mentionné sur cette ontologie, les classes manipulées présentent toutes des caractéristiques de multi-temporalité et de multi-dimensionnalité :

- Le paramètre *temps* peut se décliner comme : la mesure du temps d'exécution d'une fonction, la période de temps d'utilisation, le temps nécessaire à la fabrication, le temps de vie...
- Le paramètre *dimensionnel* peut s'exprimer selon : la structure interne de l'objet, l'organisation de l'entreprise, les différents niveaux contextuels...

La classe ***usage*** est donc elle aussi multi-temporelle et multi-dimensionnelle. Afin d'unifier ce triptyque, nous le nommons ***schème***.

³⁵⁴ Voir partie 5.3.3.5 pour la définition de l'usage en SPI ou phase de vie en SHS.

5.4.3 LA NOTION DE SCHEME³⁵⁵

Dans la philosophie kantienne, le mot schème est défini comme une représentation permettant de faire la liaison entre les catégories de l'entendement et les phénomènes sensibles.

Après avoir analysé les phénomènes mis en jeu, le schématisme permet d'analyser les principes les régissant.

Dans son ouvrage *Critique de la raison pure*, KANT écrit [KANT rééd.1984] :

Une application de la catégorie aux phénomènes sera donc possible au moyen de la détermination transcendantale de temps, et cette détermination, comme schème des concepts de l'entendement, sert à opérer la subsomption des phénomènes sous la catégorie.

Pour KANT, le concept de l'entendement stipule que l'expérience n'est possible qu'en raison de l'usage *a priori* des concepts. Cela signifie que les concepts sont purs et qu'ils n'ont aucun rapport avec le *réel*³⁵⁶. La *réalité* devrait permettre d'appréhender les sens du *réel* et donc aider à la production de concepts. Ce qui n'est pourtant pas le cas ici. Cela signifie que l'usage transcendantal de la raison n'a aucune valeur objective [DAVAL 1950]. Dès lors, comment est-il possible de généraliser le particulier sans subir l'auto-influence du conceptualisateur ? KANT propose la solution de l'imagination.

La terminologie de *l'imagination* prend ses racines dans le mot *image* et renvoie immédiatement au spatial : il s'agit d'une tentative de schématisation du *réel* formalisant, en fait, la *réalité*. Mais l'imagination n'est pas un concept formalisable et partageable. Il faut un terme intermédiaire donnant du sens aux concepts et se devant d'être sensible et intellectuel : c'est le *schéma*.

Le mot *schème* provient de l'allemand *schema* qui est dérivé du grec et signifie forme, figure... Le *schème* sert à phénoménaliser les concepts. Schématiser, c'est donner une issue sensible à des concepts. Le schématisme est alors la transposition d'une forme et la traduction de cette forme dans le sensible [DAVAL 1950]. Pour compléter la description sémantique du *schéma*, KANT propose même le terme de *schème transcendantal* [KANT rééd.1984].

Or, pour que le concept soit appréhendé comme phénomène, il faut le rendre accessible à tous et le phénoménaliser à l'aide du temps. En effet, selon KANT le temps est le cadre exclusif de la réalisation des phénomènes par toutes ses représentations et de toutes ses conceptualisations [KANT rééd.1984]. Dès lors, il est indispensable que le *schème* porte, de façon intrinsèque, une détermination temporelle.

Décontextualisé de son cadre temporel, l'objet demeure hors de portée.

³⁵⁵ Sources : <http://nezenlair.unblog.fr> et <http://www.barbery.net>

³⁵⁶ Voir partie 5.3.3.3

5.4.4 DEFINITION DU SCHEME ET CONTRIBUTION A L'AUTHENTICITE PATRIMONIALE

Dans l'introduction de cette partie 5.3, nous faisons l'hypothèse d'un objet original à multi-niveaux selon des descriptions :

- infrastructurale,
- architecturale,
- temporelle.

Ainsi, dans le cadre de nos recherches sur les **objets techniques anciens**, nous définissons le **schème** comme :

C'est l'ossature générale infrastructurale, architecturale et temporelle de la description d'une chose, d'un objet, d'un processus...

La description de **l'objet technique ancien** dans ses multi-dimensions et ses multi-temporalités est donc définie par le **schème** qui, dès lors, navigue dans un domaine physique à deux échelles complexes (figure 129).

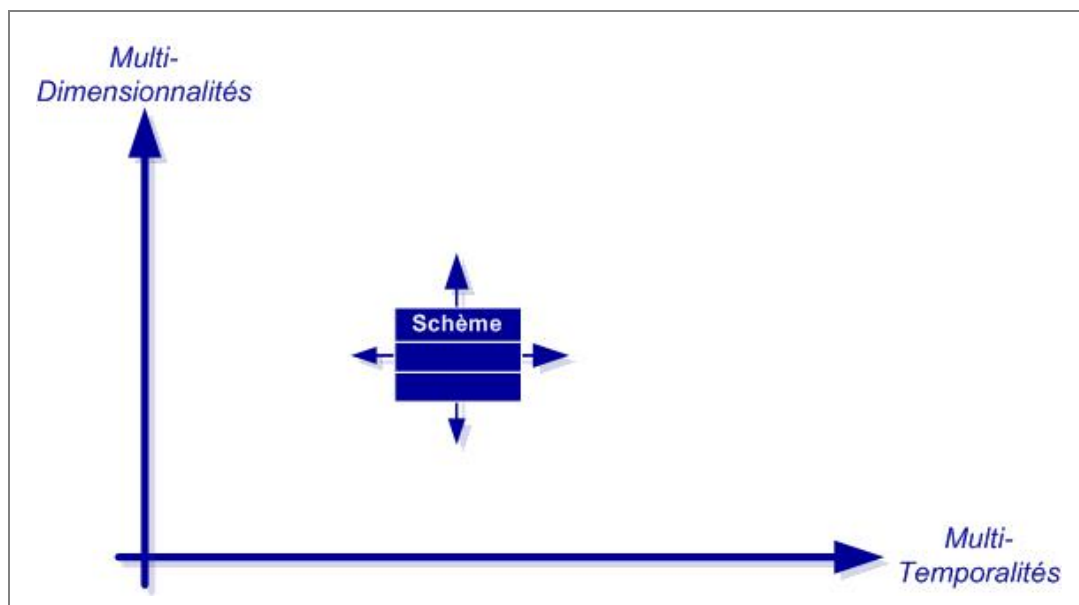


Figure 129 : LES MULTI-EHELLES DU SCHEME SELON DES AXES DIMENSIONNEL ET TEMPOREL

Selon les conservateurs de Musées, un **artefact** transmet une histoire, une technique et une pratique. Le **schème** répond à ce besoin et va au-delà des attentes de la muséologie grâce une capitalisation **archéologique industrielle avancée**. Le **schème** permet la conservation de la mémoire, des gestes, des métiers... Il porte les **valeurs** historique, sociale, architecturale et scientifique de l'objet [UNESCO 2005] en prenant en compte les paramètres fonctionnels, historiques et esthétiques [PRESSOUYRE 1993].

Si l'espace des **schèmes** est décrit dans sa complétude suivant ses multi-dimensions et multi-temporalités, il garantit alors la globalité des conditions d'authenticité du **patrimoine** spécifiées par l'UNESCO [UNESCO 2005] :

- forme et conception,
- matériaux et substance,
- usage et fonction,
- traditions, techniques et systèmes de gestion,
- situation et cadre,
- langue et autres formes de patrimoine immatériel,
- esprit et impression,
- autres facteurs internes et externes.

Le **schème** peut donc structurer les **connaissances** associées à **l'objet** qui porte les **valeurs** de ce qu'il est entendu par **patrimoine technique et industriel**.

5.4.5 LE DIGITAL HERITAGE REFERENCE MODEL

Une fois **l'objectum** admis, ce sont les **traces** qui viennent composer le **schème** : aussi bien les **bribes** des **vestiges** de **l'objet technique ancien** que les **sources** elles-mêmes. Le processus de patrimonialisation va alors pouvoir permettre de concevoir le nouvel état intermédiaire de **l'objet technique ancien** : le **Dossier d'Oeuvre Patrimonial Technique**. Il pourra ensuite être discrétisé en différentes finalités sous la forme de **Produits numériques**.

Ces deux étapes de transformations sont guidées par un méta-modèle conceptuel de données. Le système d'information utilisé pour gérer la sémantique des **états** et de **l'objet technique ancien** est appelé le **Digital Heritage Reference Model** ou **DHRM**. Notons que l'appellation anglaise est plus signifiante que le français signifiant littéralement Modèle Numérique de Référence Patrimonial [LAROCHE & al 2006d].

*Le schème est la description du schéma mental³⁵⁷ d'un objet dans son Système Technique. Il est temporalisé et dimensionnalisé.
Le DHRM permet la projection de la variation des états intermédiaires de l'objet technique ancien dans un espace multi-dimensionnel et multi-temporel du processus de patrimonialisation. Le DHRM est alors considéré comme atemporel et adimensionnel.*

Le méta-modèle ontologique du **DHRM** est décrit par la figure 130. Il intègre l'ensemble des concepts vus dans ce chapitre. De plus, notons que la relation temporelle établie entre la classe **états** et la classe **schèmes** stipule que **l'objet** peut avoir existé, avoir disparu ou ne posséder aucun état patrimonial quelconque... il s'agit simplement d'un **schème** de type souvenir.

³⁵⁷ La systémique en GI définit les schémas mentaux comme la façon dont l'être humain pense, réfléchit et agit. Il s'agit de la structure du méta-modèle le guidant.

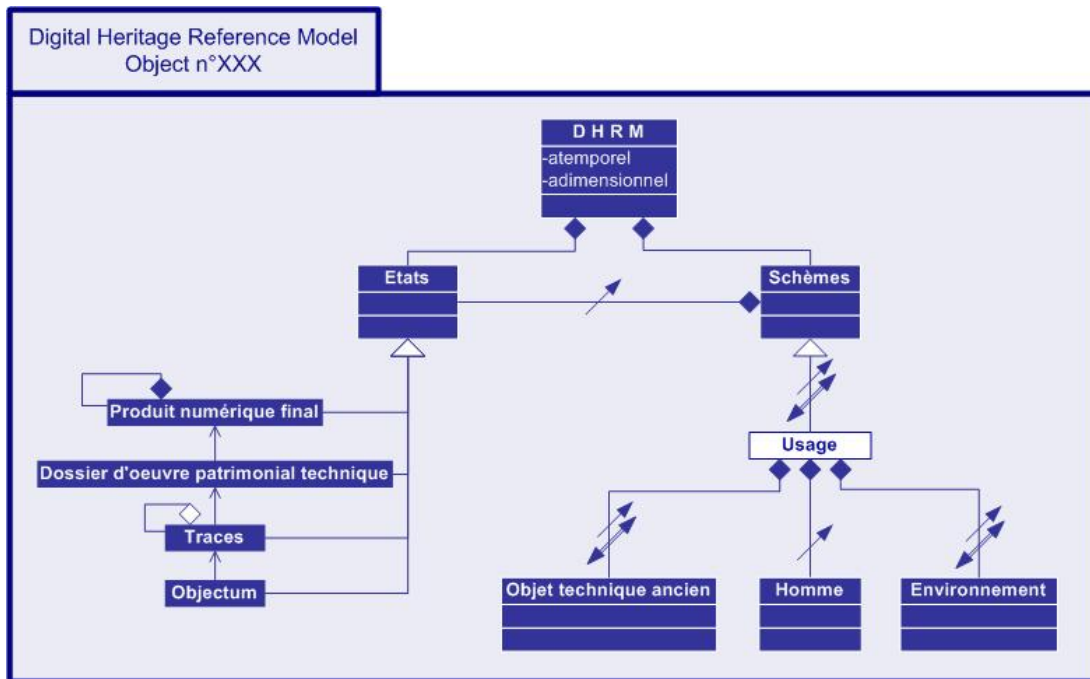


Figure 130 : LE META-MODELE DU DIGITAL HERITAGE REFERENCE MODEL

Le **schème** est *a priori* une projection dans le passé de ce qui est nommé **patrimoine industriel**. Mais la dimension temporelle est bijective et peut ainsi envisager *a posteriori* de projeter l'espace des **schèmes** dans le futur. Le **DHRM** incluant le **Dossier d'oeuvre Patrimonial Technique** via la **maquette numérique de référence** peut alors devenir une **source de connaissances** pour innover sur des **objets techniques nouveaux**. Le **DHRM** est alors transformé à son tour en une **trace**.

De plus, les **outils** utilisés lors de la phase **d'archéologie industrielle avancée** ou lors de la phase de **valorisation** peuvent également devenir des **objets techniques nouveaux**. Une nouvelle phase **capitalisation** peut alors débuter. Le **DHRM** est donc auto-encapsulé sous la forme d'un **paquet ontologique** : c'est la **spirale patrimoniale** [LAROCHÉ 2007a]. Celle-ci est illustrée par la figure 131 selon deux axes ne possédant pas de sens de lecture préférentiel :

- Aspect multi-dimensionnel : de l'infrastructure vers l'architecture ou de l'architecture vers l'infrastructure,
- Aspect multi-temporel : du passé vers le futur ou du futur vers le passé.

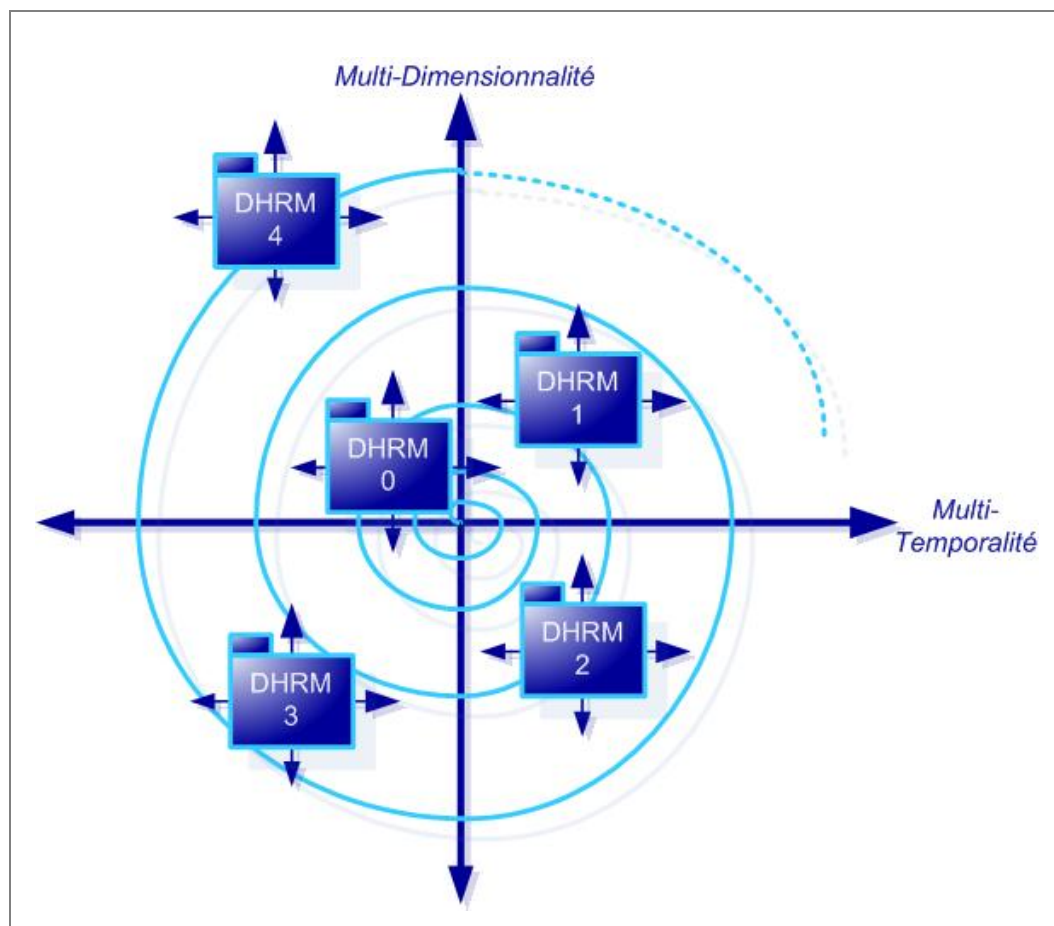


Figure 131 : LA SPIRALE PATRIMONIALE

5.5 SYNTHÈSE

*Dans ce chapitre, nous avons défini ce qu'est un **objet technique ancien** dans ses multiples aspects.*

On distingue :

- *L'aspect internaliste.* L'ontologie décrit la **structure** de **l'objet** et ses **caractéristiques** associées pour laquelle la **fonction** va créer une **dynamique**.
- *L'aspect externaliste.* L'ontologie met en regard **l'homme**, appartenant à une **firme**, qui a utilisé/fabriquée/... **l'objet**, qui a évolué dans un **environnement** et qui a donné lieu à la création d'un **contexte**.

*Pour définir les multiples **usages** en prenant en compte la vie de **l'objet technique ancien**, nous avons établi la notion de **schème** pour décrire cette situation passée.*

Les valeurs transmises par le **patrimoine technique et industriel** sont alors issues de la mise en corrélation des multiples **schèmes** décrivant **l'objet** dans son **usage** passé. Cette grille de lecture pourrait alors aider dans la démarche de recherche *d'authenticité* et *d'intégrité* promue par l'UNESCO pour classer un bien comme patrimoine de l'humanité.

*Dans une perspective d'utilisation des **outils** du processus de patrimonialisation dans un **environnement** donné, **l'objet** étudié va prendre différents **états** faisant ainsi évoluer le **schème** dans un espace à multi-temporalités et multi-dimensions.*

La méthodologie muséologique décrit alors trois états ponctuant les phases **d'archéologie industrielle avancée** et de **valorisation muséographique** :

1. Les **traces** sont définies par les **sources** et les **vestiges** composés de **bribes** de **l'objet technique ancien**,
2. Le **Dossier d'œuvre patrimonial technique** se décline en une **Maquette numérique de référence** et ses **connaissances** associées,
3. Le **produit numérique final** propose un **artefact** de représentation et ses **hypertextes**.

*L'encapsulation de l'ensemble du domaine ontologique définissant la sémantique manipulée est alors appelé **DHRM, Digital Heritage Reference Model**.*

Objet de représentation, objet de médiation, objet de structuration de la connaissance, dans un contexte universel ce méta-modèle se transforme alors lui-même en un objet intermédiaire.

Le **DHRM** et ses sous-classes associées ont pu être construits grâce à :

- l'analyse du besoin du chapitre 2,
- la mise en perspective dans le chapitre 3 des domaines concernés : l'Histoire des Techniques et le Génie Industriel,
- un exemple d'objet technique ancien qui a été analysé dans le chapitre 4.

Afin de valider le **DHRM** et démontrer son applicabilité, le chapitre 6 se propose d'étudier un objet dans ses *multi-dimensions temporelles et dimensionnelles* : une machine à laver le sel du 20^{ème} siècle en BRETAGNE.

De plus, afin d'enrichir le triptyque **homme – objet – outils** :

1. nous étudierons les possibilités offertes par la numérisation 3D au regard de ce cas d'étude du chapitre 6.
2. nous enrichirons la classe **homme** dans le chapitre 7 qui lui est uniquement dédié. A travers la mise en place du *rétro-processus de conception patrimoniale* dans un cadre pédagogique, nous mettrons en exergue les métiers composant *l'équipe inter-disciplinaire* nécessaires à la compréhension d'un **objet technique ancien**.

Précisons que la phase de **valorisation muséographique** ne sera pas traitée dans la suite cette thèse car celle-ci relève de compétences nouvelles comme la sociologie ou l'ethnologie afin de déterminer les besoins en fonction du public ciblé. En effet, en postulant que, grâce au **DHRM**, le **Dossier d'œuvre patrimonial technique** est décrit dans sa complétude, tout type de valorisation est envisageable. Les potentialités liées à son utilisation sont alors nombreuses et celles-ci pourraient faire l'objet de nouvelles thématiques de recherche voire même de nouveaux travaux de doctorat pour lesquels nous proposerons des pistes d'investigations dans notre conclusion générale.

6. APPLICATION ET VALIDATION DU DHRM : CAS D'ETUDE DE LA MACHINE A LAVER LE SEL DE BATZ-SUR-MER

Dans le chapitre précédent, *l'objet technique ancien* a été caractérisé de l'infiniment petit à l'infiniment grand. Le niveau de conceptualisation atteint peut sembler flou et paraître loin de notre préoccupation première : la *patrimonialisation*. Mais l'introduction de ces *modèles d'usages* et du méta-modèle *DHRM* est nécessaire pour conduire et enrichir *l'objet*.

L'objectif de ce chapitre 6 est d'illustrer l'instanciation³⁵⁸ de ces ontologies en démontrant l'intérêt du DHRM et en justifiant la pertinence des modèles d'usage.

S'agissant d'artefacts à caractère industriel, la démarche de patrimonialisation à mettre en œuvre s'apparente à celle de la conception mécanique. Cependant, l'axe du temps du processus est renversé. Ainsi, les *traces*, les *sources* et les *vestiges* retrouvés permettent de restituer *l'objet technique ancien* dans un nouvel *état* intermédiaire de représentation. Grâce à sa digitalisation³⁵⁹, il est ainsi possible de le modéliser en vue d'une remise en situation d'usage virtuelle.

La méthodologie de muséologie est orientée ici selon la première phase temporelle $A \rightarrow B$ ³⁶⁰ : c'est le travail *d'archéologie industrielle avancée*. Le processus associé consiste à remonter le temps de développement : il s'agit dès lors d'un *rétro-processus de conception*. De plus, comme vu dans le chapitre précédent, une contextualisation de *l'objet technique ancien* dans son *aspect externaliste* est indispensable pour déployer un *schème* complet de cet *objet* : c'est le travail de *reverse-engineering contextualisé*.

³⁵⁸ Utilisé en programmation orienté objet, l'instanciation permet d'affecter une valeur à une classe d'équivalence. Il s'agit des actions d'allocation et d'initialisation de classes.

³⁵⁹ On entend ici par digitalisation la définition anglosaxonne du terme. Cette action consiste à transformer un élément physique matériel en une suite de données numériques sous la forme de 0 et de 1.

³⁶⁰ Voir parties 5.2.2 et 5.2.3

Les principales étapes successives relatives à ce nouveau processus sont :

1. analyse de *l'usage internaliste* pour en déduire le *schème a priori*,
2. complétude par l'étude de *l'usage externaliste* afin de valider le *schème rationnel*.

Dans ce chapitre :

1. Nous allons tout d'abord expliciter la méthodologie à développer pour parvenir à un *schème rationnel* de *l'objet technique ancien*.
2. Ensuite, nous validerons cette hypothèse grâce au cas d'étude de la machine à laver le sel de BATZ-SUR-MER (44). L'analyse sera présentée suivant l'axe temporel de déroulement de la phase d'*archéologie industrielle avancée*.

6.1 UN NOUVEAU PROCESSUS D'INGENIERIE

6.1.1 LE PROCESSUS DE CONCEPTION CLASSIQUE

Lors d'une démarche de conception classique, la méthode APTE [AFNOR 2007] est déroulée selon les étapes décrites par la figure 132. La finalité encourue ici est la construction de prototypes réels et/ou virtuels [AOUSSAT & al 1998] afin de pouvoir, par la suite, les industrialiser à grande échelle.



Figure 132 : LA DEMARCHE DE CONCEPTION STANDARD D'UN OBJET INDUSTRIEL CONTEMPORAIN

L'élément dominant dans ce processus est, sans nul doute, la *Fonction Principale* pour laquelle *l'objet* est créé :

- la partie en amont du processus permet, à partir d'une idée, de définir la *Fonction* et de la caractériser dans son *environnement* (étapes 1 et 2),
- la partie en aval du processus décline cette *Fonction* en un *objet* réel palpable (étapes 3 et 4).

6.1.2 LE RETRO-PROCESSUS DE CONCEPTION CONTEXTUALISE

La démarche développée dans le cadre d'une rétro-conception d'objets industriels à caractère patrimonial propose les mêmes étapes citées précédemment et utilise les mêmes outils que la démarche classique mais commence son investigation depuis la fin du processus (voir illustration sur la figure précédente) [LAROCHE & al 2007c].

En reprenant la définition du domaine ontologique décrit par le méta-modèle de données DHRM vu dans le chapitre 5, nous avons mis en place un nouveau rétro-processus de conception adapté au cadre patrimonial (figure 133).

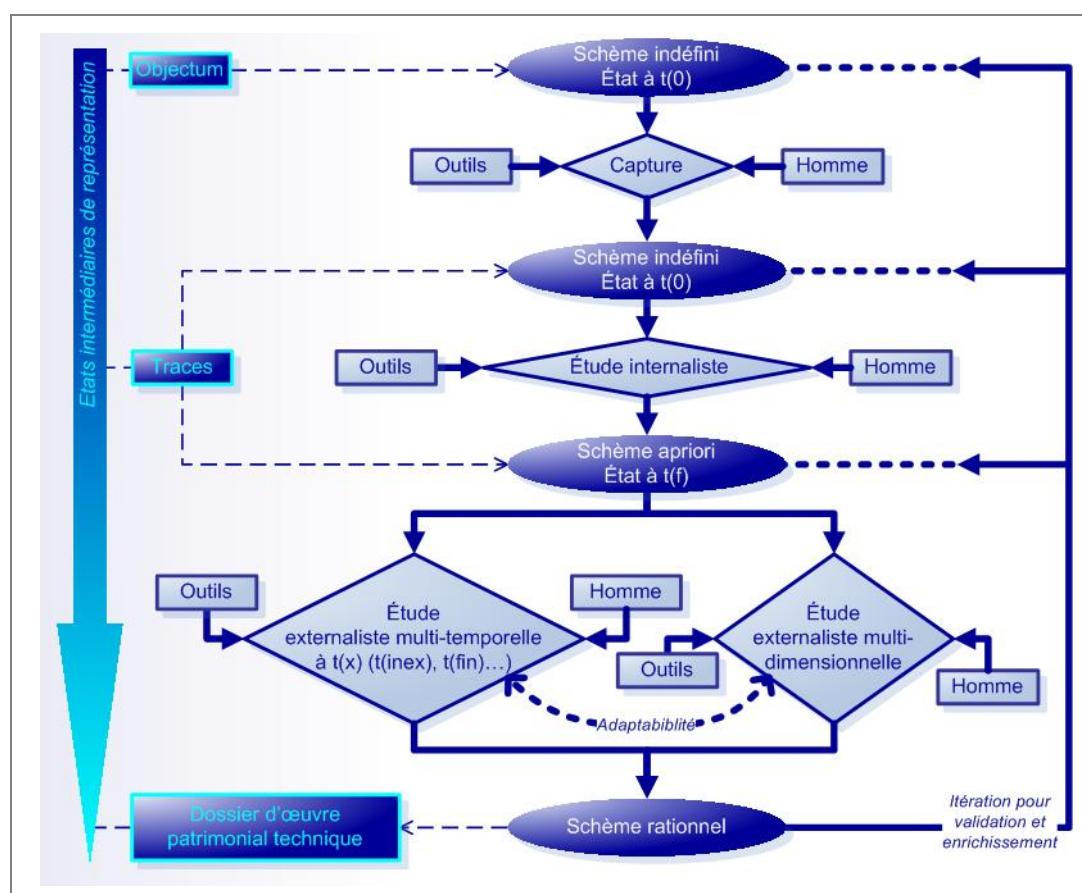


Figure 133 : PATRIMONIALISATION : LE RETRO-PROCESSUS DE CONCEPTION CONTEXTUALISE

L'élément dominant dans ce processus patrimonial est toujours la définition et la caractérisation de la *Fonction Principale* de l'objet étudié comme dans le processus de

conception contemporain. Cependant, répondant à une situation d'usage vécue, il ne s'agit plus d'une *seule fonction* telle que définie dans la phase de conception mais de *plusieurs fonctions* positionnables dans un espace multi-dimensionnel et multi-temporel. Les fonctions nécessitant d'être contextualisées donnent naissance à des **usages**. Il s'agit alors de globaliser la taxonomie des **usages** en utilisant la classe d'équivalence **schème**³⁶¹ (●). Nous allons détailler ci-après les différents statuts du **schème**.

Remarquons d'ores et déjà que la classe **objet** se décline en plusieurs statuts. Ces **sources** sont formalisées par les **états** (■) de représentation intermédiaire de **l'objet**. Ils sont eux-mêmes exploités comme données d'entrées ou de sorties du rétro-processus : **objectum**, **traces** et **Dossier d'œuvre patrimonial technique**.

Les **ressources** (□) des **activités** (◇) sont définies par le triptyque vu précédemment dans la partie 5.2.5 sur la synthèse des **états du processus de patrimonialisation**. Ainsi, **l'objet** étant au cœur de la phase **d'archéologie industrielle avancée**, les **outils** et les **métiers**³⁶² possèdent des sous taxonomies descriptives.

Les **outils** de **capture** pouvant être les outils de **KM** et de **digitalisation**³⁶³ ; puis, dans **l'étude internaliste**, il s'agit de **l'ingénierie** et de la **modélisation** ; etc. La taxonomie de la classe **outils** n'est pas restrictive.

Quant aux ressources **métiers** de **l'homme**, nous enrichirons cette taxonomie dans le chapitre 7.

6.1.2.1 Un schème multi-dimensionnel

La notion de multi-niveaux dimensionnels permet d'élargir le champ d'investigation archéologique au fur et à mesure de l'étude selon le concept des *poupées russes*. Le rétro-processus de conception est alors dirigé par la **typologie structurante** de **l'objet technique ancien**. L'encapsulation successive de **l'infrastructure** et de **l'architecture** sur l'ensemble du modèle d'usage³⁶⁴ dégage ainsi les deux vues caractéristiques de l'objet analysant **l'aspect internaliste** puis **l'aspect externaliste**³⁶⁵.

Cependant, ces deux aspects sont souvent indissociables et des éléments externalistes doivent parfois être intégrés dès l'étude **infrastructurale** de **l'objet technique ancien**. *Al fine*, **l'étude externaliste multi-dimensionnelle** peut même faire appel à des notions issues de la macro-histoire.

³⁶¹ Voir partie 5.4.4

³⁶² Les métiers sont déclinés par la classe d'équivalence **homme**.

³⁶³ La digitalisation inclue aussi bien les mesures manuelles que la numérisation 3D.

³⁶⁴ Voir partie 5.4.2

³⁶⁵ Voir partie 5.4.1

6.1.2.2 Un schème multi-temporel

La notion de multi-temporalité est présente dans les différentes étapes du processus grâce au paramètre temps t_x . L'indice x fait ici référence aux différentes phases du cycle de vie du produit considéré [LAROCHE & al 2006c] :

- t_{inex} = le temps où l'objet est inexistant, il n'existe pas encore ; c'est le moment où un manque est constaté et que le besoin est en train de naître,
- t_{fab} = il s'agit du moment où l'objet est développé puis fabriqué,
- t_f = c'est la phase de vie fonctionnelle ; notons que, comme vu précédemment, plusieurs phases de vie en utilisation peuvent s'observer sur un objet devenu patrimoine,
- t_{fin} = la fin de vie ; l'objet perd son usage et sa fonction pour laquelle il a été créé,
- t_0 = c'est le temps présent dans lequel se déroule la phase d'archéologie.

Ainsi, le processus de patrimonialisation nécessitera d'analyser l'ensemble des **usages** de **l'objet technique ancien** selon une discrétisation temporelle de cycle de vie.

La figure 134 illustre cette paramétrisation de la vie de l'objet en se basant sur le PLC étendu défini dans la partie 5.3.3.5 de ce manuscrit. Ce schéma n'est qu'un guide de compréhension. Il doit être considéré ici uniquement à titre d'exemple car il serait limitatif de prétendre à une généralité des cycles de vie des objets industriels patrimoniaux. En effet, de nombreux facteurs peuvent venir diversifier la discrétisation du temps t_x comme vu précédemment dans le chapitre 2 portant sur les objets *artisanats*, *industriels* et *proto-industriels*.

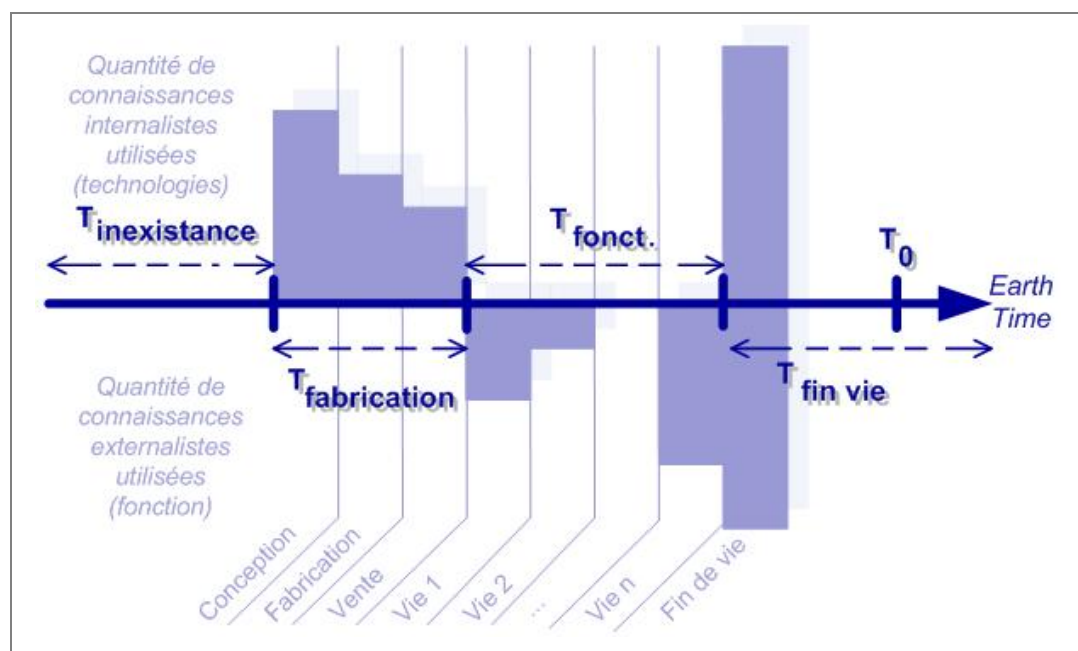


Figure 134 : PLC ETENDU AVEC PARAMETRISATION TEMPORELLE

De plus, l'étude externaliste peut intégrer des études comparatives à multiples niveaux sur d'autres **d'objets** similaires à t_0 ou à t_x . Que ces **objets** soient contemporains à notre **civilisation** ou appartiennent à une **civilisation** dans un **état** passé, des relations de type génétique³⁶⁶ permettent d'enrichir le **schème rationnel**.

6.1.2.3 Une nouvelle temporalité : schème a priori et schème rationnel

Lors de la phase d'*étude internaliste*, une première analyse dirigée par un Bloc Diagramme Fonctionnel permet, outre l'analyse des **caractéristiques** de l'objet, de déterminer sa **dynamique** selon sa **structure**³⁶⁷. En affinant cette étude, il est possible d'en déduire les aspects fonctionnels alimentés par les flux d'entrées et de sorties de matière, d'énergie... L'analyse à t_0 permet alors d'en déduire un usage envisagé à t_t : c'est le **schème a priori**.

Or l'introduction du **contexte** socio-économico-technique va proposer une deuxième hypothèse du **schème** qui va être validée par **l'aspect externaliste**³⁶⁸. En adaptant **l'objet technique ancien** de l'environnement **réel** à sa **réalité**³⁶⁹, il donne naissance au **schème rationnel** pour lequel **l'objet** a été construit et utilisé dans sa périodisation.

On notera que les *études externalistes multi-dimensionnelles et multi-temporelles* sont souvent confondues afin de palier à la complexité de représentation du ST.

De plus, la classe **schème** possède également un cycle de vie temporalisé par la phase d'**archéologie industrielle avancée**. De nombreuses itérations entre ses différents **états** sont nécessaires pour valider et enrichir le **DHRM** : il s'agit là d'une nouvelle taxonomie hiérarchisée temporellement.

³⁶⁶ Voir partie 3.2.4

³⁶⁷ Voir partie 5.3.1.5

³⁶⁸ Voir partie 5.3.3.6

³⁶⁹ Voir partie 5.3.3.3

6.2 CAS D'APPLICATION DU DHRM : LA MACHINE A LAVER LE SEL DE BATZ-SUR-MER

L'étude de cas qui suit va permettre d'illustrer la méthodologie proposée ci-avant. Un compte-rendu de cette expérience selon une forme narrative classique aurait rendu la lecture de l'exemple plus aisée. Cependant, notre objectif étant de déployer la *méthodologie de patrimonialisation en reverse-engineering contextualisé* afin de démontrer la pertinence de la démarche, nous avons volontairement choisi d'exposer cet exemple sous la forme d'un témoignage. Cette étude répond à une série de questions-réponses auxquelles les acteurs du projet ont été confrontés. A chaque étape, un objectif est visé, ses hypothèses sont formalisées et validées. Ainsi, en préliminaire de chaque sous-partie de l'étude :

1. le **schème** considéré pour la sous-étude sera positionné dans l'espace ontologique du méta-modèle **DHRM**,
2. les *classes d'équivalence* impactées dans le **schème** seront précisées.

Tout comme pour le précédent cas d'étude de la machine à vapeur PIGUET n°135 du chapitre 4, une liste des sources et de la bibliographie générale de ce nouveau cas d'étude est jointe en fin de ce manuscrit. Une critique des sources est également présente en introduction au classement.

Notons que les informations contenues dans cette étude sont issues du recoupement de multiples analyses techniques ou historiques. De plus, ces dernières proviennent elles-mêmes d'études réalisées grâce à des sources historiques. Aussi, l'ensemble des connaissances produites dans notre étude n'est qu'hypothèse. En effet, les résultats que nous apportons sont à confronter avec les conclusions d'études historiques classiques à mener ultérieurement. Malgré tout, l'intérêt de cette démonstration réside dans la mise en exergue de la notion de contexte d'un objet industriel. C'est cette mise en conditionnement qui devra retenir l'attention du lecteur.

6.2.1 LE TERRAIN ARCHEOLOGIQUE : CONTEXTE GENERAL ET BUT ENCOURU

En 1984, le Musée des Marais Salants s'ouvre à BATZ-SUR-MER en LOIRE-ATLANTIQUE. Il est l'héritier du Musée des Anciens Costumes, un des premiers Musées d'Arts et Traditions Populaires de l'Ouest de la FRANCE, fondé à BATZ en 1887. Depuis 2006, il est reconnu Musée de FRANCE³⁷⁰.

Le Musée des Marais Salants propose une exposition permanente sur 250 m² qui conjugue Histoire et Mémoire pour répondre à la curiosité de tous publics. Des collections ethnographiques, documentaires et Beaux-Arts racontent l'aventure technique et humaine des marais salants, des origines à nos jours, et font découvrir la richesse patrimoniale du

³⁷⁰ Source : [GODIN 2006]

Pays de GUERANDE façonnée par 2 000 ans d'histoire du sel. Cette collection se présente sous la forme :

- de mobiliers, de costumes, de céramiques, d'objets domestiques, de gravures, de tableaux, de cartes postales... pour témoigner d'une époque passée,
- d'outils utilisés jadis pour le travail du sel, de maquettes physiques... afin d'informer le visiteur sur les techniques traditionnelles des paludiers³⁷¹ d'hier et d'aujourd'hui.

Avec 400 m² de surfaces d'accueil, le Musée reçoit annuellement environ 30 000 visiteurs. Mais dès l'ouverture du nouvel équipement, se pose le problème d'absence de réserves pour les collections non exposées ou acquises dans le cadre d'enrichissements par dons ou achats, ainsi que l'absence d'un lieu consacré aux expositions temporaires.

En 1987, confrontés à ce cruel manque d'espaces, les conservateurs du Musée recherchent de nouveaux locaux. Ils repèrent à proximité un ensemble architectural de 2900 m². Construit en granit de la région avec un plancher en bois et un toit en ardoises, ce bâtiment industriel aurait été utilisé comme Magasin à sel.

A l'intérieur, le bâtiment principal contient une machine faite de bois et de métal³⁷². Les premières analyses révèlent qu'elle devait traiter un produit qui l'a dégradé au fil du temps : le sel.

La figure 135 est un plan d'implantation cadastral daté de 1998 positionnant :

- le Musée des Marais Salants (angle de la rue PASTEUR et de la rue du TRAICT)
- les Magasins BERTRAND de la CROIX DE PAIX (donnant sur la rue du TRAICT).

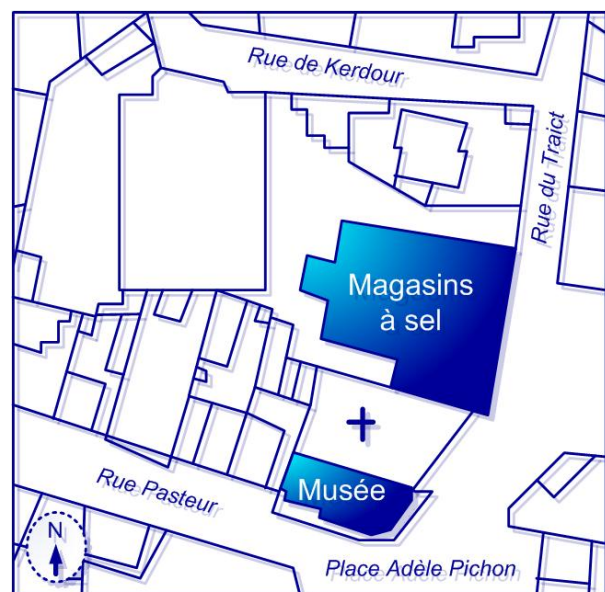


Figure 135 : PLAN D'IMPLANTATION CADASTRAL DU MUSÉE DES MARAIS SALANTS ET DES MAGASINS A SEL BERTRAND, BATZ-SUR-MER

³⁷¹ Les paludiers sont les producteurs de sel.

³⁷² Latitude 47°16'44.37" Nord et longitude 2°28'41.33" Ouest.

La découverte de cette machine industrielle en ruine va nous emmener au delà de nos espérances. La démultiplication des niveaux dimensionnels et temporels de cet objet technique ancien soulève de nombreuses questions pour valider l'hypothèse énoncée précédemment : Pourquoi une machine à laver le sel ? Pourquoi le sel ? Comment fonctionne le lavage du sel ? A quoi cela sert-il ? Pourquoi cette machine a cessé de fonctionner ? Pourquoi n'en existe-t-il plus ?

Dès lors, une démarche de conservation et d'investigation s'entame pour étudier cet objet et comprendre son intégration dans ce système technico-industriel complexe.

6.2.2 DE L'OBJECTUM A L'ARTEFACT : LA SAUVEGARDE D'UN OBJET PATRIMONIAL³⁷³

6.2.2.1 Positionnement du schème étudié dans l'espace du DHRM et classes impactées

Cette première partie d'étude archéologique fait évoluer le statut de l'**objet technique ancien** de l'état **d'objectum** à celui de **traces**.

Le **schème** se positionne dans notre temps présent t_0 . **L'usage** associé est celui du sentiment procuré par **l'objectum**³⁷⁴. Il nous incite à vouloir prouver le caractère **authentique** de l'objet et sa **valeur exceptionnelle**. Ce sera l'objet des **études internalistes et externalistes** approfondies ci-après.

Cependant, ce n'est qu'ici, à l'origine du **processus de patrimonialisation**, que l'ensemble de la **typologie structurante** de l'**objet technique ancien** est perçue depuis son **infrastructure** jusqu'à son **architecture**. Il s'agit d'une première hypothèse de **schème a priori** que nous enrichirons par la suite et validerons par **l'étude externaliste** pour aboutir au **schème rationnel**. **L'objet** est considéré :

- tant au niveau des vis ou des planches de bois le composant,
- que de la machine entière,
- ou de la globalité du site industriel.

Orientée vers les **bribes**, la **capture physique** statue uniquement sur la phase d'**immortalisation** de **l'objet** : relevés manuels, photographies, numérisation 3D. Une première vue partielle du **DHRM** se distingue alors comme illustrée par la figure 136.

³⁷³ Source : [BURON & al 2005]

³⁷⁴ Voir partie 5.2.5.1

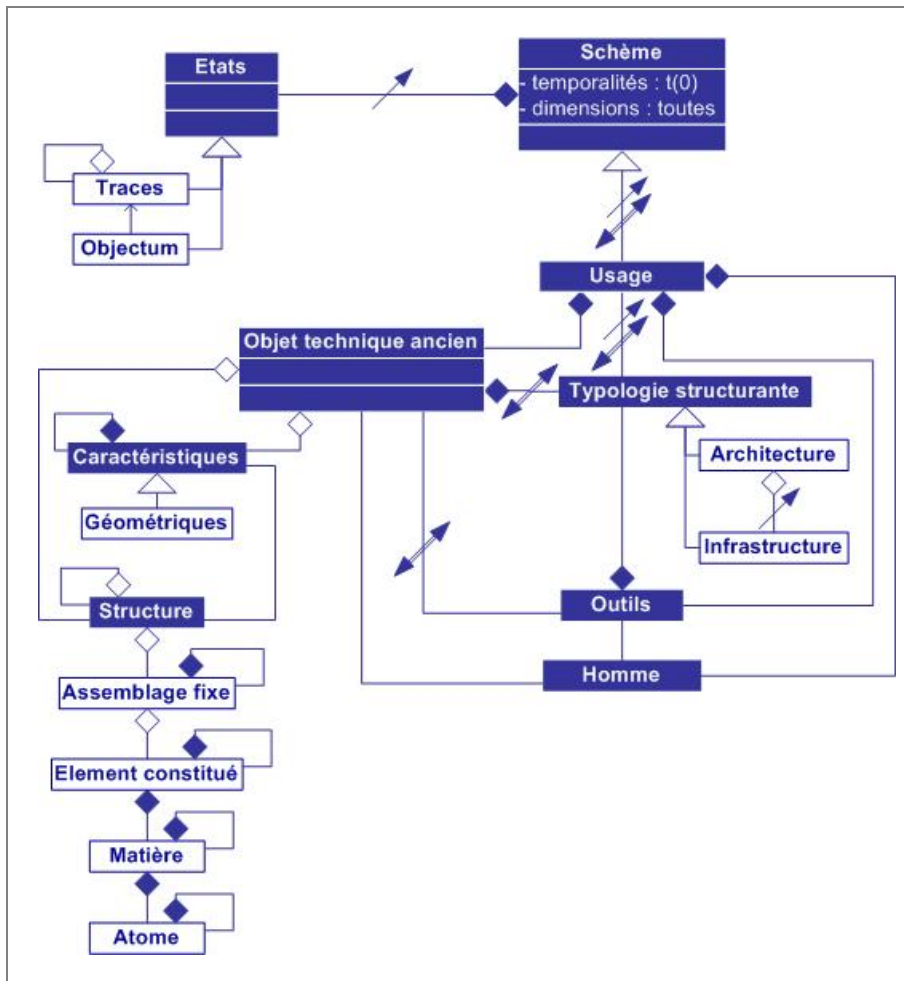


Figure 136 : CAS D'ETUDE DE BATZ-SUR-MER - DIAGRAMME DE CLASSES INTERMEDIAIRE DU DHRM - DE L'OBJECTUM A L'ARTEFACT : LA SAUVEGARDE D'UN OBJET PATRIMONIAL

6.2.2.2 Découverte de l'objet et premiers relevés d'ensemble

A la vue de cet objet dans un état de ruine très avancée, une atmosphère particulière se dégage. Les acteurs du processus de patrimonialisation en sont presque tous tombés *amoureux*. Chacun se pose de nombreuses questions et fait un nombre incalculable d'hypothèses quant à son fonctionnement, sa construction, son utilisation...

Dans le cadre d'une étude de programmation muséographique, la question de la conservation de cette machine faite de bois et de métal gorgée de sel s'est rapidement posée. Un état sanitaire a mis en évidence que sa désintégration est inexorable.

Ainsi, l'objet se dégradant très rapidement avec le temps, il se devait avant tout d'être *immortalisé*. Pour ce faire, une campagne de clichés photographiques a été menée par les conservateurs du Musée.

La vue générale de la figure 137 ci-après a été prise en 2007. Pour donner une notion d'échelle des dimensions relativement conséquentes de la machine, la hauteur sous poutre est de 3.25 mètres et la hauteur totale des fermes est de 7.80 mètres. L'emprise au sol est d'environ de 20 m². En annexe 22 figurent plusieurs vues complémentaires de la machine

démontrant son état de dégradation et les composants subissant les outrages du temps (2000, 2005 et 2006). Exemple : destruction de la gouttière et du système de ramassage du sel.



Figure 137 : LA MACHINE A LAVER LE SEL EN 2007

Afin de compléter cette première collection et d'aider à la compréhension du fonctionnement du processus technique, d'autres relevés à mains sont réalisés : relevés d'architecte. La figure 138 est la vue de face ; en annexe 23 figurent les deux autres vues de droite et de gauche. Précisons qu'il s'agit là de croquis et non de plans : certains détails sont extrapolés et peuvent ne pas être technologiquement réalistes.

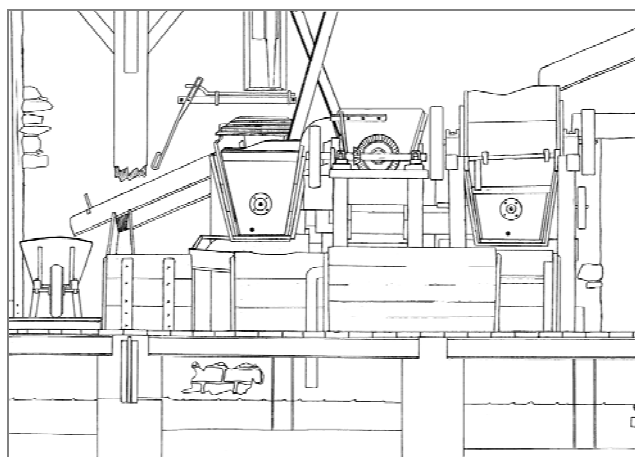


Figure 138 : RELEVÉ D'ARCHITECTE – LA LAVERIE (VUE DE FACE)³⁷⁵

³⁷⁵ Source : [BURON 2004]

6.2.2.3 Numérisation 3D et fouilles archéologiques

La seconde approche a consisté à produire un relevé précis de la machine replacée dans son cadre architectural pour la conserver à un état daté. La digitalisation de la machine a été réalisée par le cabinet d'architecture MOREL MAPPING WORKSHOP spécialisé dans le domaine de la numérisation de grands ensembles architecturaux. L'opération a été effectuée grâce à un scanner LEICA : laser Cyrax 2500³⁷⁶. Ceci a permis d'obtenir une *photo 3D* de l'objet (figure 139). En annexe 24 figurent les premiers relevés techniques réalisés par le cabinet d'architecture.



Figure 139 : NUAGE DE POINTS, VUE DE FACE-DROITE

De plus, durant l'étude mécanique internaliste décrite ci-après, un travail de fouilles archéologiques a été nécessaire : mesures manuelles sur site en dégagant les *bribes* amoncelées les unes sur les autres.

Ainsi, d'autres relevés à main intermédiaires ont été effectués. Ils viennent compléter la collection du Musée des Marais Salants de BATZ-SUR-MER pour renseigner le *dossier d'œuvre* de cette machine. Exemple sur la figure 140 : les engrenages et la position des pales des vis d'ARCHIMEDE.

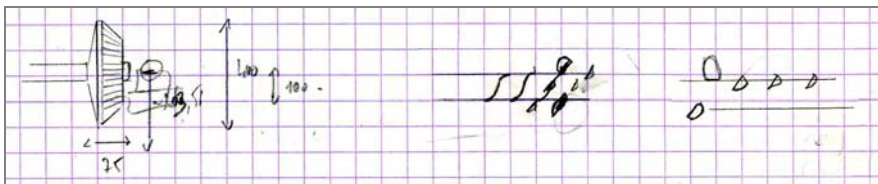


Figure 140 : RELEVÉS À MAIN A VISEE MECANIQUE³⁷⁷

³⁷⁶ Le laser Cyrax 2500 de la société LEICA permet de relever 1 point tous les millimètres à une distance de 100 mètres. Si le scanner est plus proche de l'objet, la précision en est alors augmentée.

³⁷⁷ Source : [DEROUENE 2005a]

On notera la présence sur le site d'un matériel annexe qui posa quelques problèmes de compréhension : la brouette. Cet objet en bois semble être totalement artisanal. Ainsi, les liaisons encastrement ou appuis-plans ne sont pas parfaites et la modélisation est extrêmement délicate³⁷⁸. En annexe 25 figurent une photographie d'ensemble prise en 2005 ainsi que des extraits des schémas techniques de mesure et d'assemblage de la brouette réalisés sur le site archéologique.

6.2.3 ETUDE MECANIQUE INTERNALISTE VIA LA MODELISATION 3D : VERS UN SCHEME A PRIORI

6.2.3.1 Positionnement du schème étudié dans l'espace du DHRM et classes impactées

Cette nouvelle phase de compréhension de *l'objet* est orientée sur :

- le fonctionnement mécanique de la machine,
- la façon dont elle a été construite³⁷⁹.

Il s'agit d'analyser les composants unitaires de la machine et leurs interactions. Les **caractéristiques** et la **structure** de *l'objet technique ancien* génère alors une **dynamique** pour répondre à un objectif donné : c'est sa **fonction**. S'inscrivant dans un **contexte technologique**, le processus industriel se décline par un **usage** nommé **schème a priori**. En effet, à ce stade de l'étude, la raison de l'existence de *l'objet technique ancien* n'est pas encore découverte. Aussi, dans cette *étude internaliste*, le **contexte réel** est déterminé par la **technologie** mais les classes d'équivalence **métis** et **tecknè** ne sont que des hypothèses. De même, le **contexte organisationnel**, pris dans sa **typologie structurante** à un niveau microscopique **infrastructural** et appartenant à la **réalité**, est également hypothétique. C'est seulement à l'issue des *études externalistes* que celui-ci pourra être validé. Même si incertain sur certains points, l'*aspect internaliste* de *l'objet* est désormais cerné dans un ensemble cohérent.

Cette *étude internaliste* va progressivement projeter le **schème a priori** déterminé précédemment dans un nouvel espace temps : la période pendant laquelle *l'objet technique ancien* fonctionnait. L'espace multi-temporel de *l'usage* considéré est alors transféré de t_0 à t_f .

Mais *l'analyse internaliste* de *l'objet* ne peut se satisfaire en elle-même. Aussi, certains **composants structurels** de la machine prennent leurs origines dans un **schème** d'une **typologie structurante** parallèle au **schème** étudié de *l'objet*. La classe **firme** permet alors d'accéder à ces informations de **contextualisation**. Par exemple, dans l'espace temporel considéré, la standardisation de certaines pièces peut nécessiter de retrouver le fabriquant. Les premières hypothèses sur le **contexte socio-économique** et la classe **homme** à t_0 peuvent être formulées.

³⁷⁸ Voir partie 4.4.2.3

³⁷⁹ Nous verrons dans la suite de ce chapitre que cette machine a été construite il y a plus de 90 ans.

L'état de *traces* est peu à peu quitté pour laisser place à l'état de **Dossier d'œuvre patrimonial technique**. Précisons la composition du **DHRM** à un niveau macroscopique (figure 141). Notons que, même si encore incomplet, l'ensemble de ces hypothèses permettent d'enrichir le **DHRM**. Le méta-modèle couvre désormais l'intégralité de *l'usage idéalisé de l'objet technique ancien* comme défini au chapitre 5.

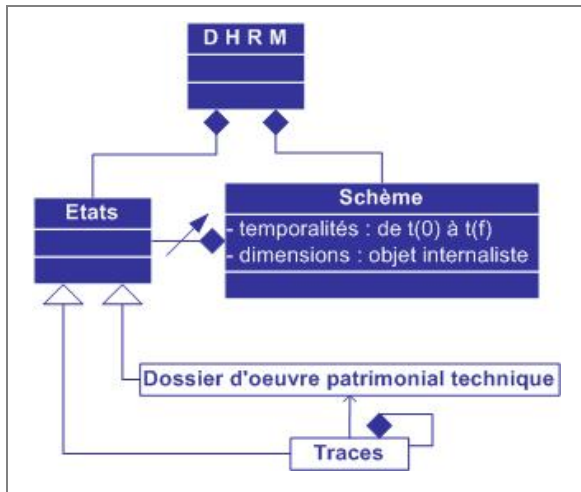


Figure 141 : CAS D'ETUDE DE BATZ-SUR-MER - DIAGRAMME DE CLASSES INTERMEDIAIRE DU DHRM - ETUDE MECANIQUE INTERNALISTE VIA LA MODELISATION 3D : VERS UN SCHEME A PRIORI

6.2.3.2 Description technique générale du fonctionnement

D'un point de vue technique, nous avons divisé l'objet en cinq éléments fonctionnels. Ceux-ci correspondent, pour parties, à une succession d'étapes décrivant le processus de fonctionnement de la machine. Chacune va agir sur un ou plusieurs flux donnés. Tout comme pour les centrales nucléaires, on distingue trois flux de matière :

1. Le *flux primaire* : celui du sel,
2. Le *flux secondaire* utilisé comme modérateur pour traiter le *flux primaire*,
3. Le *flux tertiaire* pour l'alimentation de puissance en force motrice de la machinerie.

Le sel passe tout d'abord dans la chaîne à godets puis dans la trémie et finit son traitement dans les bacs. L'intégralité du processus s'effectue grâce à une deuxième solution : la *saumure*³⁸⁰. Les machineries mécaniques sont alimentées grâce à une source d'énergie sous la forme de force motrice. Le tableau de la figure 142 corrèle ces flux avec les composants principaux de la machine.

³⁸⁰ Saumure = Solution aqueuse saturée en sel. Voir l'étude externaliste ci-après pour sa description fonctionnelle.

Flux généré	Description du flux	Parties / composants concernés	Fonction
Flux primaire	Sel	Chaîne à godets	Alimentation de la machine en matière première 2
		Trémie	Concassage du sel 3
		Bacs	Traitement 4
Flux secondaire	Saumure	Cuves	Système de circulation 5
Flux tertiaire	Force motrice	Moteur	Alimenter les machines des flux primaire et secondaire 1
		Arbre principal	
		Arbres secondaires	
		Pompe	

Figure 142 : DESCRIPTION DES FLUX ET DES COMPOSANTS PRINCIPAUX DE LA MACHINE DE BATZ-SUR-MER

Les composants principaux détaillés ci-après sont repérés sur la figure 143³⁸¹ :

1. Le moteur et l'arbre principal,
2. La chaîne à godets,
3. La trémie,
4. Les bacs à laver,
5. Le système de circulation de la saumure.

Détaillons désormais les différentes parties de cette machine.

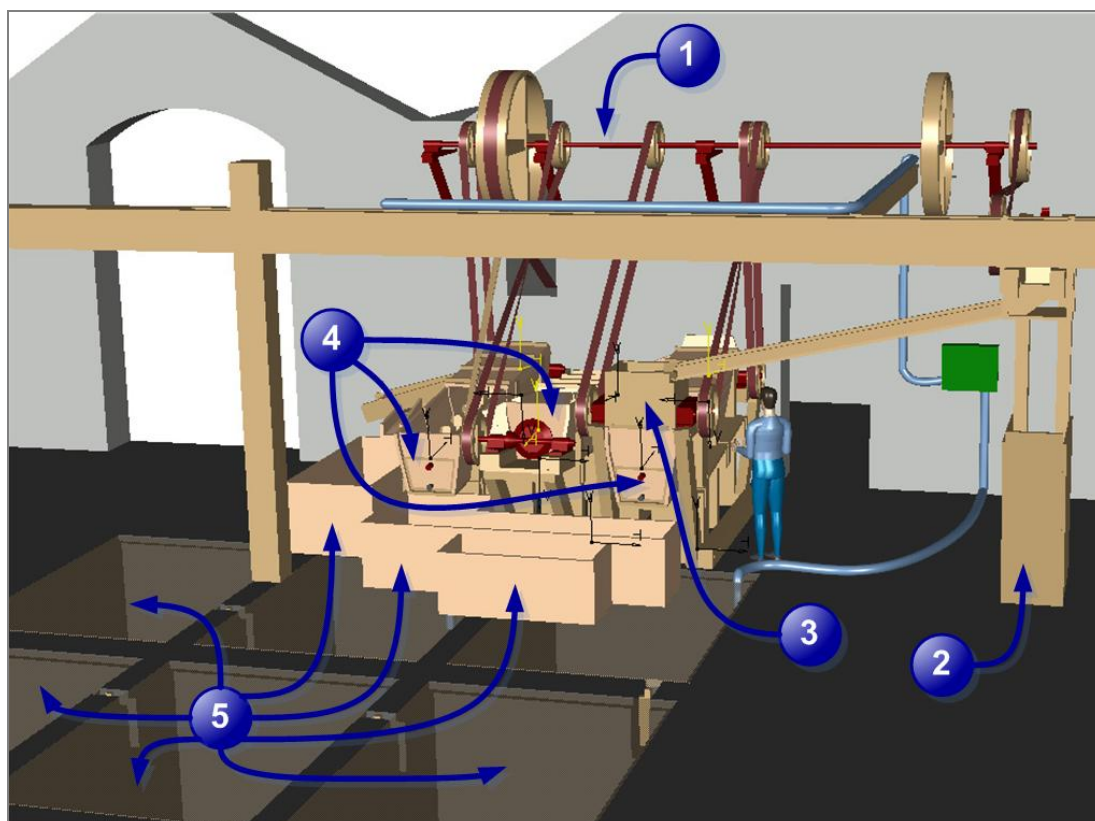


Figure 143 : MAQUETTE NUMERIQUE, VUE D'ENSEMBLE DE LA MACHINE

³⁸¹ Source : [DEROUENE 2005a]

6.2.3.3 ① Le moteur et l'arbre principal

Le moteur de marque CARDNER (figure 144) est abrité dans la chaufferie attenante au corps du bâtiment principal. Il est destiné à fournir l'énergie nécessaire à l'ensemble des mécanismes de la machine. Une première courroie, issue du moteur, distribue l'énergie, sous la forme d'un mouvement de rotation, à un arbre principal (figure 145). Sur ce dernier, d'autres courroies sont engrainées sur des poulies en bois de différents diamètres et sont reliées aux différents composants mécaniques de la machine.



Figure 144 : PHOTO, MOTEUR



Figure 145 : PHOTO, ARBRE PRINCIPAL

Les courroies sont en toile très épaisse et bouclées par des agrafes de métal. Pour empêcher qu'elles ne glissent sur les poulies, elles devaient régulièrement être enduites de résine.

A l'origine, le moteur devait être un moteur à gaz. Mais l'état de dégradation étant trop avancé et les recherches d'archives ou sur le constructeur CARDNER n'ayant pas apporté d'informations supplémentaires, l'hypothèse ne peut être validée. Pour sûr, la source de force motrice est remplacée par la suite par un moteur électrique de marque AO, encore présent à l'état de vestiges.



Figure 146 : PHOTO, LA POMPE ENSEVELIE

Au bilan, par manque d'information sur sa conception interne, la modélisation fait apparaître le moteur d'origine sous la forme d'un bloc vert. De même, la pompe étant ensevelie sous un tas de sel (figure 146), elle est représentée dans la DMU par un autre bloc vert ; nous détaillerons l'usage de la pompe dans une prochaine partie dédiée à la maintenance de la saumure.

6.2.3.4 ② La chaîne à godets

On suppose qu'à l'origine du processus, le sel devait être pelleté dans le puits rempli de saumure. Plongeant dans ce même puits, la chaîne munie de godets ressort verticalement en remontant le sel liquide (figure 147). Arrivée en point haut, la solution est transvasée dans une gouttière qui se déverse à son tour dans la trémie surplombant le premier bac à laver.

La chaîne et les godets sont dits de système EWART basé sur un brevet anglais. La figure 148 est un extrait du catalogue général des élévateurs daté d'août 1893 du fabricant BURTON FILS spécialisé dans la machinerie agricole.



Figure 147 : PHOTO, CHAINE A GODETS

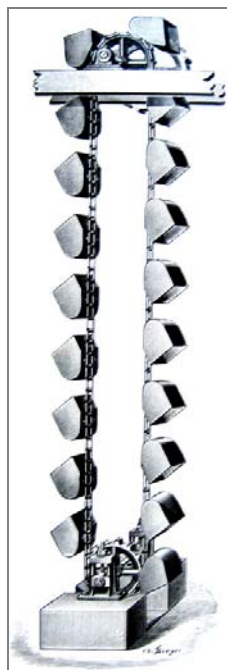


Figure 148 : CATALOGUE BURTON FILS, CHAINE EWART³⁸²

³⁸² Sources : [BURTON 1893]

6.2.3.5 ③ La trémie

La trémie (figure 149) est traversée par deux rouleaux métalliques tournant en sens opposés, l'un vers l'autre (figure 150). La solution liquide descendant de la gouttière tombe dans la trémie dans laquelle les agglomérats de sel sont concassés.

Remarquons que la gouttière n'est plus en place actuellement et que des morceaux de planches gisent sur le sol.



Figure 149 : PHOTO, LA TREMIE

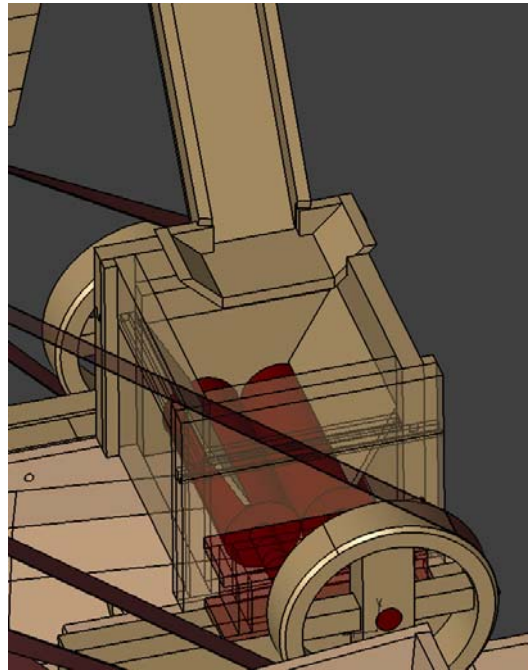


Figure 150 : MAQUETTE CAO, LA TREMIE

6.2.3.6 ④ Les bacs à laver

La partie centrale de la machine est constituée de trois bacs placés en série. Ils sont inclinés à approximativement 6° par rapport à l'horizontale et sont positionnés en opposition.

Chacun est traversé par un axe sur lequel des pales sont insérées. Arbre et pales forment un ensemble semblable à une vis d'ARCHIMEDE telle qu'utilisée pour purger l'eau des mines. La solution liquide passant à travers la trémie va tomber dans l'extrémité basse du premier bac. Les pales permettent de la pousser jusqu'à l'autre extrémité du bac, en position haute. Une petite gouttière la déverse dans le bac suivant, en position basse. Pour finir, cette solution saline est recueillie à la sortie du 3^{ème} bac par une dernière gouttière de dimensions plus importantes que ses jumelles. Elle possède un double fond ; le fond le plus élevé est fait de toile et permet, sans doute, un pré-égouttage de la solution saline à l'issue du lavage.

La figure 151 détaille le processus global et la vue en coupe met en exergue le double fond de la gouttière finale. Remarquons, que cette dernière, tout comme la gouttière de la trémie, n'est plus actuellement fixée à la machine et forme un tas de planches au sol.

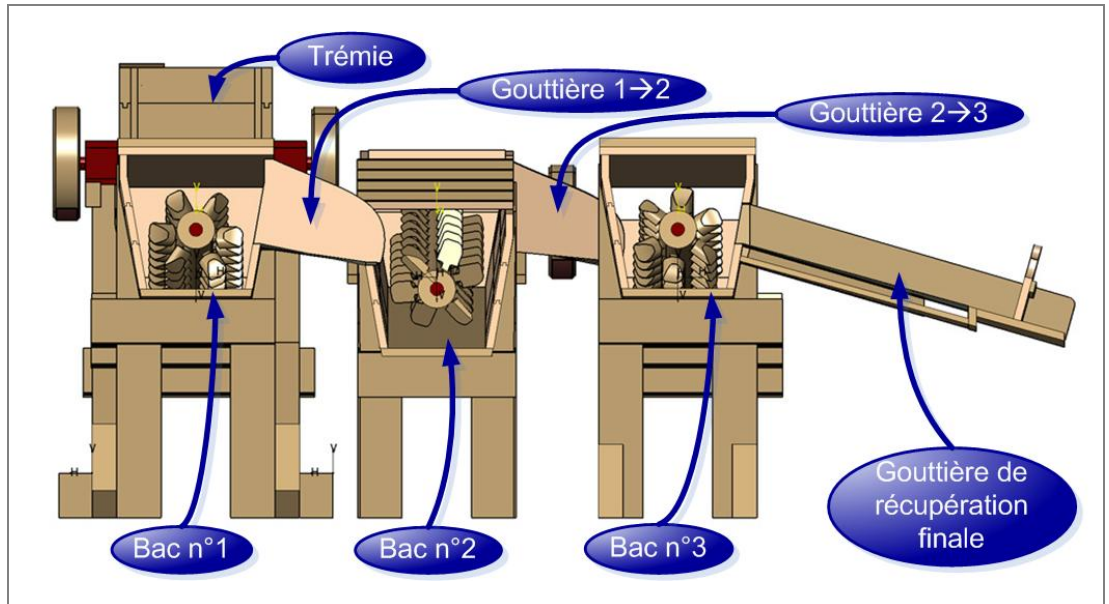


Figure 151 : MAQUETTE CAO, VUE ARRIERE EN COUPE DES 3 BACS

On remarquera sur la photographie de la figure 152 la présence d'un garde-fou fortement détérioré par le temps. Celui-ci permettait sûrement d'empêcher aux opérateurs de mettre les mains directement dans les bacs en fonctionnement. En effet, il devait souvent y avoir des problèmes de blocage des vis sans fin dus au fait que la solution traitée ne devait pas être complètement liquide mais visqueuse. Evitant ainsi de graves blessures et la projection de la solution en dehors des bacs, ce garde-fou est modélisé en transparence sur la maquette CAO de la figure 153.



Figure 152 : PHOTO, BRASSEUR A PALES

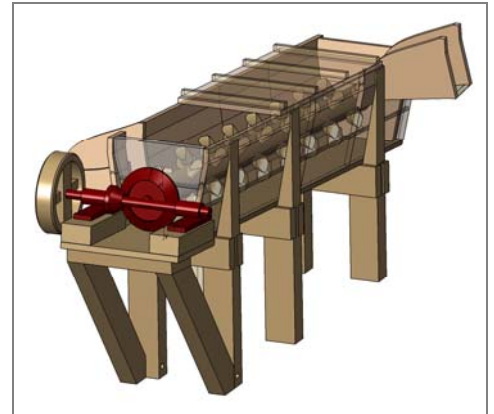


Figure 153 : MAQUETTE CAO, BAC A LAVER N°2

Chaque arbre est entraîné grâce à des pignons coniques eux-mêmes actionnés par une courroie reliée à l'arbre principal. La quantité de sel accumulée sur les éléments en métal ainsi que l'action du sel au cours du temps a fortement détérioré les engrenages (figure 154).

La société parisienne BURTON FILS propose dans son catalogue de 1893 ces mécanismes dits de roues d'angle. Il n'est donc pas improbable que les constructeurs de la

machine se soient procurés les godets, les chaînes et les pignons coniques chez le même fournisseur.



Figure 154 : PHOTO, ENGRENAGES CONIQUES TRANSMETTANT LE MOUVEMENT AU BRASSEUR

6.2.3.7 ⑤ Le système de circulation de la saumure

Les bacs n°2 et n°3 reçoivent un apport en saumure via un système de canalisations aériennes. Après utilisation, la saumure est recyclée. Elle se décante dans trois récipients de taille moyenne situés quelques centimètres plus bas que le niveau de la machine. Puis elle tombe dans six cuves souterraines successives lui permettant de terminer sa phase de purification. A la sortie de la dernière cuve, la saumure est pompée puis réinjectée par le système de canalisations dans les bacs.

La pompe est actuellement ensevelie sous un tas de sel. Faute d'information, tout comme pour le moteur CARDNER, la pompe n'a pu être étudiée lors de la première phase de fouilles archéologiques avancées.

La figure 155 est une photographie issue de la DMU montrant les différentes cuves et le système de tuyauterie.

Les bassins forment des rectangles de 3x2 mètres et profond de 1.70 mètres. Pour permettre une libre circulation des employés dans le bâtiment, ils sont couverts par des étais mobiles en métal et bois.

Les cuves sont reliées entre elles par un système de portes similaires à la saline³⁸³. Ces ouvertures sont larges d'environ 15 cm et haute de 50 cm.

Les traces de sédiments demeurant actuellement au fond de ces cuves atteignent une épaisseur de 50 à 70 cm. Elles nous interpellent quant à la nécessité de les nettoyer régulièrement afin d'assurer un bon fonctionnement³⁸⁴.

³⁸³ Voir ci-après la description des marais salants.

³⁸⁴ Suite à l'étude externaliste, nous verrons dans la suite de cette partie que cette hypothèse s'avère valide.

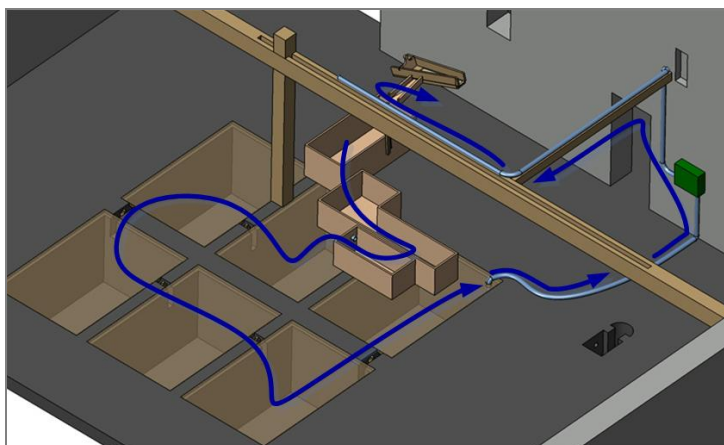


Figure 155 : MAQUETTE CAO, SYSTEME DE CIRCULATION DE LA SAUMURE

6.2.3.8 Hypothèses internalistes nécessitant une étude externaliste

Comme vu dans la méthodologie de *modélisation* décrite dans le chapitre 4, une fois le fonctionnement appréhendé, un schéma cinématique de la machine est réalisé. Tout d'abord en version papier, il est ensuite modélisé sous CATIA V5. L'annexe 26 détaille cette cinématique [DEROUENE 2005a].

Une fois le squelette et les liaisons créés, il est vérifié que le modèle numérique est simulable donc fonctionnel. A ce squelette est ensuite ajouté le volumique des pièces afin d'obtenir une DMU complète. Au final, la maquette numérique de cette machine de BATZ-SUR-MER est constituée de plus de 550 pièces et 30 liaisons cinématiques (figure 156). Le processus de modélisation est détaillé par le SADT de l'annexe 27 [DEROUENE 2005a].

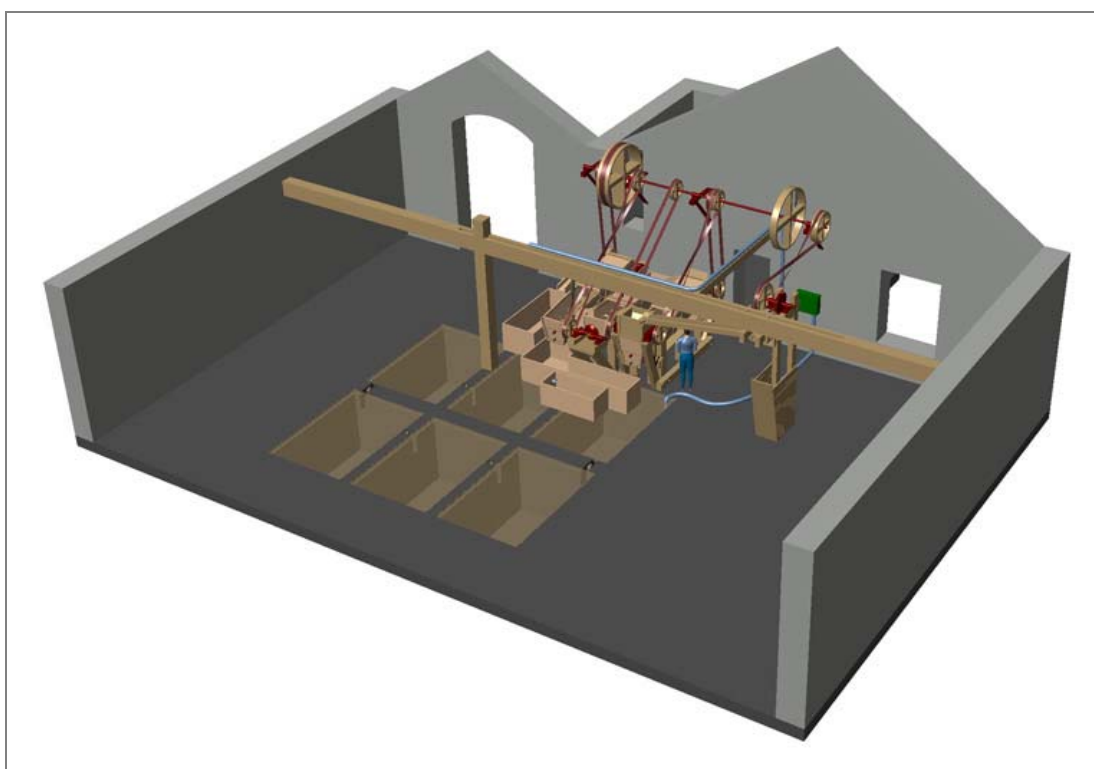


Figure 156 : MAQUETTE NUMERIQUE, VUE D'ENSEMBLE

L'*étude mécanique internaliste* et la *modélisation* ont permis de valider l'hypothèse historique selon laquelle il s'agissait d'une machine artisanale. En effet, si à première vue les bacs se ressemblent beaucoup, chacun s'avère différent. La modélisation tient alors compte de cette unicité et authenticité des pièces comme nous allons le démontrer.

Certains éléments n'existent à l'heure actuelle que sous la forme de débris jonchant le sol près de la machine. Ces éléments ont donc été reconçus et modélisés :

- en prenant en compte la forme des éléments avec lesquels ils étaient en contact ; exemple : la gouttière reliant la chaîne à godets à la trémie,
- ainsi que toute hypothèse pouvant aider ; exemple : traces de clous dans les poutres,
- mais également grâce à l'étude du mécanisme ; exemple : les courroies droites ou croisées³⁸⁵.

De plus, il est à noter que, suite au fonctionnement, la machine a parfois eu des problèmes d'étanchéité comme en témoignent les amas de sel présents sur toutes ses surfaces planes. Des réparations de fortune ont sûrement du être effectuées. C'est ainsi que certaines parties sont :

- renforcées par un doublage des planches de bois,
- ou remplacées : pour une même pièce, la qualité du bois d'une planche la composant peut être différente des planches voisines.

Témoignage de cette activité de bricolage, le bâtiment abritant le moteur contient encore deux mobiliers très anciens et un porte manteau massif :

- une armoire (figure 157),
- un établi (figure 158).

³⁸⁵ Une courroie croisée permet d'invertir le sens de rotation. Cependant, suite à un contact à ses bords, le frottement la détériore plus vite qu'une courroie droite.



Figure 157 : PHOTO, L'ARMOIRE DANS LA CHAUFFERIE



Figure 158 : PHOTO, L'ETABLI DANS LA CHAUFFERIE

Cachées sous un monticule de sable, de sel et de poussière, il est possible de distinguer des pales emmanchées dans les trous de l'établi (figure 159).

Ces pales possédant des arêtes vives et la présence d'une lime sur l'établi confirment que les petites réparations s'effectuaient directement sur place, sûrement par les ouvriers eux-mêmes. A titre de comparaison de l'usage des pales, la figure 160 est une pale qui a été utilisée.



Figure 159 : PHOTO, PALE EN FABRICATION SUR L'ETABLI



Figure 160 : PHOTO, PALE AYANT ETE UTILISEE

Quant à l'armoire, elle recèle de nombreux trésors : des composants encore non utilisés et donc pas *attaqués* par le sel. C'est le cas de pales *neuves* (figure 161) ou de maillons à attache rapide EWART (figure 162), prêts à servir de pièces de rechange sur la machine.

La comparaison de ces composants d'*origine* avec ceux encore en place sur la machine a ainsi permis de valider leurs dimensionnements originels en fonctionnement.



Figure 161 : PHOTO, PALE NON UTILISEE DANS UN TIROIR DE L'ARMOIRE



Figure 162 : PHOTO, MAILLON EWART DANS UN TIROIR DE L'ARMOIRE

Enfin, lors de l'étude approfondie du moteur, les fouilles de terrassement ont fait apparaître deux objets mécaniques qui ne pouvaient être rattachés ni au moteur électrique, ni à son prédécesseur. Il s'agit de :

- un palier supportant les axes des pignons coniques, les poulies des bacs ou les rouleaux de la trémie,
- une pompe semblable à celle utilisée pour le système de circulation de la saumure.

Le palier présente de nombreuses cloques à sa surface (figure 163). Elles laissent supposer que la longue exposition à une atmosphère saline et humide a attaqué la fonte par l'intérieur. Cependant, l'objet n'est pas autant dégradé que ses confrères encore fixés sur les bacs à laver. Le diamètre intérieur de ce palier *neuf* mesure 40 mm alors que les axes des pignons coniques et des poulies mesurent actuellement 80 mm. Que ce soit depuis la construction de la machine ou depuis son arrêt, ces éléments démontrent que l'action du sel sur les mécanismes a entraîné une dégradation des métaux ; dégradation que l'on peut qualifier d'*extrême* (figure 164).



Figure 163 : PHOTO, PALIER NON UTILISE



Figure 164 : PHOTO, PALIER ET AXE DEFORMES

Quant à la pompe, cet objet technique complexe est dans le même état que celui du moteur. Le démontage est impossible car l'objet n'est plus qu'un seul bloc d'acier (figure 165).

Ces incertitudes sur le moteur et la pompe posent des difficultés quant à l'évaluation de la production que la machine générerait : pas de vitesse de rotation, pas d'information sur le couple fourni... *L'étude externaliste* apportera peut-être quelques réponses.



Figure 165 : PHOTO, LA POMPE SUPPLEMENTAIRE

Grâce à l'ensemble des éléments de cette *étude internaliste*, nous sommes désormais en mesure de fournir le **schème a priori** de cette machine :

Schème a priori :
Traiter le sel en le lavant par dissolution dans une solution saline sursaturée.

Mais pourquoi laver le sel ? Y-a-t-il une raison économique, une raison sociale ou une raison technique ? Les études externalistes multi-temporelles et multi-dimensionnelles vont nous permettre de répondre à cette question et ainsi conduire au **schème rationnel**.

6.2.4 LE SEL : HISTOIRE GENERALE ET USAGES

6.2.4.1 Positionnement du schème étudié dans l'espace du DHRM et classes impactées

Il s'agit ici de la première *étude* dite *externaliste* : elle analyse **l'objet** dans ses **usages** courants selon une temporalité et une dimension à l'échelle de l'évolution humaine. Cependant, il n'est pas question ici de **l'objet** principal de nos fouilles archéologiques.

En effet, **l'objet** considéré repositionne la **typologie structurante** vers l'origine de sa création. Dans notre cas, le **schème** de la machine à laver prend ses racines dans la

définition du sel. Avant toute *étude externaliste étendue*, il est nécessaire de s'interroger sur *l'objet* à l'origine de la création de *l'objet* étudié. Il s'agit de fonder les piliers du **Dossier d'œuvre patrimonial technique**.

Ce nouveau **schème** possède donc une temporalité nommée *earth time*³⁸⁶ et son niveau multi-dimensionnel se centre au niveau de *l'homme*. Il permet, entre autre, de générer les classes **coutumes** et **civilisation**.

Remarquons que la classe **firme** est ici élargie aux différentes natures de *l'homme* générées par les **usages** qu'il fait de *l'objet*. Exemple : les structures gouvernementales peuvent être instanciées dans cette classe **firme**.

Dès lors, *l'aspect externaliste* de ce **schème** généraliste parallèle est complet : c'est une nouvelle vue intermédiaire du **DHRM** (figure 166).

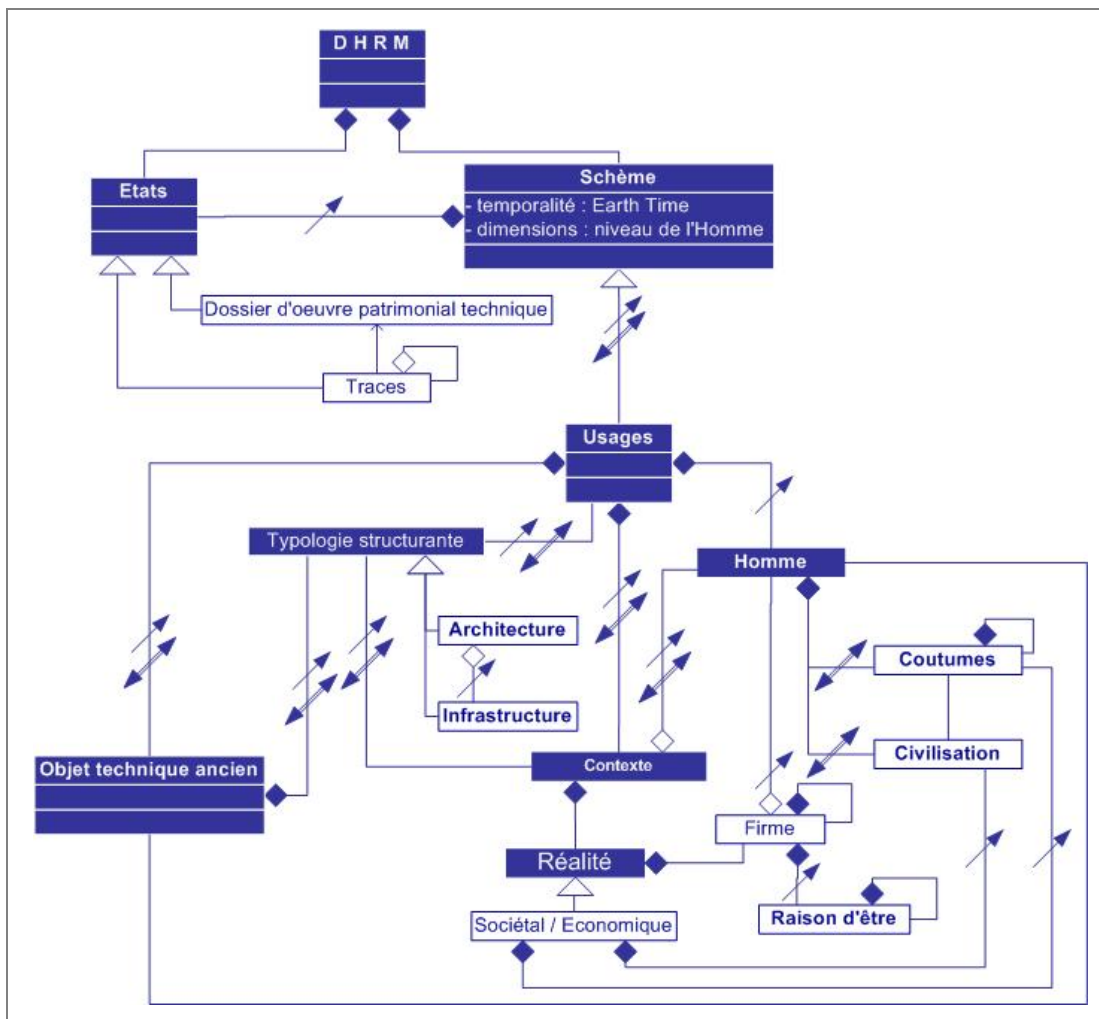


Figure 166 : CAS D'ETUDE DE BATZ-SUR-MER - DIAGRAMME DE CLASSES INTERMEDIAIRE DU DHRM - LE SEL : HISTOIRE GENERALE ET USAGES

³⁸⁶ Voir partie 5.3.3.5

6.2.4.2 Les origines³⁸⁷

Avec 39 % de sodium et 61 % de chlore, le chlorure de sodium NaCl est plus communément appelé sel de cuisine. Le salé est, avec le sucré, l'acide et l'amer, l'une des quatre saveurs fondamentales.

Au même titre que la peinture, le verre ou le savon, la quête du sel existe depuis le néolithique³⁸⁸. Utilisé pour la conservation, pour relever la saveur des aliments³⁸⁹, pour ses propriétés médicales... de nombreux documents anciens témoignent de l'existence des marais salants aussi bien chez les ROMAINS, que chez les GRECS, les EGYPTIENS ou les GAULOIS...

Pour nos ancêtres, les solutions salines sont synonymes de bien-être, de bonheur et de gaieté. Elles bonifient la vie de tout et un chacun. C'est un rôle symbolique comme en témoigne le rituel des sumos qui répandent du sel sur leur terrain de jeu pour purifier le combat. Le sel est même utilisé comme présent pour remercier les militaires de leur bravoure³⁹⁰.

Cependant, comme nous le verrons dans l'étude de la machine de BATZ-SUR-MER, cet usage évoluera au cours du temps : après cette symbolique de pureté du sel brut, fin du 19^{ème} siècle, l'industrie du sel le raffinera ; mais ce procédé sera à nouveau abandonné cent ans plus tard, le sel non purifié signifiant authenticité.

AU MOYEN ÂGE, c'est le seul moyen de conserver les viandes et les poissons et de survivre ainsi aux périodes de disette, de surmonter les guerres et de lutter contre les épidémies. Aujourd'hui encore, certaines régions africaines dépourvues d'appareils frigorifiques, utilisent le sel pour conserver viandes et poissons. Mais le sel sert aussi à soigner les brûlures, les piqûres, diverses blessures et les maladies de peau. Il est utilisé pour détendre les pieds enflés, pour faire des emplâtres, mais aussi comme agent vomitif pour soulager les embarras gastriques. Au 19^{ème} siècle, il fait office de médicaments pour les yeux, contre les rides ou est frotté sur le ventre de la mère après l'accouchement.

AU SAHARA, certaines maisons sont mêmes construites avec des blocs de sels cimentés par mouillage, la matière première provenant des mines proches.

Essentiel à l'homme, le sel est une richesse convoitée. Jusqu'au 19^{ème} siècle, il demeure une denrée de spéculation. Mais comme nous allons le voir ci-après, de par la situation de ses sites de production, son exploitation est géographiquement et techniquement limitée. Les routes du sel sont évoquées dès l'ANTIQUITE. Il circule dans le BASSIN MEDITERRANEEN, au MOYEN-ORIENT, sur les routes qui joignent le golfe PERSIQUE à la MEDITERRANEE orientale

³⁸⁷ Sources : [PLINE 1850], [FIGUIER 1880] et [COLAS 1985]

³⁸⁸ Vers 3000 avant J.C. [BURON 2001]

³⁸⁹ D'un point de vue biomédicale, l'ion Na⁺ est indispensable à la vie humaine : saler la nourriture est un moyen comme un autre.

³⁹⁰ C'est ainsi que le mot *salair* prend ses racines dans le terme *sel*.

et jusqu'aux rivages de la mer NOIRE. A ROME, on nomme même une route du nom de *Via salaria* par laquelle les premiers peuples font venir leur sel.

Le contrôle des échanges par voies maritimes et terrestres devient l'enjeu de rivalités et de guerres entre les puissances installées, notamment entre VENISE et ses voisines. En AFRIQUE, le développement du commerce transsaharien fondé sur le troc entre le sel et l'or fait émerger de nouveaux empires comme le GHANA et le MALI. A BYZANCE, il est même utilisé comme monnaie d'échange.

6.2.4.3 Un impôt sur le sel en France³⁹¹

Afin de surveiller la production, la vente et le transport du sel, PHILIPPE VI de VALOIS considère que le sel est monopole d'état et instaure un impôt sur cette denrée en 1340. A partir de LOUIS XI, cet impôt indirect prélevé sur le commerce devient une redevance royale : la gabelle est née. Elle ne coûte que quelques deniers à l'époque mais le sel va rapidement devenir une denrée jouant un rôle capital dans notre histoire.

Le mot *gabelle* d'origine allemande signifie impôt / tribut. Utilisé originellement pour désigner tout type d'impôt, il est rapidement uniquement attiré à l'impôt sur le sel.

A partir de HENRI II, le roi laisse libre arbitre aux fermiers généraux de fixer eux-mêmes la redevance. Dès lors, la fraude pour échapper à cet impôt prend de l'ampleur ; le sel de contrebande est fortement réprimandé comme un crime. De nombreuses émeutes ont lieu comme en 1548 à BORDEAUX où 40 000 paysans se révoltent contre le Roi.

Le montant de la gabelle varie souvent en fonction des dépenses des souverains. Il est le symbole de grandes inégalités distinguant les *Pays de Grande Gabelle* et les *Pays de Petite Gabelle*. Il est donc possible que l'impopularité du sel ait participé au déclenchement de la REVOLUTION FRANÇAISE. La gabelle est abolie en 1790 par les révolutionnaires ; mais toutefois, des taxes sur le sel subsistent : en 1806, NAPOLEON décrète la levée d'un nouvel impôt sur le sel et cette *tradition* demeurera jusqu'en 1946.

Nous reviendrons sur les évolutions du sel et de son impôt aux 19^{ème} et 20^{ème} siècle en fin de cette étude afin de lever les hypothèses quant aux raisons de l'arrêt du fonctionnement de la machine à laver le sel de BATZ-SUR-MER.

³⁹¹ Source : [BURON 2001]

6.2.4.4 Les différents usages du sel de nos jours³⁹²

Aujourd'hui, le sel est utilisé pour de multiples applications aussi bien domestiques, personnelles que professionnelles.

Alimentation humaine

Le secteur alimentaire fait usage du sel sous plusieurs formes : assaisonnement à la maison ou pour la conservation des denrées cuites mises en conserves dans le commerce de gros... Des comprimés de sel peuvent même être distribués aux athlètes et aux travailleurs œuvrant dans des conditions où règne une chaleur extrême. Cette mesure vise à prévenir l'épuisement par la reconstitution des réserves de sel évacuées par la transpiration.

Le sel alimentaire commercialisé contient d'autres éléments dont la teneur n'excède pas les quotas fixés par les normes internationales de l'OMS³⁹³. Le sel de table peut être iodé par addition d'un sel d'iode³⁹⁴.

L'utilisation du sel de table est souvent considérée comme excessive aujourd'hui. La consommation recommandée étant de 2 g/jour, elle est en moyenne de 10 g/jour en FRANCE. Cette surconsommation entraîne de graves problèmes de santé, comme l'hypertension ou l'obésité. Elle est la cause mortelle de plusieurs dizaines de milliers de prématurés chaque année dans les pays développés. Pourtant, il existe d'autres sels bien moins nuisibles pour le corps humain mais ils sont peu répandus et plus coûteux³⁹⁵.

Agriculture

Alimentation ou désherbant, le sel est également essentiel à l'industrie de la pêche. Il fait partie intégrante du conditionnement du poisson car il freine la prolifération des bactéries.

Mélangé à la nourriture ou sous forme de pierre à lécher, le sel occupe une large part du régime alimentaire du bétail³⁹⁶.

Pharmaceutique

Le sel est raffiné sous vide et est de très grande pureté. Il trouve de nombreuses utilisations pharmaceutiques comme pour les sérums d'hémodialyse.

Cosmétique

Utilisé en solution dans des bains chauds, il apporte les sensations d'une relaxation profonde et contribue à l'élimination de la douleur dans les articulations voire même une meilleure circulation du sang de la peau.

³⁹² Source : [DEROUENE 2005b]

³⁹³ OMS = Organisation Mondiale de la Santé

³⁹⁴ L'iode est nécessaire à la glande thyroïde pour la sécrétion des hormones thyroïdiennes servant, entre autre, au développement intellectuel.

³⁹⁵ C'est le cas du chlorure de potassium KCl présent dans le sel de table non raffiné.

³⁹⁶ Le besoin journalier d'une vache laitière est de 80 grammes de sel.

L'industrie

L'industrie des produits chimiques se classe parmi les plus gros consommateurs de sel. En effet, on le retrouve dans le chlore : le sel cristallisé alimente les électrolyses à cathode de mercure et à membrane ; et le sel de dissolution alimente les électrolyses à diaphragme. Soude caustique, carbonate de sodium... sont des éléments clés de l'industrie chimique lourde qui sont utilisés pour : fabriquer du savon et des détergents, des pâtes et des papiers, des fibres et des plastiques, du verre, des explosifs, des solvants, des textiles (fixation de bain de teinture), traiter des cuirs et des peaux (agent déshydratant) et d'autres produits tant chimiques que pétrochimiques.

Traitement des eaux potables

Les principaux responsables de la dureté de l'eau sont le calcium (ions Ca^{++}) et le magnésium (ions Mg^{++}). Ces deux éléments peuvent former des composés insolubles avec d'autres ions tels que les ions carbonates, sulfates ou silicates ou les acides gras des savons, ce qui conduit inévitablement à des dépôts incrustants que l'on dénomme couramment tartre.

Il devient donc nécessaire d'éliminer le calcium et le magnésium contenus dans l'eau. L'adoucissement par permutaion sodique est l'opération la plus répandue : elle consiste à utiliser une résine échangeuse. Elle fixe les ions calcium et magnésium et cède en échange les ions sodium dont elle est porteuse. L'eau boueuse est alors transformée en une eau adoucie. Lorsque la résine est saturée, on procède à sa régénération à l'aide d'une solution très riche en sodium, préparée à partir de sel raffiné³⁹⁷.

En usage domestique, l'adoucissement de l'eau est utilisé dans les lave-vaisselle pour éviter les dépôts calcaires. Dans l'industrie, l'adoucissement des eaux est le pré-requis nécessaire à la production de vapeur.

Déneigement

Le sel est aussi utilisé comme fondant pour le déneigement des routes en hiver. L'épandage du sel solide ou liquide sur la glace sert à abaisser le point de congélation de l'eau pour provoquer sa fusion.

³⁹⁷ Voir partie ci-après sur le lavage et le raffinage du sel des marais salants de l'Ouest de la FRANCE.

6.2.5 LA PRODUCTION DU SEL : RECOLTE ET TRAITEMENT SELON SA PROVENANCE

6.2.5.1 Positionnement du schème étudié dans l'espace du DHRM et classes impactées

L'étude *externaliste* qui suit se base sur l'analyse précédente. Après avoir approfondi le produit sel, il convient de détailler son processus de production : sa récolte et son traitement.

Ce nouveau **schème** se déploie sur une **typologie structurante** centrée sur les machines et leurs **technologies** associées. De fait, les aspects liés à la **Métis** et à la **Technè** sont abordés. Les **contextes organisationnel** et **socio-économique** nécessitent alors d'être approfondis. De même, les **usages** de **l'homme** vis-à-vis de **l'objet technique ancien** sont analysés en détail.

De plus, certains éléments **structuraux** répondant à la même **fonction** sont comparés dans un espace multi-temporel. Le **schème** effectue des allers-retours entre le temps présent et le temps de fonctionnement du processus comparant ainsi les **usages d'autrefois** avec les **techniques contemporaines**. De plus, des études **d'usages parallèles** sont menées pour **contextualiser** au mieux **l'objet technique ancien** concerné. Exemple traité ici : analyse de la production de la roche de sel puis du sel de mer. On distingue donc quatre niveaux multi-temporels principaux : t_0 et t_f pour les **vestiges** étudiés ainsi que t_0' et t_f' pour les objets parallèles.

L'espace multi-dimensionnel se restreint au fur et à mesure de l'étude pour pointer le niveau de la machine à laver le sel dans la zone géographique de l'Ouest de la FRANCE.

L'intégralité des **aspects internalistes** et **externalistes** de **l'objet technique ancien** sont désormais connus. Nous ne représenterons pas ici cette ontologie car celle-ci englobe l'intégralité du **modèle d'usage idéalisé de l'objet technique ancien** défini au chapitre 5.

Validant les hypothèses proposées par l'étude *internaliste*, l'état de **traces** se transforme en **Dossier d'œuvre patrimonial technique**. La composition du **DHRM** pour ce nouveau schème à un niveau macroscopique est illustrée par la figure 167.

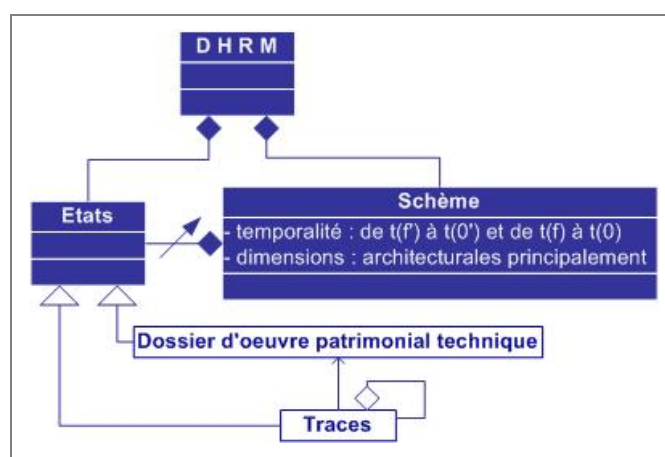


Figure 167 : CAS D'ETUDE DE BATZ-SUR-MER - DIAGRAMME DE CLASSES INTERMEDIAIRE DU DHRM - LA PRODUCTION DU SEL : RECOLTE ET TRAITEMENT SELON SA PROVENANCE

6.2.5.2 Généralités

Le chlorure de sodium est répandu sur tout le globe :

- dans les terres : le minerai naturel est désigné sous le nom de *sel gemme* lorsqu'il est pur et *d'argile salifère* lorsque mélangé dans une solution d'argile,
- dans les eaux : aussi bien dans les lacs que les fontaines salées ou les sources minérales. Mais également dans les mers pour lesquelles un litre d'eau de mer contient environ 25 grammes de chlorure de sodium.

Ainsi, en fonction du type de solution saline à cultiver et à traiter, plusieurs modes opératoires ont été développés à chaque civilisation :

- Séchage au soleil et récupération sous la forme d'amas,
- Chauffage jusqu'au point d'ébullition et refroidissement rapide,
- Epandage d'eau salée sur des bois enflammés³⁹⁸ transformant les cendres en sel noir.

Nous étudierons tout d'abord le sel gemme et son mode d'extraction. Puis, nous détaillerons le processus d'obtention et de traitement du sel de mer en dégageant les causes de sa création. Du 11^{ème} au 13^{ème} siècle, les sites de production français les plus célèbres sont situés dans le Nord-Est. Certains d'entre eux seront analysés et comparés avec des procédés du 21^{ème} siècle.

6.2.5.3 Le sel gemme et son traitement artisanal³⁹⁹

Le sel gemme provient :

- de l'évaporation des anciennes eaux de mers ; il se présente sous la forme de couches superposées de façon uniforme,
- de gisements pour lesquels le sel gemme s'est accumulé dans les failles de l'écorce terrestre afin de combler les vides. Le sel se présente alors sous la forme d'amas intra-terrestres semblables aux filons de métal.

Les gisements souterrains de sel sont souvent horizontaux. Leur étendue varie de quelques mètres à plusieurs kilomètres. Les plus importants d'entre eux sont nommés les *diapirs*⁴⁰⁰.

Cependant, dans le cas des *diapirs*, la mine est généralement verticale et possède une forme ovale de 1 à 2 km de diamètre sur 4 à 6 km de haut.

³⁹⁸ Le meilleur bois utilisé chez les espagnols était le chêne.

³⁹⁹ Sources : [BAYARD & al 1900] et [FIGUIER 1880]

⁴⁰⁰ Diapir = formation géologique souterraine de sel, en forme de dôme

Quelle que soit son origine, l'exploitation de la roche de sel est semblable : la méthode s'appelle *La salle et les piliers*. Le sel est excavé en fragmentant la roche de sel à l'aide d'explosifs puis est acheminé à la surface sous la forme de blocs rectangulaires.

Il se crée alors une pièce dont le plafond est soutenu par des piliers de roche disposés comme un échiquier. La hauteur de plafond dans les mines de sel est de 3 à 12 mètres mais peut atteindre 30 mètres dans le cas des *diapirs*.

Un des exemples les plus marquants de gisement de *sel gemme* est celui des salines de WIELISKA en POLOGNE⁴⁰¹. Exploitées au 13^{ème} puis au 14^{ème} siècle, le sel est directement présent dans la roche. Il est extrait sous forme de blocs de 2 à 3 mètres de côté et d'un mètre d'épaisseur. Près de 750 mineurs y travaillent dans une atmosphère saine grâce aux propriétés bénéfiques du sel. L'annexe 28 est une gravure en coupe détaillant les trois étages de la mine de WIELISKA ainsi que les différents métiers des mineurs.

Mais une majorité des gisements souterrains ne sont pas semblables aux mines WIELISKA. Le chlorure de sodium ressort généralement sous la forme d'un liquide bitumeux toujours saturé de sulfate de chaux. Un traitement est donc nécessaire pour rendre le sel comestible ou utilisable comme conservateur.

Inventé en 1559 par le médecin allemand Mathieu ABITH, le bâtiment de graduation est utilisé jusqu'en 1900 dans de nombreux sites de gisement à l'intérieur des terres [FIGUIER 1880] ; c'est le cas de la figure 168 à SALZBOURG [BAYARD & al 1900]. Au 20^{ème} siècle, grâce à l'amélioration des techniques de forage, ce traitement ne s'effectue plus de la même façon ; nous le détaillerons par la suite.

La machinerie de graduation se compose de plusieurs étages et a pour effet d'associer l'évaporation de l'air à l'évaporation de l'eau. La source salée est chauffée puis déversée depuis le haut de l'installation (A). L'eau va alors s'infiltrer dans les fagots (D) tout en s'évaporant. Elle termine sa chute dans le bassin inférieur (B). Puis l'eau est pompée et réinjectée dans la rigole (A). Le cycle est ainsi bouclé.

⁴⁰¹ Site C 32 classé en 1978 sur la liste des bien inscrits au patrimoine mondial [UNESCO 2004].

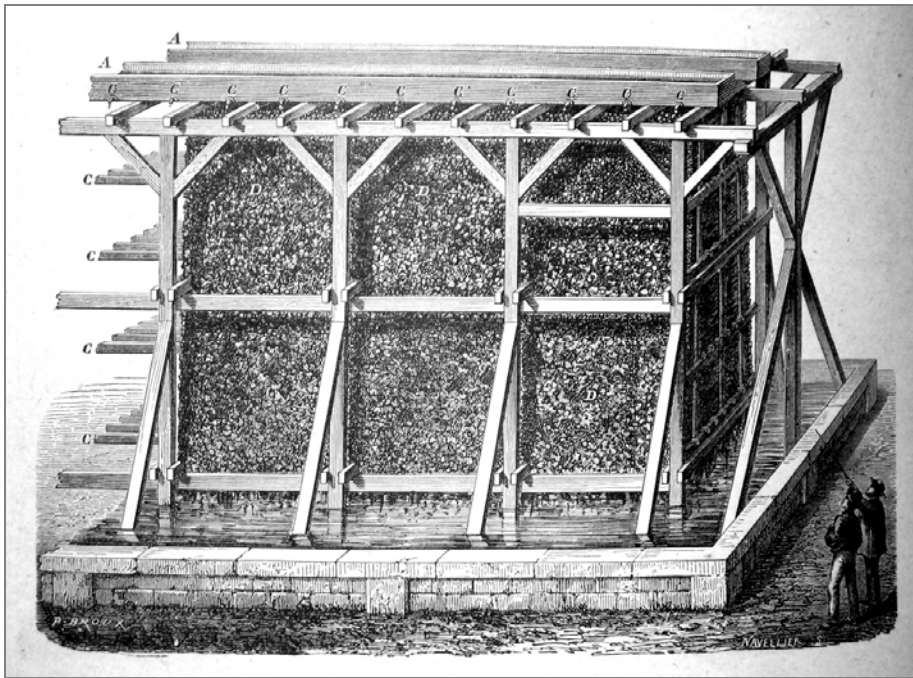


Figure 168 : 1900 - BATIMENT DE GRADUATION DE LA SALINE DE SALZBOURG⁴⁰²

Nous ne développerons pas ici la manufacture royale des salines d'ARC-ET-SENANS⁴⁰³. A l'époque, le système de traitement est paradoxalement similaire à celui utilisé pour les sels de mer. Nous le développerons dans la suite de ce chapitre.

Cependant, comme nous allons le voir ci-après, les techniques contemporaines de production de sel gemme sont issues d'un mélange des différentes technologies utilisées aussi bien pour le sel de terre que le sel de mer.

6.2.5.4 Industrialisation contemporaine du processus de minage du sel⁴⁰⁴

De nos jours, lorsqu'une nouvelle mine est mise en exploitation, deux puits sont dégagés en direction du gisement de sel situé entre 150 à 600 mètres de profondeur. Les puits mesurent environ 6 mètres de diamètre. Ils sont ensuite chemisés de béton et minés pour créer des accès. Un engin de coupe souterrain peut alors dégager des salles horizontales appelées *kerf*. Une plate-forme de forage crée une série de trous et un mélange de nitrate d'ammonium et de mazout y est injecté. La salle est alors dégagée par explosion créant une pile de déchets de blocs de sel. Ces blocs obtenus suite à l'explosion sont ensuite chargés dans des unités autonomes transportant et remontant le sel jusqu'à la surface pour être concassés.

⁴⁰² Source : [BAYARD & AL 1900]

⁴⁰³ Site C 203 classé en 1982 sur la liste des bien inscrits au patrimoine mondial [UNESCO 2004].

⁴⁰⁴ Sources : [DEROUENE 2005b], [COLAS 1985], [SALT 2007a], [SALT 2007b] et [SALINES 2007]

Evitant la technique du minage, une autre solution consiste à utiliser une foreuse possédant une tête rotative munie de pointes en carbure de tungstène pour creuser la roche de sel.

En surface, le sel est traité pour retirer les impuretés. Il est ensuite mis en sac, palettisé et préparé pour l'expédition. La roche de sel est transportée en vrac par bateau, camion ou train. Une partie est emballée dans des sacs de 5 à 50 kg pour l'alimentation animale et l'adoucissement de l'eau.

Il existe également un autre procédé d'obtention du sel réalisant les opérations d'extraction et de traitement en simultanées : il est communément appelé *processus d'évaporation de la saumure*. Notons que cette dénomination est contemporaine et qu'au 19^{ème} siècle, ce procédé était tout autre ; nous détaillerons cette technique d'autrefois dans la suite de ce chapitre dans la partie dédiée à l'eau de mer.

Après localisation d'un gisement de sel souterrain, de l'eau est injectée par un puits. Le sel se dissout et donne naissance à une solution aqueuse saturée en sel : la *saumure*. De cette dilution en résulte la création d'une caverne assimilable à un réservoir de saumure. Celle-ci est alors pompée et transportée via une canalisation vers une usine d'évaporation pour y produire du sel ou vers une installation de transformation chimique pour créer du chlore ou tout autre produit chimique.

La figure 169 illustre cette installation souterraine.

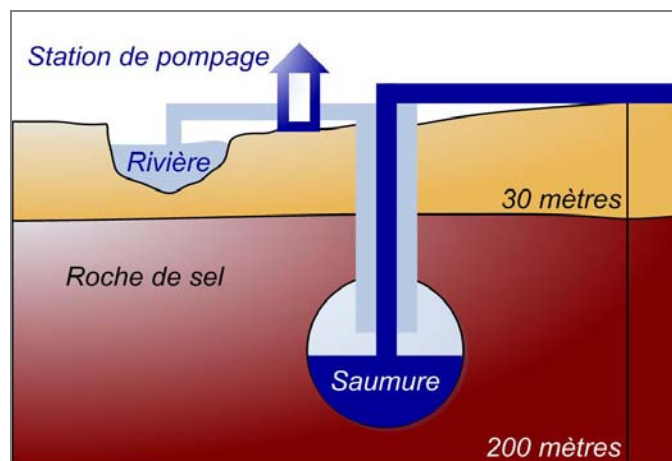


Figure 169 : SCHEMA EN COUPE D'UN GISEMENT DE SEL EXPLOITE PAR GENERATION DE SAUMURE

Actuellement, la quasi-totalité du sel alimentaire est produit par évaporation de saumure. Le sel de table est le résultat de l'évaporation de saumure dans des autoclaves sous vide.

Cependant, avant le processus d'évaporation, la saumure doit être préparée pour enlever les minerais qui pourraient entartrer les machines et compromettre la pureté du sel. Un traitement chimique de la saumure est donc nécessaire pour réduire sa teneur en calcium, en magnésium et en sulfate. Il s'agit de la même phase de *lavage* du sel que nous développerons par la suite pour le sel de mer ; cependant, cette technique contemporaine utilise un procédé en rupture totale avec la technique ancestrale.

Une usine standard de production de sel par évaporation de la saumure se compose d'une série de cylindres fermés⁴⁰⁵. Chaque cylindre possède des chambres à vapeur qui contiennent à leur tour un certain nombre de tubes. Le processus illustré par la figure 170 distingue plusieurs étapes :

1. Le premier cylindre reçoit dans sa chambre une vapeur à basse pression.
2. La saumure est distribuée par les tubes où la vapeur se condense sur sa surface externe. Elle bout à une température fonction de la pression de vapeur d'admission.
3. Pendant que la saumure bout dans le premier cylindre, l'eau s'évapore, ceci produit davantage de vapeur et permet d'augmenter la formation des cristaux de sel.
4. Une épaisse couche de boue composée de sel, de saumure et de cristaux de sel se forme. Elle est envoyée au deuxième cylindre et circule dans une deuxième unité de chauffage qui utilise la vapeur d'échappement du premier cylindre.
5. Les pressions ainsi que les températures d'ébullition deviennent successivement plus basses au fur et à mesure de l'avancement dans les évaporateurs. Les derniers fonctionnent sous vide et permettent à la saumure de bouillir à des températures beaucoup plus basses.
6. La boue du dernier cylindre est introduite dans une centrifugeuse pour en extraire l'humidité. Le sel en résultant est alors stocké sous la forme de tas.
7. Enfin, la saumure finale, à faible teneur en sel, est réinjectée dans le gisement de sel souterrain.

Pour l'industrie agro-alimentaire, un sel plus sec est exigé. Le sel issu des centrifugeuses est introduit dans des dessiccateurs/refroidisseurs dont le taux d'hygrométrie est inférieur à 0.05 %. Le sel est alors tamisé et calibré avant d'être transféré vers des plateformes de stockage, prêt pour la distribution.

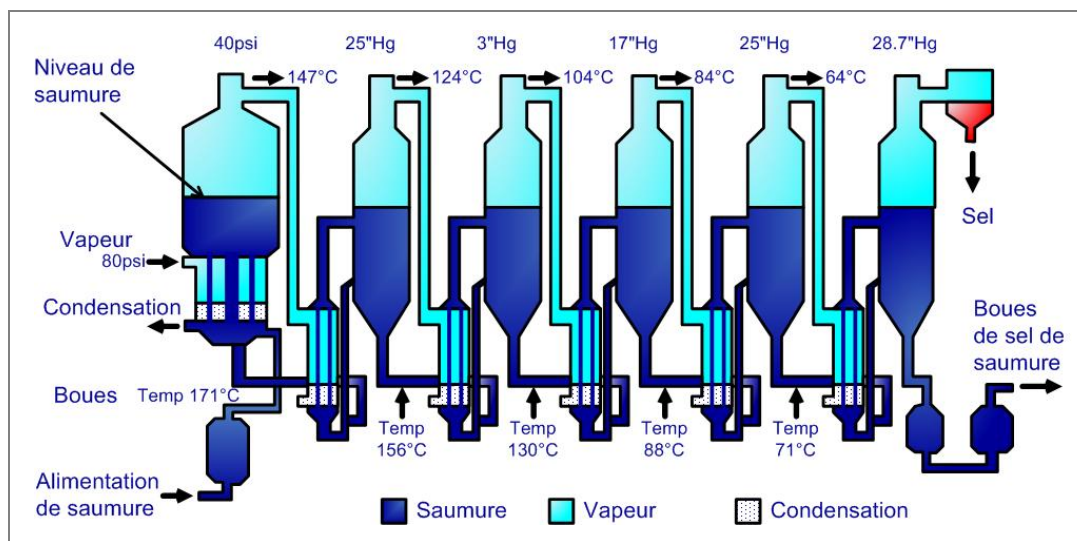


Figure 170 : PROCESSUS MODERNE A SIX EFFETS D'EVAPORATION DE SEL GEMME

⁴⁰⁵ Dans le métier, les cylindres sont appelés des *effets*.

6.2.5.5 L'eau de mer : composition chimique⁴⁰⁶

Nous avons vu précédemment que le sel peut être extrait du sol. Mais il peut également être produit par l'action du soleil et du vent sur l'eau de mer ou sur la saumure contenue dans les lacs salés.

Dès le 19^{ème} siècle des théories sont avancées pour expliquer la présence de sel dans l'eau de mer. Tous les océans sont étudiés afin d'en déterminer la composition, la température, la densité de l'eau, la proportion de chlorure de sodium...

Partant de l'hypothèse que l'eau de pluie ruisselle à la surface terrestre, elle vient naturellement laver la roche de ses impuretés, dont le sel. L'eau finit sa course dans un grand réservoir : les mers et les océans. Ainsi, en fonction du parcours traversé, le sel contenu dans l'eau est de qualité et en quantité différentes.

Les analyses chimiques réalisées à l'époque révèlent que la composition de l'eau de mer est une des plus complexes du globe. Tous les composants connus sont présents. Outre l'oxygène et l'hydrogène qui sont majoritaires, on distingue des substances physiques créées ou utilisées par le processus naturel :

- carbonate de chaux du aux coquilles des animaux marins,
- sulfate de magnésium, chlorure de magnésium et de potassium générés suite à l'érosion des fonds marins,
- iodures et bromures de sodium et de magnésium présents en faible quantité car consommés par les plantes aquatiques,

Une différence apparaît alors entre l'eau de l'Océan Pacifique et celle de la Méditerranée. Les premières analyses de 1848 des scientifiques BACKS, FIGUIER, GOBEL, MIALHE, MURRAY, USIGLIO sont reportées dans le tableau de la figure 171.

Zone géographique		Mer Méditerranée	Manche	Océan Atlantique	Mer du Nord	Mer Noire	Mer d'Azof
Densité		1.0293	1.024	1.0286	1.0234	1.01365	1.0097
Substances (pour 1000 grammes d'eau)	Chlorure de sodium	29.424	25.704	25.18	23.58	14.0195	9.6583
	Chlorure de potassium	0.505	0.094	-	1.01	0.1892	0.1279
	Chlorure de magnésium	3.219	2.905	2.94	2.77	1.3045	0.8870
	Sulfate de magnésium	2.477	2.462	1.75	1.99	1.4700	0.7642
	Sulfate de chaux	1.357	1.210	1.60	1.11	0.1047	0.2879
	Carbonate de chaux	0.114	0.132	-	-	-	-
	Bromure de magnésium	-	0.030	-	-	0.0052	0.0035
	Sulfate de soude	-	-	0.27	-	-	-
	Chlorure de calcium	6.080	-	-	-	-	-
	Bromure de sodium	0.556	0.103	-	-	-	-
	Oxyde de fer	0.003	infinitésimal	-	-	-	-
	Bicarbonate de magnésium	-	Infinitésimal	-	-	0.2086	0.1286
	Bicarbonate de chaux	-	-	-	-	0.3646	0.0221
	Silicate de soude	-	0.017	-	-	-	-
Totalité des substances (%)		43.735	32.657	31.14	30.46	17.6663	11.8795

Figure 171 : 1848 - TABLEAU DE COMPOSITION DES EAUX DE DIFFERENTES MERS⁴⁰⁷

⁴⁰⁶ Sources : [DEROUENE 2005b] et [FIGUIER 1880]

⁴⁰⁷ Source : [FIGUIER & al 1848]

Aujourd'hui, on sait plus précisément que l'eau de mer contient environ 3.5 % de sels minéraux dissous. Le chlorure de sodium représente 77 % de cette quantité, soit environ 2.7 % de l'eau de mer. Les 0.8 % restants sont principalement constitués de calcium, de magnésium et de sulfate. Les étangs ont souvent une coloration distincte, rose ou rouge, qui dépend de la concentration en sel et des espèces végétales et animales habitant cet écosystème.

Avec une teneur moyenne des océans de 30 g/l, les réserves naturelles mondiales sont évaluées à près de 40 millions de milliards de tonnes de sel d'origine marine.

6.2.5.6 Extraction et récolte du sel marin⁴⁰⁸

Pour exploiter le sel d'origine marine, l'extraction doit s'opérer au moyen de l'évaporation de l'eau de mer. Ces grandes étendues subissant l'influence du soleil et du vent sont nommées les *marais salants*. En FRANCE, on distingue deux lieux de production principaux de sel de mer utilisant la technique de l'évaporation :

- les rivages de l'OCEAN ATLANTIQUE,
- les bords de la MER MEDITERRANEE.

D'une manière générale, l'eau s'évapore dans des bassins-réservoirs successifs jusqu'à ce que la saumure soit complètement saturée en sel. Celui-ci se cristallise alors au fond des étangs. Les sites doivent être situés dans des secteurs de faibles précipitations et possédant un taux d'évaporation élevé, là où le processus est le plus productif et le moins onéreux.

En 1546, dans son ouvrage *De re metallica*, l'archéologue allemand, pionnier de la minéralogie, Georgius AGRICOLA, décrit le travail d'extraction du sel des eaux de la mer dans un marais salant.

Le réservoir (B) et l'écluse (C) amènent l'eau (A) par des rigoles (D) dans divers bassins divisés en compartiments (E). Une fois l'évaporation terminée par l'action des rayons solaires, le sel est retiré (figure 172).

⁴⁰⁸ Sources : [AGRICOLA 1546], [BAYARD & AL 1900] et [FIGUIER 1880]



Figure 172 : UN MARAIS SALANT AU 16^{ÈME} SIECLE⁴⁰⁹

La disposition d'un *marais salant* ordinaire dans l'ouest de la FRANCE est organisé comme suit (figure 173) :

1. l'eau de mer arrive par un petit canal contrôlé par une *vanne*,
2. elle se déverse dans un grand réservoir que l'on nomme *vassière*,
3. l'eau passe ensuite dans un deuxième bassin plus grand, le *cobier*,
4. puis elle s'écoule successivement dans plusieurs *bassins* (*fares, adernes, muants, morts, aires...*) où à chaque étape, l'eau s'évapore augmentant ainsi le taux de salinité,
5. la solution saline termine son processus d'évaporation dans les *œillet*⁴¹⁰ où la saturation en sel est la plus élevée.

C'est dans les *œillet* que le sel se dépose et qu'il est recueilli au fur et à mesure de sa formation.

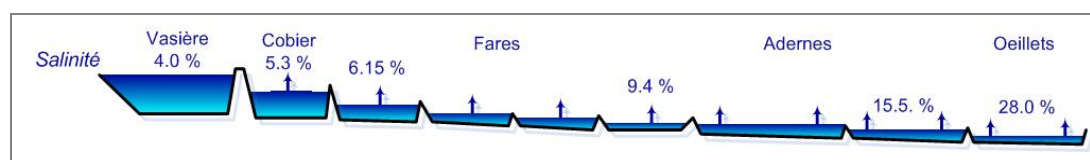


Figure 173 : LE PROCESSUS D'ÉVAPORATION DU SEL ET SES CONSÉQUENCES SUR L'AUGMENTATION DE SA CONCENTRATION

⁴⁰⁹ Source : [AGRICOLA 1546]

⁴¹⁰ Œillet = Bassin rectangulaire à fond bombé situé à 1.50 mètres au-dessous du niveau de la mer.

La *saline* proprement dite est composée des bassins successifs après le *cobier*. Dans l'Ouest de la FRANCE, et plus particulièrement à GUERANDE, tous les œillets sont identiques : ils mesurent 10.3 x 7.5 mètres pour une contenance de solution saline de 15 à 60 m³. On notera que la concentration de l'eau dans ces bassins dépend de sa hauteur et que, plus celle-ci est faible, plus l'évaporation sera accélérée et plus l'eau sera salée.

Les couches de cristaux de sels à la surface des bassins d'évaporation ne dépassent pas 1 à 2 centimètres d'épaisseur. Le sel est recueilli dans les œillets tous les jours ou tous les deux jours⁴¹¹ en fonction de la météorologie et de la qualité de sel souhaitée. Annuellement, il est récolté en moyenne 1 m³ de cristaux de sel solide par œillet :

- 40 à 100 kg de fleur de sel (sel fin),
- 1300 à 1500 kg de gros sel.

L'opération consistant à retirer le sel du bassin est très délicate car les cristaux de sel reposent sur une couche d'argile. Le paludier manie le *rouable*⁴¹² avec précision pour ne pas racler le fond de l'œillet sinon la *bouillette*⁴¹³ salit le sel. Le sel est égoutté toute la nuit puis stocké en tas sur les digues. Ces amas nommés *mulons*⁴¹⁴ sont protégés des intempéries par une couche de roseaux ou de chaume.

6.2.5.7 Le travail annuel dans un marais salant⁴¹⁵

Pendant l'hiver, le marais est laissé au repos. L'eau de mer recouvre entièrement les salines. Il convient donc de réparer les bassins et les canalisations au printemps : c'est la phase d'*habillage*.

Le planning annuel des paludiers au 19^{ème} siècle est réparti comme illustré par la figure 174.

Malheureusement, la récolte est souvent interrompue par les pluies. Les œillets deviennent inexploitable et il convient de les réalimenter. En moyenne, seul 1/3 du sel produit est récolté⁴¹⁶. Au bilan, sur une saison complète, la récolte ne s'effectue que sur 30 à 40 jours.

⁴¹¹ Nuançons nos propos en précisant que dans certains marais de l'Ouest de la FRANCE, il peut s'écouler jusqu'à 6 jours d'évaporation dans les œillets.

⁴¹² Outil de type râteau mais sans dent et muni d'un grand manche.

⁴¹³ Bouillette = particule d'argile.

⁴¹⁴ Les *mulons* très volumineux sont nommés *vaches*.

⁴¹⁵ Sources : [BAYARD & AL 1900] et [FIGUIER 1880]

⁴¹⁶ Source : Auteur inconnu, *Le département de la Loire-Inférieure : le sel*, n.d., pp.141

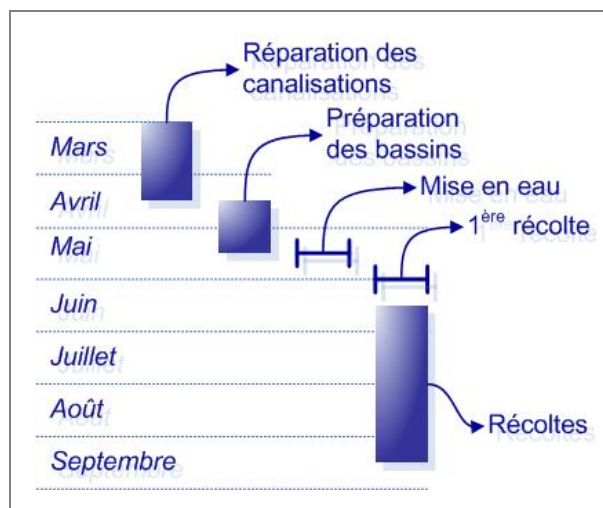


Figure 174 : 1900 – PLANNING ANNUEL DES PALUDIERS⁴¹⁷

Dans l'Ouest de la FRANCE, un paludier peut cultiver 40 à 50 œillets maximum. Chaque œillet lui rapporte environ 1500 à 3000 kg de sel par an. En 1900, la production d'un œillet est vendue 300 francs environ.

Pour assurer l'ensemble du processus de récolte, le paludier se fait aider de sa femme et de ses enfants. En complément, il embauche des porteurs plus couramment appelés *sauniers*.

Muni d'un permis de douane⁴¹⁸, le *saunier* charge les sacs de sel sur des mules voyageant en convoi de 50 à 60 têtes. Il se rend alors dans les communes avoisinantes et échange le sel contre du blé ou d'autres denrées. La *saunière* accompagne généralement son mari et, dans certaines villes comme à NANTES, elle assure elle-même la vente directe aux consommateurs.

En 1900, les marais salants de BATZ-SUR-MER sont considérés comme un des sites les plus productifs (figure 175). Cette commune est même citée comme exemple de réussite dans l'ouvrage *Album de l'Industrie* où il est même précisé que [BAYARD & AL 1900] :

Le nom de Batz signifiait, en langue celtique, lieu submergé, ce qui prouverait combien est ancienne, dans ce pays, l'exploitation des marais salants.

⁴¹⁷ Source : [FIGUIER 1880]

⁴¹⁸ Comme détaillé ci-après, depuis 1806, l'État perçoit une taxe douanière sur le sel et ce, jusqu'en 1945.

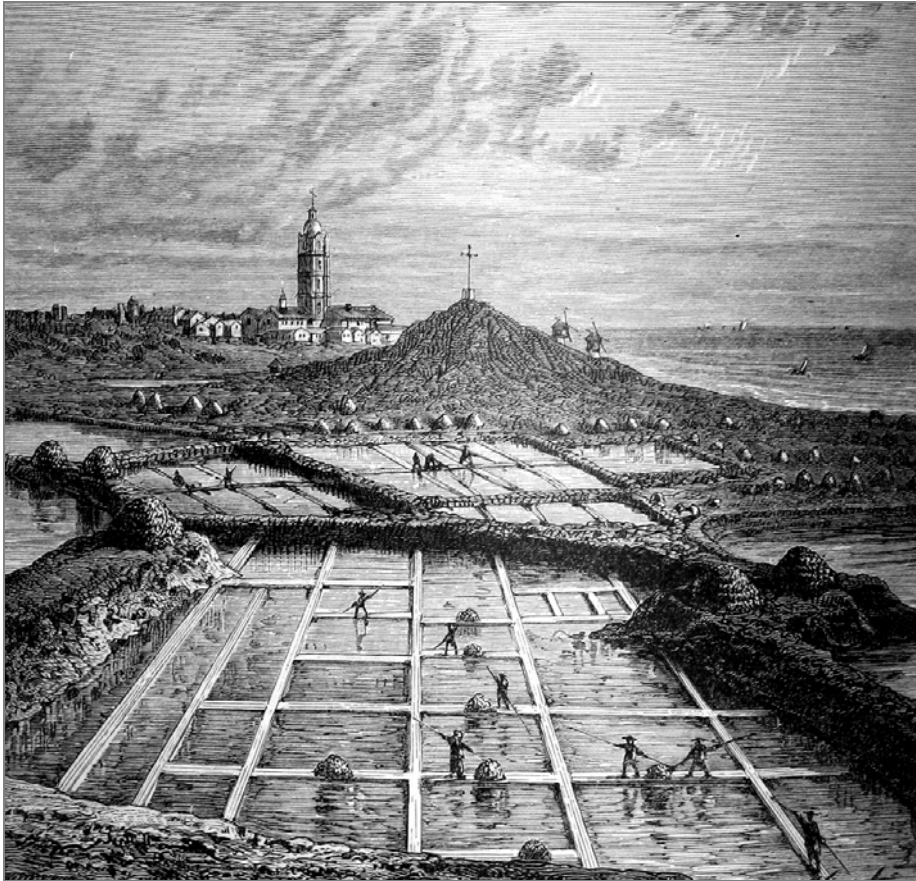


Figure 175 : 1900 – GRAVURE D'UN MARAIS SALANT A BATZ-SUR-MER⁴¹⁹

Dans l'Ouest, de très nombreux paludiers exercent à titre indépendant. Mais il en est tout autrement dans les marais salants du Midi de la FRANCE où un petit nombre de compagnies puissantes centralisent le travail en n'employant que des saisonniers. Cependant, la répartition des tâches est toujours similaire. On distingue plusieurs types de métiers :

1. les sauniers,
2. les manœuvres,
3. les ouvriers.

6.2.5.8 Le traitement du sel de mer aux 19^{ème} et 20^{ème} siècles⁴²⁰

Les œillets sont riches en eaux chargées en chlorure de magnésium. L'arrivée des eaux chargées en chlorure de sodium va alors aussitôt faire précipiter le sel marin. Ce sel n'est donc pas propre et est mal accepté par les consommateurs.

Notons que, afin d'éviter un traitement du sel pour le laver des impuretés comme nous allons le voir ci-après, un revêtement végétal est inventé au 19^{ème} siècle pour servir de fonds

⁴¹⁹ Source : [BAYARD & AL 1900]

⁴²⁰ Sources : [AUDIGANNE 1869] et [FIGUIER 1880]

aux tables salantes. Plus couramment dénommé *feutre*, il donne au sol l'imperméabilité nécessaire pour recueillir le sel exempt de toute terre.

Mais cette technique n'est utilisée que dans les marais salants du Midi et n'a pas été diffusée aux autres sites salicoles de FRANCE. Ainsi, le sel provenant de l'Ouest et de BRETAGNE porte une saveur amère en raison du sulfate de magnésium qu'il renferme. La plus grande partie de la population du littoral se contente de ce sel de couleur grise. Mais, pour une exportation comme sel de table, il faut le blanchir en le purifiant.

Le principe du lavage des sels marins récoltés sur fond d'argile consiste donc à éliminer les infimes parties terreuses adhérant aux cristaux de gros sel par brassage dans une solution saturée. L'opération peut s'effectuer à la main en trempant et en agitant des paniers de sel dans une barrique ou un baquet de saumure. Mais l'intérêt du négoce qui développe et alimente un marché, est de mécaniser le processus [BURON 2004].

Ce traitement s'effectue dans de petites usines dédiées. Usuellement, deux étapes se succèdent :

1. Le *lavage* consiste à nettoyer le sel brut dans de l'eau de mer saturée en chlorure de sodium : la saumure. Cette dernière ne peut dissoudre le sel car elle est elle-même déjà sursaturée en sel. Le lavage a donc uniquement pour effet de débarrasser le sel brut des matières terreuses qui le colorent en le transférant à la saumure. C'est une opération mécanique.
2. Le *raffinage* consiste à dissoudre le sel brut dans l'eau, et à l'évaporer dans une chaudière, pour le faire cristalliser. Cette opération permet de transformer le sel solaire en sel ignigène.

Afin d'employer une sémantique adaptée au métier et pour mettre en exergue les différences de vocabulaire technique entre le 19^{ème} et le 21^{ème} siècle, laissons le soin à Louis FIGUIER d'expliquer la technique générale de lavage du sel gris tel qu'il la décrit dans son ouvrage sur la *Science et l'industrie* [FIGUIER 1880] :

Voici comment on procède au lavage du sel gris. La masse qu'il s'agit de purifier est jetée dans un canal en bois, où elle rencontre un courant d'eau de mer saturée de sel marin, qui l'entraîne sur une paire de cylindres broyeurs. Au sortir de ces cylindres, le sel tombe dans une longue auge en bois, dans laquelle tourne une sorte de vis d'Archimède, formée de palettes discontinues implantées sur un arbre. Ces palettes sont inclinées sur l'hélice directrice, de sorte qu'elles ne fonctionnent pas seulement comme moteur du courant liquide, mais aussi comme barbotoirs. L'auge est inclinée : l'eau et le sel la parcourent en remontant sous l'action des palettes. Il est indispensable de faire marcher ainsi l'eau et le sel à contre-pente : autrement l'eau s'écoulerait trop vite et laisserait le sel en route.

Le sel parcourt, successivement deux ou trois laveurs semblables. Ces appareils sont disposés en cascade, de manière que le mélange de sel et d'eau saturée passe de l'un à l'autre, automatiquement, par l'action de la pesanteur.

Ordinairement on lave à deux eaux : le dernier laveur est disposé de manière à fonctionner comme appareil de rinçage. Le sel est élevé à ce rinceur par une chaîne à godets en tôle percée, qui laissent échapper l'eau du premier lavage. Le rinceur reçoit un courant d'eau saturée de sel marin et parfaitement claire. Ce n'est qu'au sortir du dernier laveur, ou rinceur, que le sel réclame de nouveau l'intervention de l'ouvrier.

Ce dispositif de *lavoir à hélices* aurait été inspiré des machines utilisées dans le traitement du noir animal dans les raffineries de sucre de la FLANDRE. Il aurait été introduit en FRANCE vers 1850 par un praticien fort ingénieux : M. Le GALL [AUDIGANNE 1869].

Après le *rinçage*, le sel peut être soumis à *l'étuvage*. Il est stocké dans un grand caisson rectangulaire et exposé à une chaleur intense grâce à un tuyau en acier dans lequel circule de la vapeur.

Pour la phase de *raffinage*, le sel est déposé dans des poêles ou des chaudières en acier. Il est mélangé à de l'eau de mer qui est introduite toutes les 24 heures. Durant ce laps de temps, l'évaporation permet de diminuer par cinq la quantité d'eau dans la poêle et ainsi de purifier le sel en enlevant les dernières impuretés. En faisant varier la température d'évaporation et la durée de cuisson, il est possible d'obtenir du sel plus ou moins gros.

Lorsque la solution prend une teinte rougeâtre et qu'elle atteint 28 à 30°C, on retire le sel. Il est ensuite placé sur des planches où il s'égoutte naturellement.

Les solutions d'eau de mer ou de saumure utilisées durant toutes les phases du processus de traitement du sel marin arrivent à épuisement au bout de quelques cycles. Il faut alors les *revivifier*. La *révivification* consiste à chauler les eaux, c'est-à-dire à les traiter par la chaux. La chaux les débarrasse de la totalité de la magnésie en la précipitant. En même temps, la majeure partie de l'acide sulfurique se dépose à l'état de sulfate de chaux.

La *révivification* peut également être utilisée pour raviver les sels vieux conservés depuis au moins deux ans sur les mulons. Pour ceux-ci, après *révivification*, il y a environ 10 % de déchets ; alors que la *révivification* des sels de moins d'un an atteint 18 à 20 % de déchets. Cette étape n'est donc pas prescrite pour les sels jeunes.

En 1880, le simple nettoyage ou lavage du sel revient à 50 centimes les 100 kilogrammes et le blanchiment revient à 4.50 francs les 100 kilogrammes. Le sel blanchi coûte donc un peu plus cher que le sel gris. Aussi, outre les usages de la table, l'emploie-t-on pour la salaison des sardines, à cause de la finesse des cristaux qui rend l'absorption plus rapide.

6.2.5.9 Le traitement du sel de mer au 21^{ème} siècle : une solution contemporaine similaire⁴²¹

Jusqu'au milieu du 20^{ème} siècle, tout porte à croire que les sauniers des côtes océanique et méditerranéenne exercent une industrie qui s'est transmise de génération en génération sans grand changement depuis les GAULOIS. Dans les exploitations de type familial

⁴²¹ Source : [SSM 2007]

subsistant sur le littoral atlantique, essentiellement en FRANCE et au PORTUGAL, la récolte est manuelle et s'effectue quotidiennement.

Toutefois, afin de gagner en main d'œuvre et en quantité de production, certaines exploitations contemporaines se sont mécanisées.

Une des entreprises leader sur le plan international dans la fourniture de technologies salicoles est la société SERRA SALT MACHINERY basée à BARCELONE en ESPAGNE. Depuis 1952, elle fabrique du matériel industriel pour raffiner et enrichir le sel. Elle a mécanisé la quasi-totalité des salines en ESPAGNE, au MEXIQUE ou en CHINE ainsi qu'un grand nombre de sites en AMERIQUE DU SUD, en AFRIQUE et en ASIE.

La figure 176 est une installation de raffinage de sel fabriquée par SERRA SALT MACHINERY. On constate que le principe de traitement est toujours le même qu'au 19^{ème} siècle :

Une vis d'Archimède brasse le sel dans un bac rempli de saumure.

Cependant, l'innox, et sans doute les matières plastiques, ont remplacé le bois limitant ainsi les fuites et l'entretien. Un laveur comme illustré ici peut traiter jusqu'à 300 tonnes de sel par heure. Une usine moderne peut désormais produire un sel d'une pureté de près de 99.7 %.



Figure 176 : SERRA SALT MACHINERY, RAFFINAGE DU SEL

6.2.6 ÉTUDE EXTERNALISTE : INDUSTRIALISATION ET GESTION DU LAVAGE DU SEL DANS LES MAGASINS BERTRAND A BATZ-SUR-MER

6.2.6.1 Positionnement du schème étudié dans l'espace du DHRM et classes impactées

L'étude précédente a permis de valider le processus de traitement du sel par la saumure. Ainsi, les hypothèses des fouilles archéologiques valident également le **schème a priori**. Cependant, on peut observer que le langage utilisé par Louis FIGUIER dans sa description de 1880 n'est pas du même ordre sémantique que celui employé dans *l'étude internaliste*. Mais la multi-temporalité du **DHRM** inclut cette différence de vocabulaire en permettant des liens entre les époques temporelles.

Grâce au concept des *boîtes noires* / *boîtes blanches*, plaçons désormais la **typologie structurante** de *l'objet technique ancien* à un niveau supérieur en rabaissant à un niveau **infrastructural** le **schème** du processus de la machine analysé au début cette étude. Nous pouvons désormais mener une *étude externaliste* sur l'ensemble du processus industriel. La mise en corrélation avec l'architecture des bâtiments du site industriel permet de reconstituer le flux du processus de production. Ce nouvel **usage** inclut les **contextes** des classes du **réel** et de la **réalité** par l'analyse des **caractéristiques** des **fonctions** des Systèmes Techniques de fabrication, de maintenance, de gestion et de transport selon une **structure** multi-dimensionnelle : c'est l'usine et son **environnement**. La multi-temporalité de ce **schème** est donc celle du PLC étendu à t_f (figure 177).

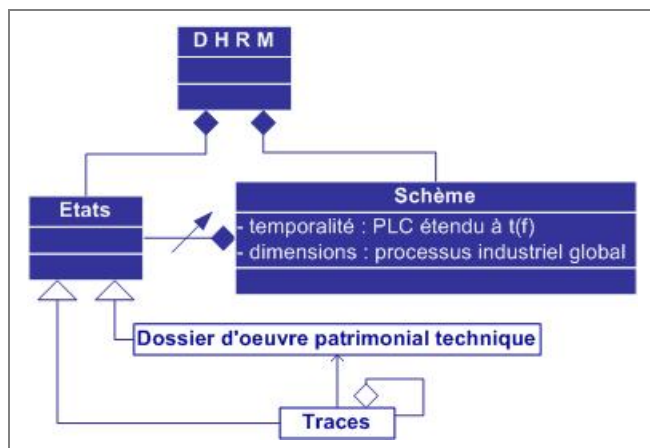


Figure 177 : CAS D'ETUDE DE BATZ-SUR-MER – DIAGRAMME DE CLASSES INTERMEDIAIRE DU DHRM - ETUDE EXTERNALISTE : INDUSTRIALISATION ET GESTION DU LAVAGE DU SEL DANS LES MAGASINS BERTRAND A BATZ-SUR-MER

6.2.6.2 La chaîne opératoire de lavage du sel dans les magasins Bertrand⁴²²

La production récoltée dans les salines est livrée par les paludiers aux salorges⁴²³ de l'entrepreneur-négociant par charrettes, voire par camions. Les convois de charrettes bleues venues de tout le marais peuvent parfois atteindre plusieurs centaines de mètres dans la rue du FOUR⁴²⁴ en attendant leur tour pour décharger.

Les ouvriers pèsent la quantité de gros sel en tenant compte du taux d'humidité⁴²⁵ puis l'entassent sur les planchers de la laverie à l'aide d'un tapis élévateur⁴²⁶. Durant cette première phase, le négociant et son épouse surveillent les opérations.

Après avoir été stocké sur l'aire cimentée située juste au dessous du quai de déchargement dans l'angle nord-ouest du bâtiment, le sel est tamisé sur l'aire de stockage située au pied de la chaîne à godets. Puis il est alors pelleté dans le puits rempli de saumure.

La chaîne à godets élève l'eau jusqu'à la gouttière et tombe dans la trémie du premier bac à laver.

L'opération mécanique qui s'en suit dans les trois lavoirs successifs est telle que décrite précédemment par FIGUIER.

Greffée à l'extrémité du flanc du dernier bac, une goutte de bois permet de recueillir le sel lavé dans une brouette à fond percé. Le sel épuré est ensuite déposé à même le sol dans le bâtiment. Il sèche pendant une durée d'une semaine à un mois ; la moyenne étant de 15 jours.

Puis il est mis en sac de 50 kg puis de 25 kg quelques années plus tard. Après la Seconde Guerre mondiale, afin de faire face à une clientèle de consommateurs plus exigeante, le sel est disponible directement chez le négociant en sac de 1 kg, 5 kg et 10 kg.

Les sacs sont ensuite livrés aux usagers, aux commerçants ou aux détaillants. Le sel destiné à l'exportation est acheminé jusqu'à la gare par l'entreprise⁴²⁷. A partir des années 1930, les commandes sont livrées, non plus par chemin de fer, mais par la route.

La figure 178 est une carte postale non datée mais estimée au début du 20^{ème} siècle sur laquelle une charrette descend la rue de la GARE à BATZ-SUR-MER.

⁴²² Source : [BURON 2004]

⁴²³ Salorge = Magasin servant à entreposer le sel.

⁴²⁴ A BATZ-SUR-MER, La rue du FOUR prolonge la rue PASTEUR en direction de ST NAZAIRE.

⁴²⁵ Il arrivait parfois qu'un sac de 52 kg soit compté 50 kg en raison de l'humidité du produit.

⁴²⁶ Le tapis élévateur est également dénommé *sauterelle*. Fonctionnant à l'électricité, durant la deuxième guerre mondiale les pénuries obligent les ouvriers à charger le sel manuellement.

⁴²⁷ Nous verrons par la suite que l'acheminement s'effectue d'abord en charrettes puis en camions.



Figure 178 : 20^{ÈME} SIECLE – CHARRETTE DESCENDANT LA RUE DE LA GARE A BATZ-SUR-MER⁴²⁸

L'industrialisation de la chaîne de production porte ses fruits puisque la machine à laver le sel permet à l'entreprise de raffiner entre 15 et 20 tonnes de sel par jour, une production souvent supérieure aux autres entreprises de la région. En effet, selon une note conservée dans les archives municipales, la laverie d'André BERTRAND aurait lavé 5 000 tonnes de sel en 1940 contre 2 000 seulement pour l'entreprise voisine MARCHEVILLE-DAGUIN⁴²⁹.

6.2.6.3 La commercialisation du sel : conditionnement et transport⁴³⁰

Nécessitant un site naturel propice à la culture du sel avec de grandes étendues, un ensoleillement élevé et une pluviométrie relativement basse, BATZ-SUR-MER est depuis fort longtemps un lieu idéal pour la fabrication du sel. Mais la concurrence et les fluctuations de prix obligent les négociants en sel à s'ouvrir à de nouveaux clients parfois éloignés du site de production. Le train PARIS-ORLEANS-ST NAZAIRE avec sa prolongation jusqu'au CROISIC va alors faciliter les expéditions de sel vers le Grand-Ouest et la Capitale.

A ses débuts, l'entreprise BERTRAND expédie son sel par rail jusqu'à CARHAIX ou CHATEAUBRIANT. Parmi ses clients à CHATEAUBRIANT, on peut citer le tanneur Robert DUCLOUX.

⁴²⁸ Source : Archives des Marais Salants de Batz-sur-Mer : Le Bourg de Batz – Rue de la Gare, carte postale, n.d., ~1900

⁴²⁹ Source : Archives des Marais Salants de Batz-sur-Mer : *Notes personnelles* de André BERTRAND, F 8, 1941

⁴³⁰ Sources : [BURON 2004] et [LHERITEAU 1999]

L'acheminement des expéditions jusqu'à la gare est effectué en charrettes. Le transport emprunte tout d'abord la rue PASTEUR⁴³¹ puis la rue de la GARE. Ce parcours non direct s'explique par le fait que fin du 19^{ème} siècle, la Douane perçoit encore un impôt sur le sel et qu'il est obligatoire de passer devant le poste de la rue PASTEUR. Les douaniers pèsent au hasard un sac de sel sur la balance à fléau et ne tolèrent que ± 200 grammes de différence sur un sac de 50 kg.

Par la suite, les vérifications se sont opérées à la gare et un pont-bascule permettait de peser la charrette entière. Le parcours des *rouliers* change alors : descente de la rue du TRAICT et de la rue de la VIOLETTE. C'est ainsi qu'il est possible d'observer sur la figure 179 que la route empruntée suit naturellement une courbe optimisée pour les charrettes : pas d'angle droit, parcelles rabotées... Or, sur le cadastre NAPOLEONNIEN de 1856, ces deux rues n'existent pas encore. Aussi, leur création s'appuie sûrement sur le tracé qu'empruntaient les charrettes se rendant à la gare depuis la propriété BERTRAND.

Un wagon pouvant contenir 10 tonnes de sel et un sac pesant 50 kg, les *rouliers*⁴³² de M. BERTRAND⁴³³ font alors six voyages jusqu'à la gare en emportant à chaque fois 33 à 34 sacs.

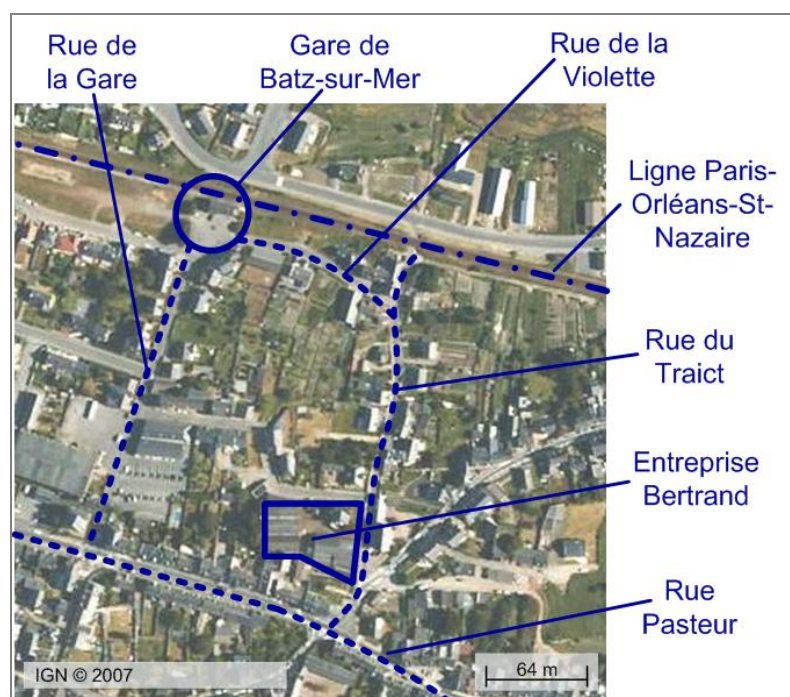


Figure 179 : 2007 - CARTE IGN D'IMPLANTATION DE L'ENTREPRISE BERTRAND A BATZ-SUR-MER AVEC LA LIGNE DU PARIS-ORLEANS-ST-NAZAIRE

Mais au lendemain de la Seconde Guerre Mondiale, le négoce des sels marins en gros doit faire face à une concurrence de plus en plus rude et se doit de livrer directement à ses

⁴³¹ La rue PASTEUR est issue de la réunion de l'ex-rue de la POSTE et de l'ex-rue du FOUR.

⁴³² Roulier = nom donné aux ouvriers chargés de transporter le sel.

⁴³³ Depuis 1921, BERTRAND emploie deux ouvriers et deux chevaux.

consommateurs⁴³⁴. C'est à cette période que le conditionnement du sel par paquets de 1 kg, 5 kg et 10 kg apparaît. Identifiés par le label *Sel Armor*, ils sont destinés au commerce de détail.

Les petites livraisons sont assurées par un transporteur local : JAUNASSE ET MONTFORT.

Mais, paradoxalement, BERTRAND se dote de camions pour assurer les plus grosses commandes. En 1955, l'entreprise compte quatre véhicules RENAULT de 10 tonnes. Puis elle emploie trois camions RENAULT de 10 tonnes et un camion WILHEM de 20 tonnes. Ils voyagent en INDRE-ET-LOIRE, en MAYENNE, dans le MAINE-ET-LOIRE, dans la SARTHE et la TOURAINE... Pour rentabiliser son affaire, les poids lourds reviennent chargés de fret.

6.2.6.4 Le problème de la saumure : alimentation et vidage des cuves⁴³⁵

Un problème récurrent au lavage du sel n'est pas mentionné dans la documentation historique généraliste : celui de la saumure.

L'étude du cas des magasins BERTRAND de BATZ-SUR-MER met en lumière les difficultés liées à l'utilisation d'une solution sur-saturée en sel considérée de nos jours comme polluante pour l'environnement. Comme nous allons le voir dans cette partie, la saumure est problématique aussi bien durant son utilisation qu'à sa fin de vie.

La saumure est obtenue par dissolution de gros sel dans de l'eau douce à raison de la fonte d'une tonne de sel pour 10 à 15 tonnes de sel à laver. L'eau nécessaire est puisée aux fontaines communales et acheminée dans une tonne à eau sur roues. Mais malgré le dispositif de récupération placé sous la machine à laver, suite aux nombreuses fuites et à l'étanchéité imparfaite des cuves enterrées, il faut régulièrement apporter un complément de saumure aux cuves.

De plus, la saumure ayant absorbée l'argile du sel lavé, la décantation crée un dépôt au fond des cuves. Aussi, il faut périodiquement vider les cuves. Grâce à une caisse à vase fabriquée artisanalement, les résidus sont transportés :

- dans une petite carrière désaffectée située en bordure du marais salant⁴³⁶,
- ou épandue sur l'ancien placitre⁴³⁷ de PRADEVELIN.

Mais le rejet des boues de lavage ne s'est pas toujours fait en carrières. Entre 1898 et 1905, les vases saturées sont épandues sur des terrains à proximité de l'entreprise.

⁴³⁴ En 1945, parmi les clients de l'entreprise BERTRAND, on dénombre des boulangers, des charcutiers, des épiciers en gros, des tanneurs.

⁴³⁵ Source : [BURON 2004]

⁴³⁶ Il s'agit du lieu-dit BERRIGO que l'entreprise BERTRAND rachète par la suite.

⁴³⁷ Placitre = terrain délimité par une clôture entourant l'église. Il servait de cimetière et de lieu d'assemblée religieuse. [VPAH 2007]

Rapidement, les infiltrations salines contaminent le puits communal de LA VIOLETTE situé en contrebas de la propriété BERTRAND. L'eau impropre donne lieu à la signature d'une pétition destinée au maire⁴³⁸. L'entreprise ne voulant céder à un quelconque chantage se voit proposer d'utiliser des carrières désaffectées pour dépoter ses déchets. Ce site est utilisé aussi bien par l'entreprise BERTRAND que par l'entreprise voisine ALLARD, interpellé au même moment dans une semblable affaire de pollution.

6.2.6.5 Le site et le processus de production

Avec 2900 m², l'entreprise BERTRAND occupe l'une des plus importantes parcelles du bourg de BATZ-SUR-MER. Le complexe industriel s'organise autour d'une cour pavée aux contours non réguliers. Cette structure solidifiée du sol facilite la circulation des chevaux et des charrettes sans quoi, les roues s'enfonceraient dans le sol terreux et sableux⁴³⁹.

Donnant sur la rue du TRAICT, un premier ensemble (bâtiment A), abrite la laverie, les magasins et les écuries. Le sel de la saison y est réceptionné. Une fois traité dans ce même bâtiment, le sel est stocké dans les grands magasins situés à l'arrière (bâtiment B). La figure 180 est un plan cadastral positionnant ces deux bâtiments dans le bourg.

On notera la présence de la maison de la famille BERTRAND dans l'enceinte du site : une bâtisse de maître dans le style des villas de LA BAULE. Elle fut construite vers 1911 et adossée aux bureaux de l'entreprise eux-mêmes conçus en 1909. La proximité et le large panorama offert par les bureaux sur le site permettent ainsi de surveiller les ouvriers.⁴⁴⁰

Vers 1923, au moment du pavage de la cour, quelques garages et autres petits apprentis sont construits dans la propriété pour abriter charrettes, voitures, camions...⁴⁴¹

⁴³⁸ Source : Archives des Marais Salants de Batz-sur-Mer : Courrier de M. Le Maire de Batz à Jean-Baptiste BERTRAND, I 1, 10 mars 1905

⁴³⁹ Il faudra attendre la fin de la seconde guerre mondiale pour voir apparaître les premiers pneumatiques sur les brouettes et les charrettes.

⁴⁴⁰ Source : [BURON 2004]

⁴⁴¹ Source : [LHERITEAU 1999]

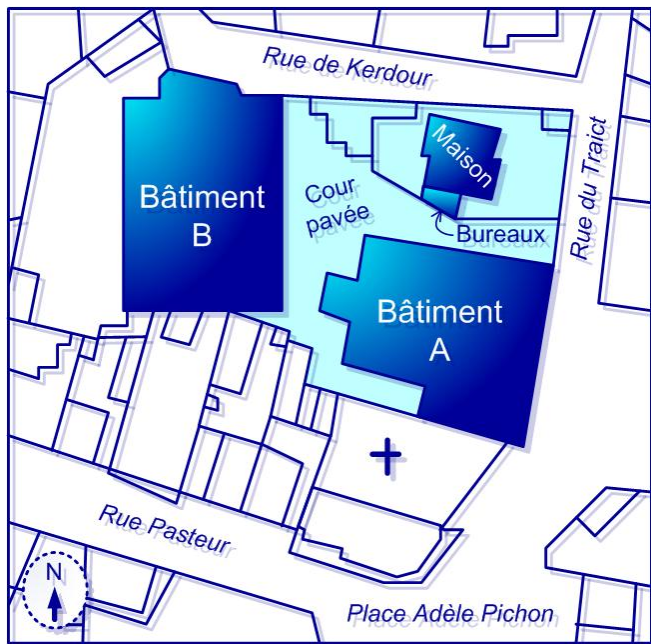


Figure 180 : PLAN D'IMPLANTATION CADASTRAL DE LA PROPRIETE BERTRAND, BATZ-SUR-MER

Le bâtiment A⁴⁴² est la plus ancienne construction : il date de la fin du 19^{ème} siècle. Le magasin est construit en moellons de granité⁴⁴³ beige et gris. Il se décompose en quatre compartiments tel que détaillés par la figure 181.

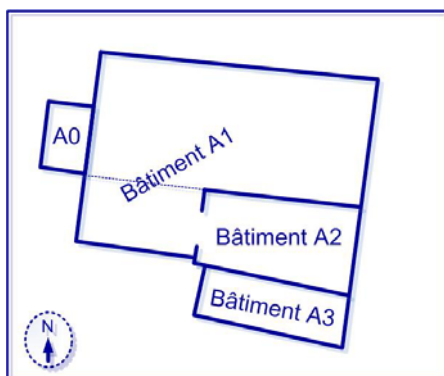


Figure 181 : DESCRIPTION DES DIFFERENTES PIECES DU BATIMENT A, MAGASINS BERTRAND, BATZ-SUR-MER

La travée principale (bâtiment A1) est en forme de L et mesure au plus long 28 mètres sur le côté Nord. Elle est couverte d'un toit en ardoises soutenu par plusieurs grandes fermes. L'accès s'effectue par une porte de 3 mètres de large sur la façade Est donnant accès à rue du TRAICT. A l'opposé, sur le mur Ouest, une baie de 1.60 mètres de large et de 1.80 mètres de haut est située à 1.30 mètres au dessus du sol extérieur ; il s'agit du quai de déchargement permettant de vider directement les charrettes.

⁴⁴² Parcelle cadastrale n°110

⁴⁴³ Le granité est une roche magmatique. A structure poreuse, elle se distingue du granit qui lui, est un type de roche non poreuse, imperméable et qui ne s'effrite pas.

Avec une surface au sol d'environ 85 m² et une hauteur sous les fermes de 3.60 mètres, des amas de sel importants sont entreposés dans le bâtiment A2. L'ouverture sur la rue du TRAICT est assurée par une porte coulissante identique à celle du bâtiment A1.

Le sol de A1 et A2 est constitué d'un mélange de sel et de sable recouvert par des planches de bois. Celles-ci ont actuellement perdu leur surface supérieure suite à l'entreposage de sel humide. La disposition de certaines planches indique que certaines ont été positionnées judicieusement pour permettre aux ouvriers de se déplacer avec leurs brouettes. On notera que les entrées des bâtiments A1 et A2, du côté de la rue du TRAICT, sont complètement pavées.

La machine à laver le sel est adossée au mur Ouest du bâtiment A1.

L'axe principal de distribution des courroies est situé au dessus de la machine et est accroché au mur Ouest. La courroie principale d'alimentation en force motrice traverse ce mur et rejoint le moteur situé dans le bâtiment A0. Une petite porte côté Nord de la machine permet d'accéder du bâtiment A0 au bâtiment A1.

Cet espace A0 occupe 22 m² et sert également de vestiaires. Comme vu dans la partie précédente dédiée aux fouilles archéologiques, un établi de menuisier est présent le long du mur Nord et un meuble à tiroirs sur le mur Est.

Le bâtiment A3 est construit sur deux niveaux. Le rez-de-chaussée est séparé en deux pièces non communicantes :

- Le premier espace d'environ 9 mètres de long est réservée au stockage du sel blanc⁴⁴⁴ pour les paludiers ne lavant pas le sel à la laverie.
- Donnant sur une cour arrière côté Ouest, on trouve l'écurie dans laquelle sont encore en place les râteliers ainsi que divers matériels tels que bascule et tréteaux.

L'étage couvre toute la surface du corps du bâtiment. Il permet de stocker le foin pour les chevaux.

Le bâtiment B est un grand magasin à sel de 825 m². Dû au nombre important de poteaux soutenant la charpente, le stockage en sacs est préféré au stockage en vrac tel que procédé avant traitement. Avec une capacité de 6 000 tonnes de sel, il est placé ici pour sécher avant de partir en train. Des témoignages rapportent qu'en 1955 la salorge B aurait même été à la limite de sa capacité.

Semblable aux installations des moulins à farine, une unité d'ensachage est encore en place dans le bâtiment B. Cet atelier est structuré sur deux niveaux. Le sel est vidé, en vrac, au premier étage et tombe dans un entonnoir. Les sacs de 1 kg, 5 kg et 10 kg sont positionnés au goulot d'étranglement pour y être remplis.

⁴⁴⁴ Ce produit est appelé contemporainement *fleur de sel*.

Bien que le bâtiment B semble plus récent et mieux conservé que l'ensemble des bâtiments A, des motifs identiques de briques rouges, en arc, ornent une majorité des ouvertures de A1 et B (figure 182).

Cependant, les bâtiments A2 et A3 possèdent, eux, des linteaux monolithes droits en granité et en bois. Il s'avère en fait que A2 et A3 ont été construits avant 1902.

Sachant que l'entreprise débute ses activités avec le bâtiment A1, comment expliquer que les motifs des portes soient similaires entre A1 et B ?

Durant sa période de croissance fin du 19^{ème} siècle, l'entreprise effectue plusieurs constructions comme celle du petit magasin et de l'écurie (bâtiments A2 et A3). De même, en janvier 1914, Jean-Baptiste BERTRAND acquière 401 m² de terre et fait construire un vaste grenier à sel désigné sous le nom de Grand Magasin : c'est le bâtiment B. Par la même, souhaitant étendre son activité, c'est à ce moment que la laverie de sel est construite et que les bâtiments A0 et A1 sont rénovés.



Figure 182 : 2007, PHOTOGRAPHIE DEPUIS LA RUE DU TRAICT DE LA FAÇADE DU BATIMENT A

Témoignage de cette période prospère, on peut encore percevoir une inscription encadrée d'un motif de briques sur la façade du magasin B. Elle est devenue pratiquement illisible par le temps :

JB Bertrand-1914

Nuançons nos propos en précisant qu'une gravure retrouvée en août 2007 par les conservateurs du Musée montre que le bâtiment A1 existe déjà en 1909. La photographie prise en 2007 peut être comparée à la figure 183 ; sur cette dernière, on distingue, de gauche à droite :

1. le bâtiment A3,
2. le bâtiment A2,
3. le bâtiment A1,
4. la maison du chef d'entreprise.

Cependant, A1 n'a pas la même structure architecturale tel qu'il est possible de l'observer de nos jours. Il s'agit en réalité d'un bâtiment semblable à A2 donc moins long, moins large mais plus haut. Le bâtiment A1 aurait donc un ancêtre qui aurait été détruit ou agrandi. Pourquoi avoir donné le nom de Magasins de la CROIX DE PAIX avec le terme Magasins au pluriel si un seul bâtiment existe fin du 19^{ème} siècle⁴⁴⁵ ? Cette hypothèse d'antériorité semble donc probable. Cependant, aucune archive historique n'a été retrouvée et aucune fouille d'excavation n'a encore été réalisée pour la valider.

Malgré tout, considérons le bâtiment A1 dans son état actuel pour déterminer le flux de production de l'entreprise.

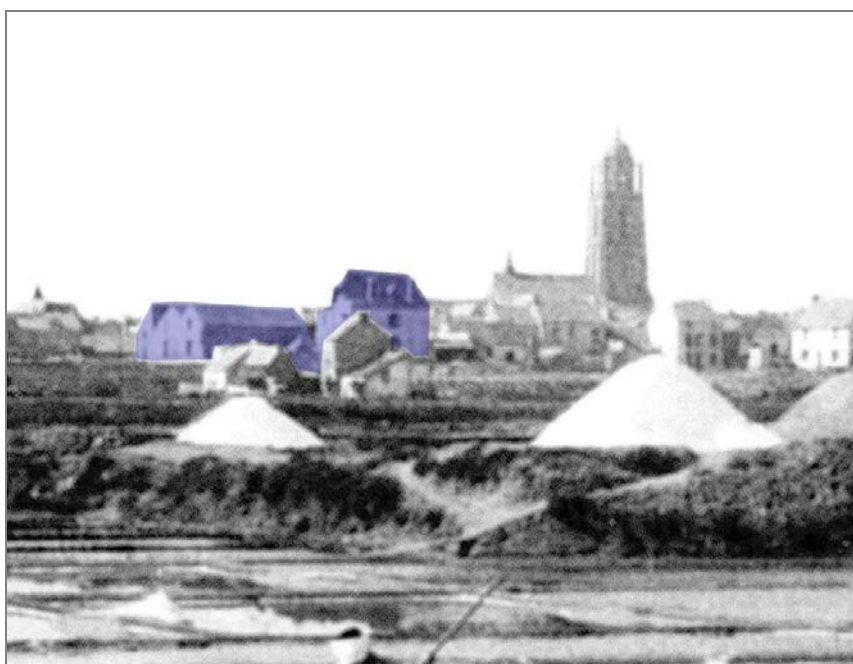


Figure 183 : AVANT 1909, LES MAGASINS DE LA CROIX DE PAIX

Les deux bâtiments A et B sont seulement distants d'une vingtaine de mètres limitant ainsi les trajets des manutentionnaires à l'intérieur de l'entreprise.

⁴⁴⁵ Le bâtiment A3 ne peut être considéré comme un magasin car ce n'est pas une remise de stockage de gros tonnage.

Le flux de production du sel dans l'entreprise BERTRAND en 1914 est illustré par la figure 184. Le sel arrive sur charrette par la route ❶. Il est stocké en tas dans l'espace ❷. La machine à laver le traite en ❸. Il est mis à égoutter en vrac puis ensaché en ❹. La salorge ❺ permet de le faire sécher.

Dans le cas où le bâtiment A1 ne peut contenir tout le sel recueilli dans les œillets, celui-ci est exceptionnellement stocké dans le bâtiment B puis ramené via le quai de déchargement au pied de la chaîne de la godet en A1.

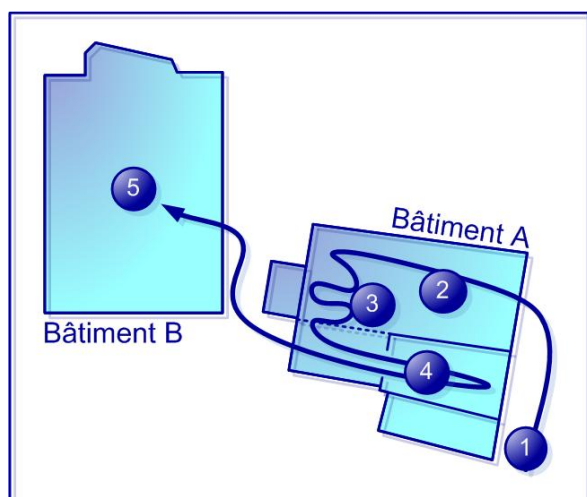


Figure 184 : LE FLUX DE PRODUCTION DANS LES MAGASINS BERTRAND, BATZ-SUR-MER

6.2.7 L'ENTREPRISE BERTRAND DE NEGOCE DE SELS MARINS⁴⁴⁶

6.2.7.1 Positionnement du schème étudié dans l'espace du DHRM et classes impactées

Dans son état actuel de **Dossier d'œuvre patrimonial technique**, l'aspect *internaliste* du **schème a priori** est complet. Certaines hypothèses ont été émises sur l'aspect *externaliste* pour pouvoir mettre en relation les **typologies structurantes** de l'objet **technique ancien**.

Afin d'enrichir le **DHRM** d'un **schème d'usage**, cette nouvelle *étude externaliste* est orientée vers **l'homme** selon une autre temporalité de type PLC étendu : la période de vie de cette entreprise de production de sel. Le **contexte réel** de la **technique** va désormais être validé et le **contexte organisationnel** atteint lui aussi son stade de maturité.

En revanche, le **contexte socio-économique** est enrichi à un niveau **infrastructural** et nécessitera alors une nouvelle itération pour être complet à un niveau **architectural**. Ce sera l'objet de la dernière étude de ce chapitre.

Cependant, ce nouveau **schème** intermédiaire permet de comprendre dans quel contexte le Système Technique a évolué : naissance, usage et déclin (figure 185).

⁴⁴⁶ Source : [BURON 2004]

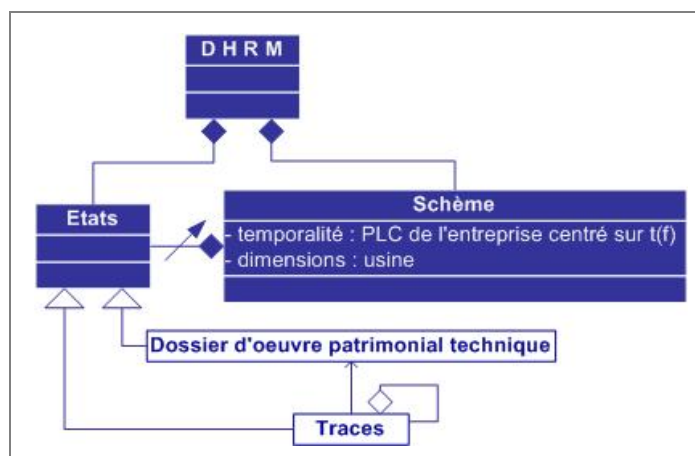


Figure 185 : CAS D'ETUDE DE BATZ-SUR-MER - DIAGRAMME DE CLASSES INTERMEDIAIRE DU DHRM - L'ENTREPRISE BERTRAND DE NEGOCE DE SELS MARINS

6.2.7.2 Les origines de l'entreprise

Depuis plusieurs générations, le métier de boucher à BATZ-SUR-MER se transmet de père en fils dans la famille DENIEL. Formé à ce métier par son père Jean-Marie, Pierre-François⁴⁴⁷ diversifie pourtant ses activités en se lançant dans le commerce des cuirs en poil au début des années 1880.

Entre 1882 et 1897, Pierre-François DENIEL élargit son négoce à l'ensemble de l'Ouest de la FRANCE dans le commerce des sels en gros. Nécessitant un lieu pour abriter ses stocks et spéculer, il fait construire en 1879 les Magasins de la CROIX DE PAIX sur une parcelle de 22 ares. En réalité, ces magasins ne sont achevés que fin 1884.

En novembre 1884, les murs menaçant de s'écrouler, Pierre-François DENIEL souhaite les consolider. Mais les renforts doivent être construits sur une parcelle communale. Il obtient alors rapidement cette concession de 80 m² supplémentaires.⁴⁴⁸

En 1886, il fonde une entreprise de raffinage du sel, implantée stratégiquement en bordure d'un étier⁴⁴⁹ navigable et à quelques centaines de mètres de la gare de chemin de fer⁴⁵⁰.

Mais en 1897, Pierre-François DENIEL se voit placé en liquidation judiciaire. Il est contraint de cesser certaines de ses activités et le Tribunal Civil de SAINT-NAZAIRE décide de vendre une partie de son patrimoine.

⁴⁴⁷ 1848-1914

⁴⁴⁸ Source : Archives des Marais Salants de Batz-sur-Mer : *Acte de concession de terrain communal*, P.-F. DENIEL, BATZ-SUR-MER, D 7, 23 novembre 1884, f° 115 v°-116 r

⁴⁴⁹ Etier = Canal faisant communiquer un marais littoral avec la mer à marée haute.

⁴⁵⁰ La Compagnie d'ORLEANS est opérationnelle dès 1878.

6.2.7.3 Un patrimoine familial : l'entreprise Bertrand

Paludier d'origine, Jean-Baptiste BERTRAND⁴⁵¹ cultive des œillets pour le compte de ses parents. A partir de 1887, il exerce au bénéfice du foyer qu'il vient de fonder.

Le 15 mai 1898, il accède au titre de négociant avec l'achat des entrepôts de Pierre-François DENIEL pour la somme de 4 250 francs : les Magasins de la CROIX DE PAIX (bâtiments A0 et A1) et ses 22 ares adjacents⁴⁵². Désormais, il est en mesure de proposer une large gamme de sels comme l'attestent les en-têtes de ses factures :

Sels épuré blanc, épuré vert, demi lavé, lavé, guérandin et raffiné fin.

Pour répondre aux multiples transformations survenues dans les modes de transport et de commercialisation des sels de l'Ouest, Jean-Bapstiste BERTRAND entreprend d'agrandir son site industriel dès 1902 comme nous l'avons détaillé précédemment : bureaux, maison personnelle... et surtout l'entrepôt supplémentaire en 1914 (bâtiment B).

Ainsi, à la capacité de stocker en grande quantité les sels marins, Jean-Baptiste BERTRAND va automatiser une partie de sa chaîne de production : le lavage des sels.

Il intègre alors au chantier du bâtiment B la rénovation des Magasins de la CROIX DE PAIX et y installe la machine à laver le sel (bâtiment A1).

Opérationnelle dès 1915, l'activité de la laverie des Magasins de la CROIX DE PAIX cesse à la fin de l'année 1966. En effet, suite au décès d'André BERTRAND⁴⁵³ en février 1963, l'entreprise ferme le 25 décembre 1966⁴⁵⁴.

Le patrimoine de l'entreprise, et donc celui de la famille BERTRAND, ne se limite pas aux propriétés bâties. Les BERTRAND possèdent quelques terres à GUERANDE destinées au fourrage des animaux. Mais surtout, ils détiennent plus d'un millier d'œillets. Ainsi, à la fin des années 1960, André BERTRAND fait partie des cinq propriétaires les plus importants du marais salant guérandais⁴⁵⁵.

Ayant profité de l'arrivée du chemin de fer à la fin du 19^{ème} siècle pour développer l'activité de l'entreprise, les BERTRAND sont considérés comme la plus importante et la plus influente famille de propriétaires fonciers du marais salant de GUERANDE. Hissant André BERTRAND dans le monde des négociants en sel, son succès lui vaut d'être élu par ses pairs *Président de la Chambre syndicale des négociants en sels de l'Ouest* en 1950.

⁴⁵¹ 1855-1927

⁴⁵² Source : *Le Courrier de Saint-Nazaire*, 32^{ème} année, n°24, 11 juin 1898

⁴⁵³ De son mariage, Jean-Bapstiste BERTRAND a quatre enfants : deux garçons et deux filles. Né en 1896, son plus jeune fils André (1896-1963) hérite de l'entreprise de négoce de sel en gros en 1927.

⁴⁵⁴ Source : Archives des Marais Salants de Batz-sur-Mer : *Lettre de licenciement* de M. Alexandre LACALLO adressée par la société BERTRAND, 25 novembre 1966

⁴⁵⁵ Ne pouvant exploiter l'ensemble de ses terres, André BERTRAND confie une partie de ses œillets aux ouvriers de l'entreprise qui les cultivent en dehors de leurs heures de travail. Le solde est confié aux paludiers du terroir sur lequel André BERTRAND perçoit un métayage généralement livré en nature.

On notera qu'auparavant, sa position de notable lui a valu d'être maire de BATZ-SUR-MER de décembre 1928 à mai 1935. Un poste que son père Jean-Baptiste BERTRAND avait eu l'occasion d'occuper de 1900 à 1902.

6.2.7.4 Usage courant et maintenance

En 1901, Jean-Baptiste BERTRAND emploie deux ouvriers et recrute, dès 1906, trois journaliers supplémentaires.

En 1921, André BERTRAND participe aux activités de l'entreprise. Au père et au fils, il faut ajouter deux manœuvres et deux rouliers. Les réparations courantes de la laverie de sel sont réalisées par le menuisier du bourg dont le local est situé à quelques centaines de mètres de la laverie : LEHUEDE Père et Fils.

Désormais responsable de l'établissement, André BERTRAND emploie cinq ouvriers permanents en 1931.

Dès 1936, André BERTRAND recrute du personnel féminin pour assurer la partie administrative de l'entreprise. Cependant, après la seconde guerre mondiale, l'employée de bureau, originaire du CROISIC, participe également au conditionnement du sel ensaché en petite quantité.

Puis, jusqu'à la fermeture de l'entreprise, en plus de la femme d'André BERTRAND, trois jeunes dames participent à la gestion administrative et aux petites tâches de l'usine.

Revenons avant guerre pour préciser que, suite à l'acquisition d'un moyen de transport routier en 1936, un nouvel employé est embauché en la qualité de conducteur et de mécanicien. Cette camionnette est tout d'abord destinée à remplacer les sauniers puis les rouliers. Cette diversification d'activité dans le transport et la livraison à domicile amène André BERTRAND à se doter, après guerre, de camions de gros tonnages comme nous l'avons mentionné précédemment. Dès lors, le métier de roulier s'apparente à celui de chauffeur.

A partir de 1950, le fonctionnement de la laverie nécessite quatre ouvriers permanents et André BERTRAND fait régulièrement appel à des commerciaux rémunérés à la commission.

Il est intéressant de noter qu'une certaine hiérarchie s'instaure dans les différents métiers de l'entreprise. Ainsi, avant de devenir roulier, chaque employé passe quelques années au poste de manœuvre. Roulier nécessitant sûrement une grande part de confiance de la part du responsable de l'entreprise.

Au bilan, il est difficile d'évaluer le nombre exact d'ouvriers travaillant dans l'entreprise. Aux rouliers, aux manœuvres dédiés à la réception du sel, au lavage, à l'ensachement... il faut également s'occuper des chevaux... Le graphique de la figure 186 illustre l'évolution du

nombre minimal de salariés de 1898 à 1966. Il s'agit ici d'hypothèses minimalistes. En effet, aux permanents, il convient d'ajouter de nombreux journaliers et saisonniers ainsi que les enfants qui venaient régulièrement aider leurs parents, main d'œuvre non mentionnée dans les archives administratives.

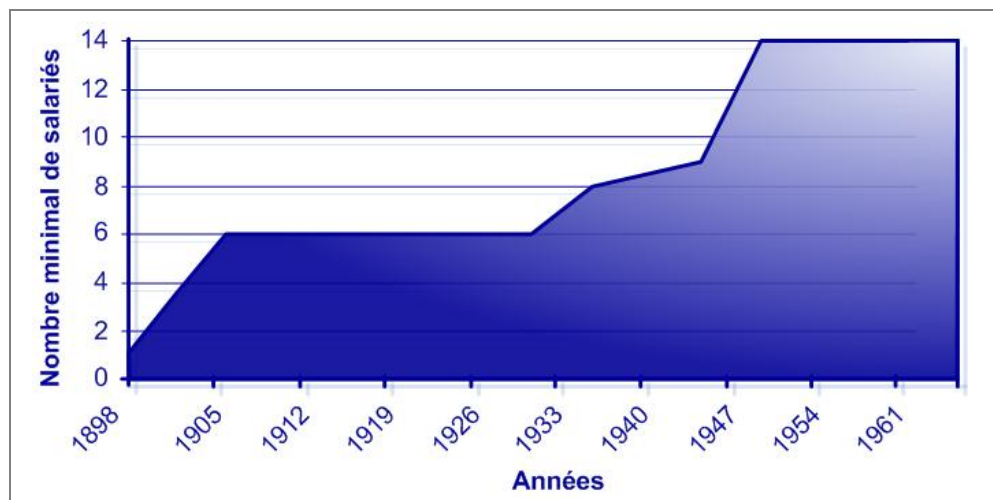


Figure 186 : EVOLUTION DU NOMBRE MINIMAL DE SALARIES DE L'ENTREPRISE BERTRAND DE BATZ-SUR-MER DE 1898 A 1966⁴⁵⁶

6.2.8 LE SEL EN BRETAGNE : UN CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE CHANGEANT⁴⁵⁷

6.2.8.1 Positionnement du schème étudié dans l'espace du DHRM et classes impactées

Cette dernière *étude externaliste* se déroule sur une temporalité allongée. Tout comme la première *étude externaliste* réalisée en début de ce chapitre 6 sur les usages passé et présent du sel, il s'agit ici de valider le **contexte socio-économique** à un niveau macroscopique selon une **typologie structurante architecturale**.

L'analyse permet d'expliquer les deux extremums du PLC de l'entreprise BERTRAND : naissance et déclin. Elle statue également sur les **usages** courants des **hommes** et des systèmes de production de **l'objet technique** qui évoluent avec leurs contextes : **contexte organisationnel** et **socio-économique** sont intimement liés et évoluent conjointement.

Dès lors, *l'aspect externaliste* de **l'objet technique ancien** enrichit son statut de **Dossier d'œuvre patrimonial technique**. Le **schème** final est complet et validé : c'est le **schème rationnel**.

⁴⁵⁶ Source : [BURON 2004]

⁴⁵⁷ Source : [BURON 2002]

Remarquons que ce nouveau **schème** possède une de ses multi-temporalités dirigée par une de ses multi-dimensions : le **contexte socio-économique**. La temporalité s'arrête à t_0 . Le **DHRM** est défini comme illustré par la figure 187.

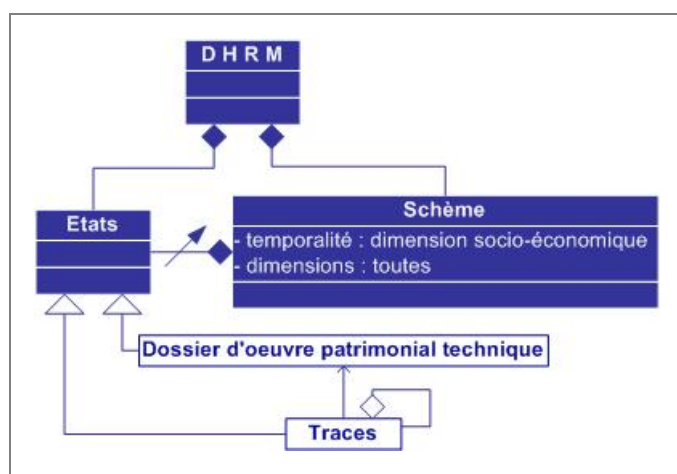


Figure 187 : CAS D'ETUDE DE BATZ-SUR-MER - DIAGRAMME DE CLASSES INTERMEDIAIRE DU DHRM - LE SEL EN BRETAGNE : UN CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE CHANGEANT

6.2.8.2 L'après révolution française : des conséquences difficiles sur la première moitié du 19^{ème} siècle

Malgré la diversité des sels et de leurs cultures pouvant laisser penser à une croissance permanente, au lendemain de la REVOLUTION FRANÇAISE, plusieurs évènements majeurs vont venir perturber ce système socio-technique ancré depuis des millénaires. Afin de restreindre le champ d'investigation, on s'intéresse ici plus particulièrement au récolement du sel au nord de la LOIRE, dans la zone bretonne.

L'instauration de l'impôt sur le sel en 1806 impose l'acquittement d'une taxe de douane intérieure afin de pouvoir spéculer en exportation hors de la zone franche de production. Dès lors, les paludiers perdent la possibilité de troquer le sel contre des grains et se voient dans l'obligation de s'orienter vers une nouvelle forme d'économie de marché. C'est un changement d'usage difficile à intégrer qui se transforme peu à peu en un blocus commercial.

Mais, en 1840, est votée la loi pour la liberté de commerce des sels. Elle a pour conséquence directe la vente des salines royales jusqu'alors gérées par l'état.

Et en 1848, une nouvelle loi instaure la réduction des droits d'importation sur les sels étrangers. La concurrence oblige alors l'activité salicole bretonne à reconvertir les salines les moins productives.

Ainsi, de nombreux paludiers changent de métiers. Ils choisissent le BTP⁴⁵⁸ en devenant tailleurs de pierres, maçons... entre autre suite aux chantiers locaux comme la construction des stations balnéaires de PORNICHET, du POULIGUEN, de LA BAULE ou du Casino du CROISIC ou encore le développement du port de SAINT-NAZAIRE.

Les salines sont délaissées au profit de la culture : élevage, pisciculture, anguilliculture ou culture de la pomme de terre qui est en train de prendre son essor⁴⁵⁹.

Cette reconversion s'observe surtout dans le MORBIHAN et le pays de RETZ. Ici, les sauniers viennent même à manquer de sel pour alimenter leur commerce et l'importent alors du pays guérandais. Fin 19^{ème} siècle, la production bretonne provient à 90 % des marais de GUERANDE.

De plus, pour faire face à ces décisions politiques et au changement d'usage nécessitant désormais un sel purifié pour être accepté des consommateurs, le NORD LOIRE se développe en intégrant le machinisme industriel. C'est ainsi que six établissements de raffinage s'installent dans les marais salants guérandais ; l'automatisation serait inspirée des salines ignigènes de LORRAINE.

Ainsi, paradoxalement au contexte socio-économique de l'époque, grâce aux machines, la culture du sel en BRETAGNE atteint alors son apogée peu avant le milieu du 19^{ème} siècle. La production se répartit comme suit :

- 1/3 dans le MORBIHAN,
- 2/3 dans la région de GUERANDE.

Le géographe Raymond Regrain qualifie les marais de Bretagne comme des manufactures de plein air.

6.2.8.3 Un déclin en chute libre

Les années 1860 sont marquées par de mauvaises récoltes et des tempêtes : les œillets sont quasi-tous en friches. Le gouvernement réplique en lançant une nouvelle enquête parlementaire ; c'est cette source principale qui nous a permis de statuer sur l'état de la production de sel en BRETAGNE jusqu'en 1865⁴⁶⁰.

De leurs côtés, les SALINES DE L'EST ET DU MIDI possèdent un domaine de vente très étendu grâce aux compagnies de chemin de fer qui desservent les bassins du RHIN et du RHONE.

⁴⁵⁸ BTP = Bâtiments et Travaux Publics

⁴⁵⁹ Sources : [CLEMENT 1987] et [FERY d'ESCLANDS 1891]

⁴⁶⁰ Une première enquête est menée en 1849 [ENQUETE 1851] puis une nouvelle enquête plus complète en 1865 et publiée en 1868-1869 [ENQUETE 1868].

Mais les producteurs bretons se contentent d'un marché localisé sur l'Ouest de la FRANCE : des côtes de la MANCHE, à AMIENS, à CLERMONT-FERRAND, à TULLE ou à MONT-DE-MARSAN. Exceptionnellement, le sel de l'Ouest parvient à CAEN, à ORLEANS ou à POITIERS⁴⁶¹.

Afin de traiter à puissance égale avec les autres salines françaises, la BRETAGNE se doit de se recentrer sur le marché intérieur. La distribution nationale vers les campagnes et les villes en sera augmentée grâce aux améliorations des voies routières et surtout, dès 1878, grâce au nouveau chemin de fer reliant PARIS au CROISIC.

Mais à la fin du 19^{ème} siècle, au vu du nombre d'incertitudes sur les conditions climatiques, les contraintes des taxes douanières ou le système de transport, plus aucun investisseur ne souhaite prendre de risque en acquérant ou en continuant son activité en BRETAGNE. Aussi, les paludiers de BATZ remédient à ce manque en s'improvisant eux-mêmes entrepreneurs. Ce sera le cas de Jean-Baptiste BERTRAND.

Ils assurent l'injection de capitaux familiaux et la poursuite de l'activité de négoce. Mais ces efforts ne suffisent pas pour redynamiser l'activité sur le plan national.

La première guerre mondiale entraîne un manque de main d'œuvre conséquent et amplifie la décroissance de la production en la faisant chuter de près de 25 %⁴⁶². Une deuxième vague de départ s'en suit également après la seconde guerre mondiale : les jeunes paludiers sont appelés à reconstruire la ville de ST NAZAIRE.

De même, vers 1945, afin de faire face à la lourde concurrence des marais salants du Midi, il est envisager de fusionner les groupes saliniers jusqu'alors indépendants des marais de GUERANDE. Ainsi, à partir de 1952, COBRASEL, société spécialisée dans le raffinage ouvre ses portes. Cependant, elle est très vite absorbée par la COMPAGNIE DES SALINS DU MIDI ET DE L'EST et se renomme CODISEL qui, à cette période, rachète la licence d'André BERTRAND.

De plus, vingt ans plus tard, suite au départ en retraite d'une centaine de paludiers, la BRETAGNE connaît sa plus forte chute d'activité et le nombre d'œillets en exploitation est divisé par deux. C'est ainsi que l'entreprise BERTRAND cesse son activité en 1966.

De même que, préférant un métier stable pour subvenir aux besoins de leurs familles, les paludiers changent d'orientation professionnelle : l'exode rural progresse. La moitié des œillets ne sont plus cultivés et la production baisse à nouveau de 30 % en 1975⁴⁶³.

Désormais, les sites du MORBIHAN sont tous fermés et la pérennité de la saliculture bretonne dépend uniquement de la zone guérandaise.

⁴⁶¹ Source : [AUDIGANNE 1869]

⁴⁶² Source : [Le HESRAN 1938]

⁴⁶³ Source : [TESSON & al 1975]

6.2.8.4 Une renaissance progressive : la Société Coopérative Agricole

Les paludiers de GUERANDE restant forment alors une petite communauté homogène, peu réceptive au changement du monde contemporain et ancrée dans un fort sentiment d'identité locale. Ils affichent des valeurs culturelles partagées prenant racines chez leurs ancêtres et dans une appartenance de type rurale que l'historien Gildas BURON détaille comme⁴⁶⁴ :

- une appartenance physique,
- un costume,
- un ancrage territorial et humain,
- une religion,
- une langue bretonne,
- des attitudes politiques et sociales.

La figure 188 est une carte postale non datée mais estimée vers 1900 montrant les enfants de BATZ-SUR-MER habitués dès leur plus jeune âge à porter le costume traditionnel.



Figure 188 : 20^{EME} SIECLE – COSTUMES D'ENFANTS A BATZ-SUR-MER⁴⁶⁵

Pour faire face à un déclin permanent, les paludiers doivent s'adapter. Afin de conserver l'image d'une production artisanale, ils se séparent du grossiste des Salins du Midi pour que leur sel n'intègre pas la famille de la grande distribution. Livrés à eux-mêmes, ils vont tout

⁴⁶⁴ Source : [BURON 2002]

⁴⁶⁵ Source : Archives des Marais Salants de Batz-sur-Mer : *Batz – Costumes d'enfants – LL.*, carte postale, n.d., ~1900

d'abord sectoriser leur activité salicole en distinguant :

1. la production,
2. la distribution,
3. la vente.

En 1972, l'ensemble des paludiers fonde une première structure dénommée GROUPEMENT DES PRODUCTEURS DE SEL. En 1988, elle prend le statut de SOCIETE COOPERATIVE AGRICOLE. C'est alors toute une stratégie communicationnelle qui est mise en place à partir de 1987 pour promouvoir l'image de l'authenticité du sel de GUERANDE. Après une première tentative 29 ans plus tôt, les efforts de la SCA⁴⁶⁶ aboutissent en 1991 à l'obtention d'un label Rouge des sels marins atlantiques affichant ainsi une norme de qualité des produits du terroir.

Mais les exploitations ferment tout de même les unes après les autres. En 1995, il ne reste plus que 6000 œillets en production soit une nouvelle baisse de 40 % par rapport à 1975.

Enfin, en 2001, la stratégie globale de la SCA porte ses fruits et une filière commerciale est créée. La filiale possède un atelier et des bureaux dans lequel cinquante salariés assurent l'aspect administratif et commercial. Du gros matériel onéreux est acheté en commun assurant ainsi une activité pérenne à 163 producteurs.

La performance technologique est désormais recherchée. Les conduits d'eau en bois sont remplacés par des tuyaux en PVC. Le gros œuvre est réalisé par des engins de chantiers. Et c'est surtout l'ensemble des exploitations qui sont assistées de machineries et de moyens modernes : les bêches utilisées pour le labour des sols sont remplacées par des motoculteurs, la tenue traditionnelle est abandonnée au profit des habits et protections en caoutchouc...

Cette mécanisation du travail et l'arrivée de nouveaux paludiers⁴⁶⁷ relance l'engouement de la culture saline : les anciennes exploitations sont reconquises. En 2002, on compte près de 270 paludiers exploitant près de 8600 œillets, soit une hausse de près de 45 % par rapport à 1995⁴⁶⁸.

⁴⁶⁶ SCA = SOCIETE COOPERATIVE AGRICOLE

⁴⁶⁷ Créé en 1979, le centre de formation à la profession salicole est un organisme reconnu par le Ministère de l'Agriculture.

⁴⁶⁸ Sources : Chiffres publiés dans *Traits d'Union... Le bulletin de la filière Sel de Guérande*, Guérande, Salines de Guérande, n°213, avril 2002, p. 7

La figure 189 montre l'évolution du nombre d'œillets en exploitation dans l'Ouest de la FRANCE de 1840 à 2002.

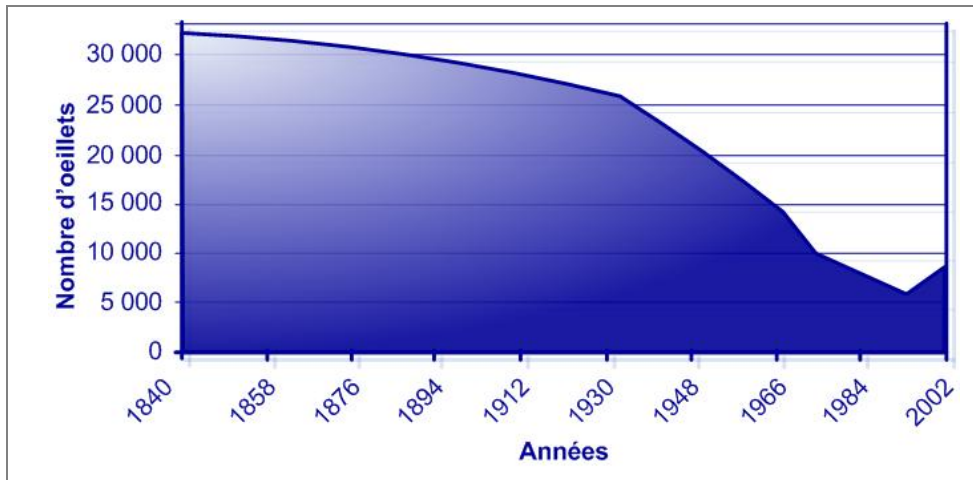


Figure 189 : EVOLUTION DU NOMBRE D'ŒILLETS EN EXPLOITATION DE 1840 A 2002 DANS L'OUEST DE LA FRANCE

6.2.9 BILAN D'UTILISATION DU DHRM ET SCHEME RATIONNEL DE LA MACHINE ETUDIEE

L'étude industrielle patrimoniale menée en fouille archéologique a permis de démontrer que le modèle **DHRM** est instanciable. La méthodologie *d'archéologie industrielle avancée* souligne l'intérêt d'une interaction entre **l'objet** et son **contexte** afin d'affiner les *études internalistes* en intégrant les connaissances externes. La démarche suivie dans cet exemple illustre cet effet d'entonnoir où un dézoom progressif est effectué dans la compréhension de l'objet où l'aboutissement est sa définition dans son ST⁴⁶⁹ global.

Une étude classique aurait uniquement concentré les recherches sur la machine à laver le sel ou aurait introduit une dichotomie dans les usages internalistes et externalistes. Or, nous avons ici utilisé un **schème** multi-dimensionnel et multi-temporel permettant de décliner la classe **objet** en deux aspects principaux :

- Un produit : le sel
- Un processus : la récolte et le traitement du sel.

Cette étude suggère de nombreuses questions demandant des compléments nécessaires comme les systèmes de transport de marchandises aux 19^{ème} et 20^{ème} siècles que nous n'avons qu'entre-aperçus ici. Ultérieurement, d'autres ST parallèles se doivent également d'être étudiés : c'est le cas de l'énergie avec le rôle du réseau de gaz de l'usine de la BAULE, le développement du tourisme par les stations balnéaires de l'Ouest...

⁴⁶⁹ ST = Système Technique

Nous pouvons désormais valider le **schème rationnel** orienté du produit et du processus de **l'objet technique ancien** orienté selon sa **typologie structurante** :

Afin de répondre à la demande hygiéniste d'une clientèle du 19^{ème} siècle toujours plus exigeante et pour faire face à une concurrence toujours plus rude, les négociants guérandais ont dû raffiner le sel. Tous les entrepreneurs locaux ont fabriqué une laverie dont la machinerie tient plus de l'invention personnelle que d'une technologie de pointe. Occupant une vingtaine de mètres carrés, la laverie BERTRAND est constituée de bois et de métal ; elle est actuellement dans un état de dégradation très avancé. Elle a fonctionné de 1914 à 1966, année de fermeture de l'entreprise.

De la vingtaine de laveries qui a existée aux marais salants de BATZ-SUR-MER, il n'en subsiste plus qu'une seule : celle préservée dans les magasins BERTRAND. Les enquêtes réalisées par les conservateurs du Musée montrent qu'en 1941 seulement deux laveries étaient encore en fonctionnement (figure 190).

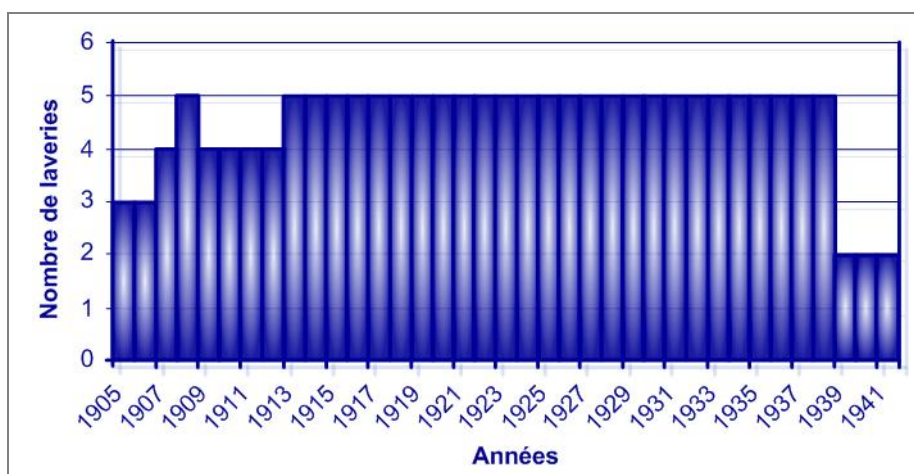


Figure 190 : 1905-1941 EVOLUTION DU NOMBRE DE LAVERIES EN ACTIVITE A BATZ SUR MER⁴⁷⁰

La *valeur exceptionnelle* du site des Magasins de la CROIX DE PAIX est désormais incontournable et *l'authenticité* de la machine industrielle est prouvée. Cependant, de nouveaux éléments récents amènent une réflexion sur l'intérêt porté à la fabrication et à l'usage de cet objet ainsi qu'à la raison ayant mené à son déclin. Lors de nos récentes fouilles, nous avons rencontré quelques paludiers en activité.

En 2007, deux grosses structures gèrent la production du sel à BATZ-SUR-MER : la SCA et l'entreprise BOURDIC⁴⁷¹. Cependant, il convient d'ajouter quelques 40 paludiers indépendants. Généralement, chaque petite société compte uniquement sur sa famille parmi ses employés ; mais, en fonction des récoltes, elle embauche un ou deux journaliers.

⁴⁷⁰ Source : [BURON 2004]

⁴⁷¹ <http://www.lepaludier.com>

Malheureusement, cette année 2007 n'a pas été aussi fructueuse que 2003 suite à une pluviométrie élevée. Le coût du sel de GUERANDE a donc une forte probabilité d'augmenter considérablement en 2008. Et pourtant, le sel est déjà fort cher ! Avec un prix moyen de 9 € le kilo de fleur de sel en FRANCE, après exportation, il se vend environ 53 € le kilo au CANADA.

De plus, le sel n'est plus traité chez ces producteurs indépendants. De nos jours, le sel gris chargé en argile trouve preneur chez de nombreux consommateurs et des dérivés sont même produits. C'est le cas du sel aromatisé pour lequel on mélange du sel gris avec des épices : les anglais l'apprécient particulièrement.

Un échange que nous avons eu sur ces faits avec Gildas BURON, conservateur du Musée des Marais Salants de BATZ-SUR-MER, nous amène à formuler l'hypothèse suivante :

Partant du constat que le sel n'est plus traité de nos jours, l'arrêt des machines à laver le sel comme celle de l'entreprise BERTRAND ne traduirait-elle pas un échec de la tentative d'industrialisation de techniques ancestrales et artisanales ?

6.3 ENRICHISSEMENT DU DHRM PAR L'APPORT DE LA NUMERISATION 3D

6.3.1 LE CONTEXTE DE LA NUMERISATION 3D DES OBJETS PATRIMONIAUX

Le **DHRM** propose de cerner les *aspects externalistes* et *internalistes* selon l'axe temporel de déroulement du *processus de patrimonialisation*. Cependant, l'étude menée ci-avant a conduit à un **schème rationnel** à vocation principalement historique. En effet, les questions relatives à la capacité de production de la machine restent actuellement en suspens.

La raison de ces inconnues provient de **l'état** bien trop dégradé de **l'objet** à étudier et pour lequel seules des **bribes** demeurent. Jusqu'alors, de nombreuses hypothèses mécaniques alimentent les *études internalistes* et *externalistes*. Pour relier définitivement les connaissances externes produites avec les connaissances internes de l'objet, nous devons caractériser les **bribes**.

Durant la première phase de patrimonialisation de la machine à laver de BATZ-SUR-MER, une numérisation 3D globale a été effectuée. Mais comment justifier cette action ? Etait-ce réellement nécessaire ? La précision apportée par les relevés numériques était-elle suffisante ?

6.3.2 CARACTERISATION DES BRIBES DES VESTIGES ARCHEOLOGIQUES

Dans le chapitre 3 de ce manuscrit, nous avons établi un état de l'art des différentes solutions technologiques existantes sur le marché pour numériser un objet en trois dimensions. Les outils sont nombreux mais leur champ d'investigation est limité par les caractéristiques intrinsèques de ces matériels. Le tableau récapitulatif de la partie 3.3.2.4 statue sur un classement général en fonction de plusieurs variables.

Mais l'utilisation de la numérisation 3D sur les objets patrimoniaux pose des questions supplémentaires par rapport à une utilisation industrielle. Elle nécessite un choix judicieux de l'outil pour ne pas détériorer les **bribes** de **l'objet technique ancien**. En effet, il convient également de prendre en compte l'état de dégradation de l'objet, les choix des conservateurs quant à sa sauvegarde, l'état d'avancement de l'étude patrimoniale...

Aussi, afin de prendre en compte les caractéristiques des **bribes**, nous avons mis en place un arbre décisionnel [BERNARD & al 2007b]. Il permet de déterminer les outils de numérisation qu'il est possible ou non d'utiliser. Il se base sur :

- la mise en corrélation des *facteurs opérationnels* de la technologie avec l'état des **bribes** de l'objet à numériser,
- les *données issues des caractéristiques intrinsèques* des **vestiges** archéologiques.

6.3.3 CRITERES DE NUMERISATION 3D ET ARBRE DECISIONNEL

Les *facteurs opérationnels* résultant de la technologie à utiliser sont :

- La *pertinence d'une mesure par numérisation*. Est-il nécessaire de numériser les **vestiges** dans leur intégralité ? Des **outils** de mesure manuels ne suffiraient-ils pas ? Par exemple, dans le cas d'une grue de chantier, les fermes étant toutes identiques, seule l'enveloppe globale de l'objet est requise en complément à la mesure détaillée d'une seule ferme.
- *L'état de dégradation* de l'objet et donc la présence d'un objet complet/incomplet. Si seules quelques **bribes** demeurent ou si **l'objet** n'existe pas ou plus, il sera nécessaire d'apporter un complément de **traces** par des **sources** externes. C'est le critère de connaissance du **contexte**.
- Est-il possible de *toucher* les **bribes**, de les *palper* ?
- Est-il possible de *déplacer* les **vestiges** ?
- L'exposition des **vestiges** à un *rayonnement* est-elle autorisée ? En effet, certaines techniques utilisent des radiations pour numériser l'objet. Pour que la mesure ne doit pas être destructive, il faut préciser la longueur d'onde autorisée : infra-rouge, visible, UVs, rayons X...

Les *données initiales* issues des caractéristiques de l'objet sont :

- La définition des **matériaux** utilisés dans la **structure** de **l'objet**.
- *L'accessibilité*. Il faut parfois effectuer des mesures à des endroits peu accessibles, voire même à l'intérieur de l'objet.
- La *taille*, l'encombrement de l'objet et le *volume* devant être numérisés.
- Le choix de numériser la *cinématique*. Actuellement seulement disponible en 2D⁴⁷², il convient tout de même de s'interroger sur la possibilité de numériser l'objet en fonctionnement pour en récupérer sa dynamique.
- Le *temps d'acquisition* disponible. Si une précision élevée est demandée, elle requiert une grande quantité de points de mesure : certaines méthodes sont alors à proscrire.⁴⁷³
- La *précision*. Il s'agit d'un compromis avec le critère du temps d'acquisition. Aller vers l'infiniment grand ou l'infiniment petit est faisable mais est-ce bien nécessaire ? Le but recherché est-il d'être aussi exhaustif que possible ? Certaines hypothèses sur le niveau de détails souhaité impactent directement le choix de la technologie de numérisation.
- Objet *artisanal* ou objet *industriel*.

Le dernier critère est une question récurrente que nous retrouvons depuis le chapitre 2 de ce manuscrit. Le fait est qu'un objet artisanal implique parfois la nécessité de prendre en

⁴⁷² Voir partie 3.3.3.2

⁴⁷³ On notera que ce critère de temps d'acquisition disponible sous-entend également une question de coût de la numérisation.

compte plus de points. Exemple : pour une surface apparemment plane, 3 points sont-ils nécessaires ou souhaite-t-on récupérer la surface réelle avec ses défauts ? Le traitement détaillé d'une surface peut pourtant être riche d'enseignements [GORDON & al 1994]. Ainsi, il faudra définir la temporalité du cycle de vie⁴⁷⁴ du **schème** à considérer pour la phase *d'archéologie industrielle avancée* : t_{inex} , t_{fab} ...

Par exemple, dans le cas d'une vis à tête hexagonale centenaire et ayant été vissée-déviscée de nombreuses fois, l'hexagone n'est plus régulier et le filetage est poli. L'acier s'étant déformé avec le temps, les dimensions originelles sont parfois difficiles à retrouver. En annexe 29 figure cet objet que nous avons numérisé en trois dimensions afin de le reconstruire. Pour valider la reconstruction sous CATIA V5, la vis a été ensuite imprimée en 3D à l'aide d'une machine de prototypage rapide. Malheureusement, au bilan, il s'avère que cet objet ne répond pas à la norme ISO 4014 ou DIN 931 pour les vis THPF⁴⁷⁵ démontrant que la réglementation a évolué par rapport aux productions réalisées il y a cent ans ou que la vis en question a été déformée.

Malgré tout, la numérisation 3D peut apporter des réponses comme dans la recherche de l'authenticité d'un objet patrimonial. Particulièrement utile dans le domaine artistique, une étude comparative a été menée sur deux statues d'Edgar DEGAS que nous avons numérisées afin de valider leurs conformités⁴⁷⁶ (voir annexe 30⁴⁷⁷).

Ainsi, pour aider dans le choix de la technologie de numérisation 3D optimum, un arbre de décision a été mis en place (figure 191). Tous les appareils de numérisation détaillés dans la partie 3.3.2 ne sont pas présents ; seules les principales solutions technologiques sont présentes pour éviter les redondances.

Les losanges correspondent aux questions à se poser et les ovales aux solutions technologiques. La méthode à laquelle aboutit ce raisonnement n'est pas forcément la seule possibilité mais c'est sûrement la *best practice*⁴⁷⁸. Si une autre stratégie est choisie, cela se traduira par une perte d'argent, de précision, d'efficacité ou de vitesse d'acquisition. [MOUCHARD & al 2006]

⁴⁷⁴ Voir partie 6.1.2.2

⁴⁷⁵ THPF = Vis à Tête Hexagonale Partiellement Filetée

⁴⁷⁶ Etude menée en partenariat avec le Musée d'ORSAY et la RMN (REUNION des MUSEES NATIONAUX de FRANCE).

⁴⁷⁷ Poster réalisé dans le cadre du concours HANDYSCAN 3D de la société CREAFORM.

⁴⁷⁸ Voir partie 1.3.3

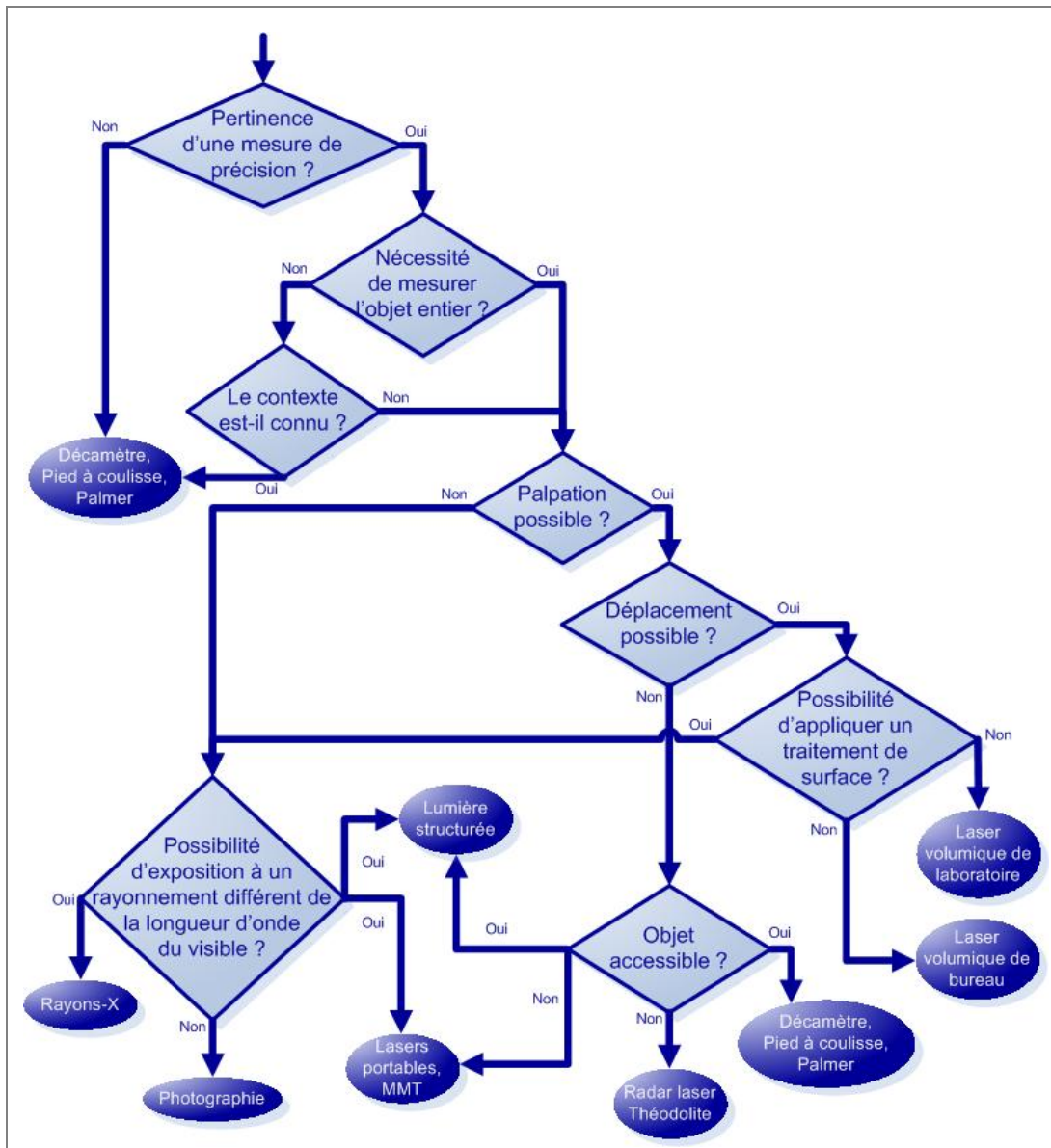


Figure 191 : ARBRE DECISIONNEL POUR LE CHOIX DE LA SOLUTION DE NUMERISATION 3D

6.3.4 POSITIONNEMENT ET ENRICHISSEMENT DU DHRM

Grâce à l'introduction de la numérisation 3D, le **DHRM** devient plus complexe. Le *processus d'archéologie industrielle avancée* nécessite alors de manipuler plusieurs **schèmes** en même temps. Ces derniers sont à multi-temporalités et multi-dimensions.

La figure 192 est une nouvelle vue partielle du **DHRM** à appliquer pour une numérisation 3D. La numérisation 3D mentionnée par la classe **outils** et la classe **brèves / vestiges** est également introduite dans *l'aspect internaliste de l'objet technique ancien*.

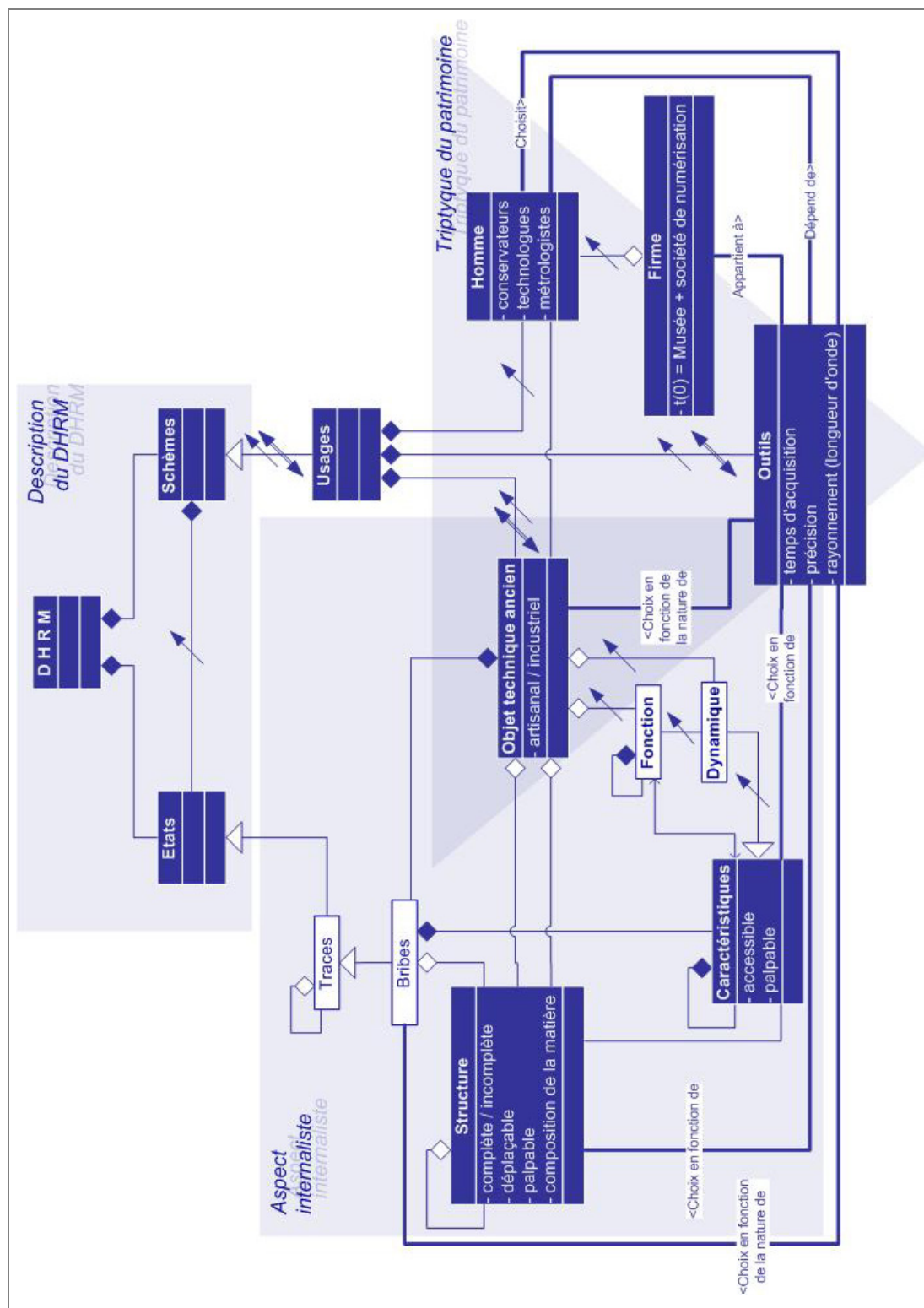


Figure 192 : VUE PARTIELLE DU DHRM POUR LA NUMERISATION 3D D'OBJETS TECHNIQUES PATRIMONIAUX

Les *facteurs opérationnels* de la technologie ainsi que les *données issues des caractéristiques intrinsèques* des *vestiges* archéologiques alimentent les *attributs* de l'ensemble des classes d'équivalence. Les choix à effectuer par les critères détaillés ci-avant sont représentés par des flèches simples mises en exergue ici par un trait plus épais afin de les distinguer du système d'information défini au chapitre 5.

Cette ontologie utilise une partie des concepts développés dans ce manuscrit :

- La strate supérieure du **DHRM** est présente en haut du graphique avec **l'état** de l'objet et **l'usage** associé ici : la phase *d'archéologie industrielle avancée*.
- Le triptyque du patrimoine est lui aussi mis en exergue sur la droite du graphique grâce aux classe d'équivalence **homme**, **outils** et **objet technique ancien**.

Les conditions de la numérisation 3D viennent alimenter *l'aspect internaliste* de **l'objet**.

6.4 CAS D'APPLICATION DE NUMERISATION 3D ET ETUDE MECANIQUE APPROFONDIE : LA MACHINE A LAVER LE SEL DE BATZ-SUR-MER

Afin de valider l'applicabilité de l'arbre décisionnel permettant le choix de la numérisation 3D, nous allons tout d'abord vérifier que celui-ci est en adéquation avec le premier relevé laser effectué sur l'ensemble de la machine à laver le sel de BATZ-SUR-MER.

Dans un deuxième temps, nous allons affiner l'étude mécanique en corrélant :

- les flux de production de l'entreprise émanant des *études externalistes*,
- avec la capacité de lavage de la machine déterminée à l'aide de l'utilisation de la numérisation 3D localisée.

En effet, de nombreuses hypothèses ont été formalisées au niveau de la **typologie structurante externaliste** de **l'objet technique ancien**. Le choix effectué quant à **l'outil** de numérisation 3D et son application sur **l'objet** peut avoir un impact direct sur la qualité des *études internalistes* et *externalistes* réalisées. Ainsi, nous terminerons ce chapitre par un affinage de *l'étude internaliste* a posteriori pour valider le **schème rationnel**.

6.4.1 NUMERISATION 3D DE LA LAVERIE DANS SON INTEGRALITE

L'objectif des conservateurs du Musée des marais salants étant de réaliser une photographie 3D de l'objet afin de le conserver virtuellement en l'état, les critères de l'arbre décisionnel établi précédemment en 6.3.3 sont renseignés dans les tableaux de la figure 193 [LAROUCHE & al 2007d].

La solution retenue est celle des machines à mesurer tridimensionnelles portables et de gros volumes plus communément appelées théodolites laser dans le domaine architectural. L'arbre décisionnel est donc applicable ici.

La société MOREL MAPPING WORKSHOP réalisa cette opération en 2004. 25 points de vues différents ont été nécessaires au scanner LEICA Cyrax 2500. La précision du nuage de points est de 0.3 cm pour 10 039 374 points numérisés.

Données intrinsèques à l'objet		Facteurs opérationnels	
Définition des matériaux ?	Non réfléchissants mais conditions extrêmes	Pertinence de la mesure / état de dégradation ?	Capitale pour immortaliser précisément l'objet étant donné que celui-ci se détériore de jour en jour
Accessibilité ?	Certains composants sont à l'intérieur de la machine et des murs/poteaux interdisent certains points de vue	Objet complet / incomplet ?	Incomplet
Taille / volume ?	Environ 120 m ³	Palpage ?	Impossible
Numérisation de la cinématique ?	Non car la machine ne peut plus fonctionner	Déplacement ?	Impossible
Temps d'acquisition disponible ?	Non limité mais la numérisation doit se faire sans tarder car l'objet se dégrade rapidement	Exposition à un rayonnement ?	Oui si ne détruit pas le bois déjà très abîmé
Précision ?	Liée avec le critère suivant (objet artisanal / industriel)		
Objet artisanal / industriel ?	Artisanal, donc impossibilité de faire des copier/coller, l'objet doit être numérisé dans son intégralité		

Figure 193 : CRITERES DE VALIDATION DE LA TECHNOLOGIE DE NUMERISATION 3D A UTILISER POUR L'INTEGRALITE DE LA MACHINE A SEL DE BATZ-SUR-MER⁴⁷⁹

6.4.2 NUMERISATION 3D DE DETAILS DE COMPOSANTS DE LA LAVERIE

Certains composants essentiels au fonctionnement de la machine n'ont pu être numérisés par le scanner LEICA :

- les *pales* des *vis sans fin* des trois *bacs* car intérieures à la machine,
- la partie alimentation de la production : les *maillons* et les *godets*.

Ces deux derniers éléments sont actuellement dans un état de dégradation très avancé. La *chaîne à godets* n'existe presque plus car trop attaquée par le sel. De plus, elle n'est plus suspendue et ses composants sont tombés au fond du *puits*.

Les **caractéristiques géométriques** et **structurelles** de ces éléments sont pourtant capitales dans la détermination de la capacité de production de la laverie :

- la longueur des *maillons* ainsi que la longueur totale de la *chaîne*,
- le nombre de *godets* et leur capacité unitaire.

Il convient donc de changer la **typologie structurante** de **l'objet technique ancien** pour passer à un niveau plus fin. **L'infrastructure** devient alors **architecture** et le nouveau niveau **infrastructural** permet de définir les détails de conception de ces nouveaux **objets**.

Les **brèves** contenues au fond du *puits* forment un amas de matière rouillée que nous avons fouillé. Impossible à mesurer avec les outils modernes car auraient trop détérioré un

⁴⁷⁹ Remarque : on entend ici par conditions extrêmes le fait que l'objet est dans une atmosphère humide, salée et non aérée.

objet déjà très passablement endommagé, ces nouvelles investigations ont été menées grâce à la *numérisation 3D*.

L'arbre décisionnel est à nouveau déroulé selon les critères des tableaux de la figure 194.

Données intrinsèques à l'objet		Facteurs opérationnels	
Définition des matériaux ?	Non réfléchissants mais conditions extrêmes	Pertinence de la mesure / état de dégradation ?	Nécessaire pour obtenir le dimensionnement exact
Accessibilité ?	Certains composants sont à l'intérieur de la machine mais peuvent être déplacés	Objet complet / incomplet ?	Usé ou détérioré
Taille / volume ?	Volume de numérisation maximum = cube de 200 mm de côté	Palpage ?	Impossible
Numérisation de la cinématique ?	Non car pièce unitaire	Déplacement ?	Oui si non destructif
Temps d'acquisition disponible ?	Non limité mais la numérisation doit se faire sans tarder car l'objet se dégrade rapidement	Exposition à un rayonnement ?	Possible si reste dans un lieu au même taux d'humidité
Précision ?	La plus fine possible pour obtenir le dimensionnement géométrique exact		
Objet artisanal / industriel ?	Artisanal dans le cas des pales et industriel pour les maillons+godets		

Figure 194 : CRITERES DE VALIDATION DE LA TECHNOLOGIE DE NUMERISATION 3D A UTILISER POUR LES COMPOSANTS DE DETAIL DE LA MACHINE A SEL DE BATZ-SUR-MER

Pour effectuer cette numérisation 3D précise, une contrainte essentielle a également réduit le champ des outils utilisables : les pièces ne peuvent être sorties de leur atmosphère sursaturée en humidité. Le choc induit par un changement hydrométrique aurait été tel que les composants se seraient détériorés encore plus rapidement. Aussi, nous avons choisi de numériser les pièces dans des conditions optimales pour leur conservation mais *extrêmes* pour le capteur 3D. La solution de type portable utilisée pour effectuer un relevé plus précis est le HANDYSCAN de la société CREAFORM⁴⁸⁰.

Comme vu précédemment lors de l'étude de terrain, les *pales* sont fabriquées artisanalement sur place. Nous avons donc numérisé l'une d'entre elles encore rangée dans le meuble du bâtiment A0. Celle-ci n'a pas été utilisée et a ainsi permis d'obtenir son dimensionnement théorique réel.

Sur la figure 195, il est possible de distinguer les traits de scie capturés par le HANDYSCAN. Le fichier numérique est constitué d'un maillage de 112 815 points.

⁴⁸⁰ Voir partie 3.3.2.4

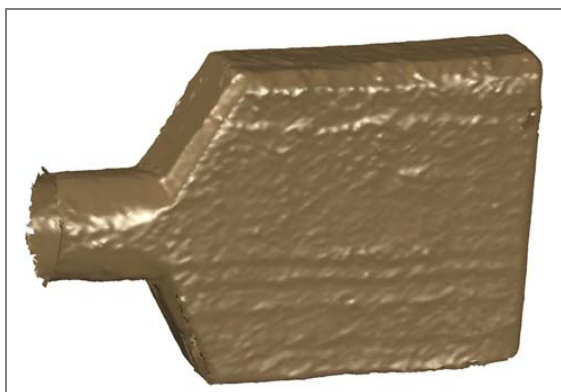


Figure 195 : NUAGE DE POINTS, PALE DE VIS SANS FIN

Les *maillons* étant complètement rouillés (figure 196) et plus aucun *godet* n'existant en entier, la numérisation 3D a permis d'en obtenir plusieurs représentations virtuelles (figure 197). Par itération moyennée sur l'ensemble des scans, les dimensions génériques ont pu ainsi être déterminées. Nous avons ensuite comparé ces informations avec les données du catalogue fournisseur EWART de 1893 [BURTON 1893]. Il s'agit d'un *élévateur vertical* avec *tendeurs* dans le puits pour régler la tension de la *chaîne*. Il est composé de *maillons* à attache rapide auxquels il convient également d'ajouter des *maillons* spéciaux avec deux oreilles pour raccorder les *godets*. Bien que le document utilisé soit un catalogue, nous joignons en annexe 31 un extrait de cette archive pour souligner sa grande précision technique.

Au bilan :

- Les *godets* emboutis de type 4N sont ordinairement préconisés pour la farine mais les propriétés de la solution traitée étant proches de celles des poudres, il semble logique de les utiliser ici. La capacité volumique moyenne d'un *godet* est de 1.5 litres. Dans le cas des *godets* de type 4, le fabricant BURTON propose de renforcer la matière de 10 % ; l'épaisseur des *vestiges* des *godets* de la laverie confirme que cette mesure a du être prise en compte dans le cas de BATZ-SUR-MER.
- Les *maillons* EWART pour accrocher les *godets* sont de type K1 et les *maillons* standard sont de type 78. La distance de raccordement d'un *maillon* est de 66.6 mm aux entraxes. La plage de fonctionnement idéal est de 36 Newtons avec une limite élastique de 90 Newtons et une résistance à la rupture inférieure à 180 Newtons.



Figure 196 : PHOTO, DEUX MAILLONS A ATTACHE RAPIDE EWART



Figure 197 : PHOTO, MAILLON A OREILLE : REEL ET NUAGE DE POINTS

6.4.3 ETUDE MECANIQUE INTERNALISTE APPROFONDIE DE LA CAPACITE DE PRODUCTION DE L'ENTREPRISE BERTRAND

A l'aide de la numérisation 3D et de la corrélation avec les **sources** historiques, ces nouvelles données sont à implémenter dans l'étude mécanique. Ces études de détails permettent ainsi d'affiner le **DHRM**.

Analysons tout d'abord les éléments liés à la fourniture de la force motrice : les *moteurs*. Ensuite, nous calculerons le débit de sel à l'entrée de la machine (*godets*) puis dans la *trémie*, dans les *bacs* et enfin dans la *gouttière finale*.

Malgré que ces calculs soient relativement classiques, des schémas cinématiques et des diagrammes de flux sont détaillés dans l'annexe 32.

6.4.3.1 Le moteur et l'arbre principal

Rappelons que deux types d'énergie se sont succédés pour fournir la force mécanique :

1. un moteur supposé être alimenté en gaz,
2. un moteur utilisant l'électricité⁴⁸¹.

Le *moteur* électrique est alimenté en courant alternatif 220 V triphasé mais sans distribution du neutre. Sur le rotor, du côté opposé à l'engrainement, trois fils sont reliés aux charbons et connectés à un réservoir relié à la masse. Il pourrait s'agir d'un composant de démarreur étoile-triangle.

En amont de son alimentation électrique, le *moteur* possède un *disjoncteur* DMT C 40 protégé fabriqué par la TELEMECANIQUE ELECTRIQUE à NANTERRE (92). L'état fort peu dégradé de cet appareil électrique indique qu'il a probablement été installé en fin de vie de la laverie,

⁴⁸¹ Voir partie 6.2.3.3

vers 1960. Considérant l'installation électrique réalisée dans le bâtiment A, le tableau prescrit par le constructeur indique que la puissance disponible est de 13 chevaux.

Fonctionnant sous 50 Hz, le *moteur* tourne à la vitesse de 3000 tr/min. Le rapport de démultiplication entre *l'arbre du moteur électrique* et *la poulie de l'arbre principal* est de 8.1. *L'arbre principal* tourne donc à une vitesse estimée à 370 tr/min. Or, le rapport de démultiplication entre le *moteur à gaz* et *l'arbre principal* est de 2.7, le *moteur d'origine* devait donc tourner à environ 1000 tr/min.

6.4.3.2 La chaîne à godets et la première gouttière

Avec une longueur totale de *chaîne* de 8.6 mètres et un entraxe des *maillons* déterminé précédemment de 66.6 mm, environ 129 maillons composent la *chaîne*. Or un *godet* est inséré en moyenne tous les 6 *maillons*, il y a donc 22 *godets*. La capacité d'un *godet* étant de 1.5 litre, 33 litres sont transférés du *puits* à la *gouttière* en 1 tour.

Sachant que *l'arbre principal* tourne à la vitesse de 370 tr/min et que le rapport de démultiplication entre *l'arbre principal* et l'axe de la *chaîne à godets* est de 1/1 à 3 % près, la *chaîne* tourne également à une vitesse de 370 tr/min. Le débit de la *chaîne à godets* est donc de $12 \text{ m}^3/\text{min}$ ⁴⁸². Cette donnée paraît disproportionnée ; nous reviendrons sur sa validité à l'issue du bilan de nos calculs.

Vérifions qu'il n'y a pas de débordement à la *gouttière*.

Avec une inclinaison de 16° de la *gouttière* par rapport à l'horizontale, la hauteur de chute est de 882 mm. En prenant seulement en compte la gravité, la vitesse de chute est de 4.16 m/s ⁴⁸³. Or il convient de réappliquer le coefficient de la pente : la loi de composition des vitesses donne une vitesse de 16 m/s dans la *gouttière*. Avec une section de 200 cm², le débit maximum du liquide sans déborder de la *gouttière* est de $19.2 \text{ m}^3/\text{min}$ ce qui est suffisant pour supporter le flux provenant de la *chaîne* d'alimentation en solution.

6.4.3.3 La trémie

Vérifions maintenant que ce débit de la *chaîne à godets* est réaliste par rapport à la quantité de solution saline supportée par la *trémie*.

En prenant comme hypothèse que seule la gravité intervient dans cette opération, le liquide ne fait que tomber à travers la *trémie* pour atteindre le premier bac. Il passe entre les *rouleaux*, dans une section de 1 mm de large par 484 mm de long. En admettant que le *bac* soit quasi-plein, la hauteur de chute du liquide depuis la *gouttière* est de 530 mm soit une

⁴⁸² Débit = (volume / tour) x (nb de trs / min)

⁴⁸³ (Vitesse)² = 2 x hauteur x gravité (9.81 m/s²)

vitesse de chute équivalente de 3.2 m/s. Le débit de la *trémie* serait donc de 0.09 m³/s ce qui est insuffisant pour absorber les flux de la *chaîne à godets*.

Nous pouvons donc en déduire que les deux *rouleaux* n'assurent pas que la simple fonction de concasser les gros cristaux de sel : ils permettent également de faire avancer la solution. Sachant que le rapport de démultiplication des poulies depuis *l'arbre principal* est de 1/1 et que le rayon des *rouleaux* est de 89 mm, la vitesse linéaire est de 1.5 mm/min⁴⁸⁴. Malgré que la *trémie* soit pourvue de deux *rouleaux*, les vitesses ne sont pas cumulatives. Le débit maximal de la *trémie* est donc de 1.6 m³/min, ce qui est raisonnable mais faible par rapport au débit de la *chaîne à godets* qui fonctionne 7.5 fois plus vite. Cela démontre que la *trémie* devait rapidement dégorger. Ne pouvant modifier indépendamment les vitesses de la *chaîne* et de la *trémie*, nous pouvons émettre l'hypothèse que la machine n'était pas alimentée en permanence ou que les *godets* n'étaient pas remplis à leur capacité maximale. Les prochains calculs de débit vont permettre d'affiner cette hypothèse.

6.4.3.4 Les bacs

De plus, un autre goulot d'étranglement du système de production intervient au niveau des trois *bacs à laver*. En effet, même si le débit des *bacs* est proche de celui de la *trémie*, un apport de saumure permanent par le *système de canalisation* aérien surcharge l'intégralité du système de lavage.

A l'intérieur des *bacs*, la solution est brassée par des pales inclinées à 135° par rapport à l'axe des *bacs*. Les *pales* numérisées mesurent 100 mm de large. En négligeant l'épaisseur, le pas des *pales* est donc de 140 mm⁴⁸⁵.

Les *pales*, distribuées de façon aléatoire, prouvent qu'il s'agit bien d'une machine artisanale. Le calcul du débit peut donc se restreindre à une seule *pale*. La distance de l'extrémité des *pales* depuis *l'axe de l'arbre* est de 210 mm et le rayon de *l'arbre* est de 85 mm. Le volume balayé par une *pale* en un tour est donc le produit du pas par la section extérieure maximale à laquelle il faut soustraire la section de l'arbre : soit 8 litres / tr⁴⁸⁶.

Cependant, par itération moyennée sur l'ensemble des *pignons coniques*, il est possible de confirmer que la roue menée possède 50 dents et la roue menante 30 dents. Les *poulies* en bois étant de dimensions identiques, le rapport de démultiplication est de 3/5. Sachant que la vitesse de *l'arbre principal* est de 370 tr/min, *l'arbre des pales* tourne à la vitesse approximative de 222 tr/min. Ainsi, le débit théorique des *bacs* est de 1.7 m³/min.

⁴⁸⁴ $V = R \times \Omega$ et $\Omega = 2 \times \Pi \times N$ avec N en tr/min

⁴⁸⁵ pas = largeur x cos(180- α)

⁴⁸⁶ Volume = [section max pales - section arbre] x pas = $[(\Pi \times R^2) - (\Pi \times r^2)] \times \text{pas}$

6.4.3.5 La gouttière finale et la brouette

Un autre élément de vérification peut être effectué à la fin du processus de lavage par le calcul des masses et des volumes évacués. Celui-ci repose sur de nombreuses hypothèses mais il permet de valider la globalité de la chaîne opératoire :

- depuis le ramassage du sel dans les *œilllets* en fonction des données historiques,
- jusqu'à la capacité de stockage annoncée pour la *salorge* B.

A l'issue du 3^{ème} bac, le sel tombe dans une dernière *gouttière* possédant un double fond pour assurer un pré-égouttage⁴⁸⁷. A ce stade, le *sel* est humide et presque complètement distinct de la *saumure*. En effet, de par l'inclinaison des *bacs* et avec une densité élevée d'environ 300 grammes de sel par litre, la *saumure* est en partie restée au point bas du 3^{ème} *bac*. En théorie, seuls des *cristaux de sel solides* parviennent à la *gouttière*. Pour un volume de stockage de 60 litres environ et une masse volumique théorique des *cristaux de sel non humides* de 2.16 g / cm³, la *gouttière* contient approximativement 100 à 130 kg de *sel traité* au maximum.

Cependant, la *brouette*, positionnée à l'extrémité de la *gouttière*, récupère la solution au fur et à mesure qu'elle arrive. De gros trous sont disposés en son fond pour permettre à nouveau un pré-égouttage.

Une fois la *brouette* remplie, une *trappe* permet à l'opérateur de fermer la *gouttière*. Il peut alors vider la *brouette* sur les tas situés dans le bâtiment A2. D'une capacité maximale de 200 litres et avec une masse volumique théorique des *cristaux de sel non humides* de 2.16 g / cm³, la *brouette* pèserait près de 400 kg, ce qui trop pour un même opérateur. Il ne devait donc récupérer que la capacité d'une seule *gouttière* à la fois, soit une centaine de kilos au maximum.

En admettant que l'opérateur se rende à l'extrémité du bâtiment, près de la porte Est donnant sur la rue du TRAICT, il parcourt une distance aller-retour maximale de 70 mètres. Compte tenu du poids de la *brouette*, à raison d'une moyenne de 2 km/h et de quelques secondes supplémentaires pour la vider, l'*ouvrier* effectue cette opération en un peu plus de deux minutes ; soit environ 3 tonnes / heure. Avec un travail journalier de 10 heures pendant 6 jours par semaines et en accordant deux semaines de congés par an, avant 1936 bien entendu, l'*opérateur* travaille théoriquement 3000 heures / an et peut transporter 9 000 tonnes de sel lavé par an.

Cependant, ce travail extrêmement pénible devait sûrement s'effectuer en équipe. En effet, pour renverser la brouette, deux ouvriers ne devaient pas être de trop (!)

⁴⁸⁷ Voir partie 6.2.3.6

6.4.3.6 Conclusion du rendement et validation par les données historiques

Le tableau de la figure 198 synthétise l'ensemble des débits calculés précédemment :

Oeillets	Godets	Gouttière d'alimentation	Trémie	Bacs	Brouette / gouttière finale	Magasin B
3000 tonnes minimum / an	-	-	-	-	9000 tonnes / an	6000 tonnes maximum
-	12 m ³ /min	19.2 m ³ /min	1.6 m ³ /min	1.7 m ³ /min	-	-

Figure 198 : SUIVI DU FLUX DE PRODUCTION DU SEL DES MAGASINS BERTRAND A BATZ-SUR-MER

Les débits de la *gouttière d'alimentation* et de la *trémie* sont suffisants pour supporter le flux provenant de la *chaîne à godets*.

Mais avec un débit des *bacs* de 1.7 m³/min, le goulot d'étranglement du flux de production provient de la phase de lavage. Notons que les *pales* ne touchent pas les bords des *bacs* et que la solution peut ainsi circuler librement. Cependant, même en admettant que deux *pales* soient positionnées au même pas et permettent ainsi de doubler la quantité de solution traitée, le problème de sous-capacité n'est pas résolu. Il est donc certain que, même si le système n'est pas alimenté en permanence, la solution saline devait rapidement déborder et être projetée de partout. Cette hypothèse confirmerait ainsi les amas de sel présents sous la machine ; ainsi que les congglomérats de sel à l'extérieur de chaque point bas des *bacs* : sur les *pignons coniques*.

Avec une moyenne de 100 kilos de sel remplissant la *gouttière finale* et acheminés par *brouette*, même en faisant l'hypothèse que la *gouttière* ne reçoive un liquide chargé qu'à 30 % de sel (saumure) et à raison d'un débit des *bacs* estimé à 1.7 m³/min, la *gouttière* se remplirait en moins de deux secondes. Même en revoyant les débits théoriques à la baisse avec un faible rendement global de la machine suite, par exemple, au frottement des courroies, ce résultat improbable démontre qu'un nouveau goulot d'étranglement du flux de production intervient également ici à l'issue du lavage.

Au bilan, la machine devait donc fonctionner toute l'année. Mais pour réguler les bourrages, la *chaîne à godets* n'est pas utilisée à sa capacité maximale :

- Soit le flux d'entrée n'est pas alimenté en permanence,
- Soit le nombre de godets n'était pas de 22 mais bien moindre (une dizaine),
- Soit les courroies *patines*, ce qui est quasi certain mais dans quelle limite (!),
- Soit notre hypothèse de départ d'un moteur électrique tournant à 3000 tr/min est erronée mais c'est peu probable d'après nos enquêtes auprès d'experts motoristes.

En tous les cas, il n'y a aucun système de débrayage sur les courroies... Surdimensionnée, la conception de la machine est donc complètement artisanale et relève de l'ingéniosité de son inventeur comme le postule le **schème rationnel** défini ci-avant dans la partie 6.2.9.

Cependant, on sait que la capacité maximale de stockage du magasin B est de 6 000 tonnes. En admettant que le négoce BERTRAND vend sa production au fur et à mesure, cette capacité de production calculée de 9 000 tonnes par an est réaliste.

De plus, à la fin des années 1960, les études historiques ont rapporté que la famille BERTRAND possède plus d'un millier d'œillets. A raison de 1 à 3 tonnes de sel produit par œillet, sa production atteint un maximum de 3 000 tonnes par an. Hors la capacité de stockage de la salorge et celle de la laverie sont bien supérieures. Cela démontre que BERTRAND devait très vraisemblablement acheter la production de nombreux paludiers locaux ne possédant pas de machine à laver et n'assurant pas le négoce du sel. Ceci explique alors la puissance de la famille BERTRAND qui vaudra à l'entreprise d'accéder à un des rangs les plus élevés de l'industrie du sel de GUERANDE. Ceci explique également que l'entreprise COBRASEL⁴⁸⁸, concurrente des négociants locaux, périclita car les paludiers indépendant refusaient de vendre à une société non familiale.

Enfin, la validation de la capacité de production de la laverie BERTRAND peut également s'effectuer grâce aux enquêtes ethnologiques des *rouliers* réalisant, jusqu'en 1930, le trajet en charrette jusqu'à la gare de BATZ-SUR-MER. Un cheval développe une puissance musculaire 10 fois plus puissante qu'un homme mais la charrette étant chargée avec 1 675 kilos de sels⁴⁸⁹, celle-ci doit rouler au pas comme en témoigne les iconographies du début du 20^{ème} siècle sur lesquelles les *rouliers* marchent à côté du chargement. La vitesse moyenne du convoi n'excède donc pas 3 km / h. Les 815 mètres⁴⁹⁰ aller-retour séparant les Magasins de la CROIX DE PAIX et la gare s'effectuent donc en approximativement 15 minutes. Or il faut : charger et décharger le sel, passer à la douane ou à la pesée... ; comptons donc environ une heure pour toute l'opération. Les *rouliers* travaillent donc à la vitesse de 1.6 tonnes / heure. Or il faut 6 voyages avec des sacs de 50 kg pour remplir un wagon d'une contenance de 10 tonnes de sel. Comme calculé précédemment, avec 4200 heures de travail par an, le transport par rail permet l'exportation de 7 000 tonnes de sel par an. La capacité de la machine est donc bien au-delà et la capacité de la salorge de 6 000 tonnes permet à l'entreprise BERTRAND de travailler en flux tendu. Aussi, on peut supposer que les *rouliers* ont souvent dû travailler plus rapidement, être soumis à de fortes pressions voire même à être en nombre plus importants.

⁴⁸⁸ Voir partie 6.2.8.3

⁴⁸⁹ Les *rouliers* emportent 33-34 sac de 50 kg à chaque voyage.

⁴⁹⁰ L'aller s'effectue par la rue PASTEUR puis la rue de la GARE : 460 mètres ; le retour se réalise par la rue de la VIOLETTE et la rue du TRAICT : 355 mètres.

6.5 SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES DU CAS D'ÉTUDE

Cette étude statue sur un état des lieux d'une démarche commencée il y a 20 ans (annexe 33) grâce à la découverte d'un **objectum** technique industriel : une machine artisanale du 20^{ème} siècle. A ce jour, le projet n'a pas encore abouti à un programme de valorisation [BURON & al 2005]. Et pourtant, paradoxalement, à l'illustration de cet exemple, sauvegarder le patrimoine technique et industriel doit s'effectuer sur un temps très court.

Faire face rapidement à la dégradation exponentielle de **l'objet** nécessite des **outils** et des **méthodes** à adapter en fonction du besoin de conservation ainsi que des moyens humains et financiers disponibles. C'est l'intérêt de *l'archéologie industrielle avancée* s'appuyant sur le *rétro-processus de conception* et sur *l'arbre décisionnel de numérisation 3D*. En effet, sans l'investigation menée grâce à la structuration des **caractéristiques** des **brèves** et des **sources**, il n'aurait pas été possible d'itérer sur des conclusions plausibles et recoupables, capables d'assurer la cohérence de l'ensemble. De plus, il est important de souligner que toutes ces **connaissances** peuvent être revalorisées pour et par différents publics grâce au **DHRM**.

Guidée par le DHRM, la généricité du méta-modèle permet de formaliser ces démarches et ces méthodes. Dès lors, il est possible d'utiliser le DHRM par instanciation sur d'autres problématiques et dans d'autres conditions sur de nouveaux objets techniques et industriels à caractères patrimoniaux.

Nécessitant de nombreuses spécialités pour étudier l'objet dans ses aspects internalistes et externalistes à multi-dimensions et multi-temporalités, l'équipe de sauvegarde se doit d'être inter-disciplinaire.

L'intégration de métiers techniques contemporains, tels que des ingénieurs mécaniciens, a permis ici de comprendre la conception et le dimensionnement de l'objet étudié ainsi que la complexité de la gestion de la production. Dès lors, travailler avec les **outils** du monde de l'entreprise est apparu non pas comme une solution à la *sauvegarde* de **l'objet** mais comme une réelle nécessité et un passage incontournable afin de saisir **l'objet** dans toute sa complexité technico-industrielle.

Pour autant, le travail des sciences humaines n'est pas écarté. La recherche et la compréhension du contexte ethno-historique de **l'objet** s'avèrent nécessaires afin de poser les hypothèses sur lesquelles les analyses techniques s'appuient [SAUZEREAU 2002]. Les différentes études doivent donc impérativement s'organiser pour certaines de manière sérielle et pour d'autres de façon concurrente.

Ainsi, **l'objet** faisant partie d'un ensemble industriel plus vaste, comprendre les tenants et les aboutissants de son **environnement** est indispensable pour effectuer des *simulations dynamiques virtuelles* de ses **usages**. On peut envisager mener de nouveaux travaux de

recherche sur des simulations ergonomiques pour valider les limites des capacités humaines dans ce Système Technique en intégrant un mannequin numérique qui :

1. enchaînerait les tâches de la production du lavage,
2. remplirait les sacs,
3. chargerait la charrette,
4. transporterait le sel au train,
5. ...

Ainsi, cette encapsulation d'un processus s'élargissant d'un *niveau microscopique* à un *échelle macroscopique* selon le *concept des poupées russes* validerait par la simulation virtuelle l'intégralité du **DHRM**.

Le dernier chapitre de ce manuscrit se propose d'enrichir la classe **homme** en s'appuyant sur deux nouveaux exemples succincts dans lesquels les interactions entre les *métiers* utilisant la *sémantique* commune du **DHRM** collaborent. Précisons d'ores et déjà que ceux-ci ne seront pas aussi détaillés que l'étude de la machine à vapeur FIGUET ou celle de la machine à sel de BATZ-SUR-MER.

7. ENRICHISSEMENT DU DHRM ET INTERET DES MAQUETTES NUMERIQUES DE PATRIMOINE : CAS D'ETUDES

Dans le chapitre précédent, nous avons démontré la pertinence de l'utilisation du **DHRM** selon des **schèmes multi-temporels** et **multi-dimensionnels**. Grâce au concept des *poupées russes* couplé à celui des *boîtes noires / boîtes blanches*, la *contextualisation* a permis d'enrichir le modèle **d'usage de l'objet technique ancien** aussi bien dans ses *aspects internaliste qu'externaliste*.

De plus, grâce à la numérisation 3D, la définition des *attributs* de la classe **brifes** en corrélation avec les **sources** a transformé les **traces** en **connaissances** et a ainsi conduit au **Dossier d'œuvre patrimonial technique**.

Le processus de rétro-conception patrimoniale se doit d'être robuste et nécessite la constitution d'une équipe inter-disciplinaire.

Outre le paramètre temporel évoluant en sens inverse du processus standard, **l'Homme** et son **Environnement** sont les deux autres classes définissant le *trptyque du patrimoine* et venant enrichir la démarche. Dans ce chapitre 7, nous allons proposer un enrichissement de la classe **homme** :

1. A travers un premier exemple réalisé en pédagogie, nous démontrerons que l'état C peut lui-même être constitué du processus A-B.
2. Cette analyse amènera alors à envisager le *processus de patrimonialisation* comme un projet inter-disciplinaire que nous définirons et illustrerons par un dernier cas d'étude.

7.1 LE PROCESSUS DE PATRIMONIALISATION COMME OUTIL DE VALORISATION

Cette partie se propose, dans un premier temps d'expliquer l'hypothèse d'utilisation du *rétro-processus de conception patrimoniale*. Ensuite, un cas d'étude de terrain réalisé avec des étudiants démontrera la faisabilité du projet [Le LOCH & al 2007].

7.1.1 VERS UNE UTILISATION DIDACTIQUE DES OBJETS TECHNIQUES ANCIENS

7.1.1.1 Hypothèse : la spirale patrimoniale

Parmi la masse **d'objets** à caractère scientifique, technique et industriel produits par **l'homme**, la classification proposée par Jocelyn de NOBLET dans le chapitre 5 permet d'orienter le choix de **l'objectum** à étudier⁴⁹¹. Le *rétro-processus de conception* développé précédemment est particulièrement bien adapté aux **objets** de la 3^{ème} catégorie [de NOBLET 2005] :

Les objets que l'on n'utilise pas, que l'on ne possède pas mais qui sont indispensables à la création et/ou l'utilisation des objets de la vie courante.

Témoignages d'une période technique révolue, ils sont parfois devenus l'emblème d'une technologie ancienne *de pointe*. Utiliser ces **artefacts** pour l'enseignement et la pédagogie permet alors d'envisager une réelle culture technique. Avec comme support la DMU, les élèves peuvent comprendre le fonctionnement de mécanismes cachés, appréhender les subtilités technologiques inhérentes à la culture technique moderne...

Cependant, notre contribution propose d'aller plus loin qu'une simple utilisation du **Dossier d'œuvre patrimonial technique**. De par les propriétés du **DHRM**, les structures ontologiques des états A, B et C étant identiques, nous envisageons de dérouler la phase *d'archéologie industrielle avancée* directement dans un cadre didactique. Ainsi, le processus $A \rightarrow B$ devient lui-même un produit numérique de valorisation $C : f(C) = A.B$

Ainsi, pour un **usage** muséologique d'un **schème** donné, les états du **DHRM** sont modifiés : **l'objectum**, les **traces** et le **Dossier d'oeuvre patrimonial technique** sont encapsulés dans le **Produit numérique final**. Il ne s'agit plus désormais du **schème** se déplaçant dans un espace *multi-dimensionnel* et *multi-temporel* mais cette action revient en réalité à mouvoir l'intégralité du méta-modèle **DHRM** dans un domaine à n-facteurs : c'est la *spirale patrimoniale* expliquée en conclusion du chapitre 5⁴⁹².

Pour valider cette hypothèse, un cas d'étude a été réalisé en collaboration avec les élèves de la Licence Professionnelle de l'IUT de l'UNIVERSITE DE NANTES.

⁴⁹¹ Voir partie 5.3.2.2

⁴⁹² Voir partie 5.4.5

7.1.1.2 Les projets tutorés universitaires : quels moyens pour quels objectifs ?

Depuis quelques années, les projets tutorés ou travail en autonomie se sont rapidement multipliés dans les formations techniques : écoles d'ingénieurs, CNAM, IUT... Cette croissance a entraîné, entre autre, des difficultés quant à l'élaboration des sujets.

Dans le cas de l'apprentissage de la CAO avancée⁴⁹³, réaliser un projet de conception est difficile car les supports industriels sont difficiles à obtenir. De plus, un sujet offrant l'opportunité de cerner l'ensemble d'un système technique complexe est exceptionnel.

Aussi, plusieurs voies d'investigations parallèles sont utilisées :

- les projets de compétition entre établissements scolaires (Eco-Marathon Shell⁴⁹⁴, Coupe de robotique E=M6⁴⁹⁵, Vélo à Propulsion Humaine⁴⁹⁶ ...),
- les projets d'auto-équipement (matériel de Travaux Pratiques)...

L'objectif étant majoritairement à but pédagogique, ces projets apportent rarement un portefeuille de contacts pouvant être utilisé par les étudiants à l'issue de leur cursus. Dès lors, la motivation des étudiants est souvent délicate à susciter et à conserver tout au long de l'étude.

7.1.1.3 La culture technique : intérêt pédagogique des projets de sauvegarde du patrimoine industriel sous une forme numérique

L'apport de sujets à caractères patrimoniaux va alors permettre de renouveler les sujets : tant dans la quantité que dans la qualité. Le nombre des objets à caractère technique ou industriel est *illimité* et leur complexité varie depuis la TOUR EIFFEL jusqu'au pont de MILLAU, en passant par le tour à usiner horizontal de notre grand-père à celui des usines produisant des arbres d'une dizaine de mètres pour les navires ou les centrales thermiques.

S'organisant à partir des **traces** comme les plans, la documentation générale ou la machine réelle... les étudiants doivent recréer ***l'objet technique ancien*** devenu ***système mécanique*** et le simuler en CAO.

L'utilisation du *rétro-processus de conception patrimoniale* dans un cadre pédagogique présente de nombreux avantages :

- possibilité d'aboutir à des maquettes CAO complexes pour lesquelles les étudiants ont à utiliser les règles de la conception en groupe de projet,
- analyse des performances du système par simulation permettant aux étudiants de se corriger eux-mêmes,
- ...

⁴⁹³ Il est entendu par CAO avancée les projets conduisant à l'élaboration de maquettes numériques complexes simulables.

⁴⁹⁴ <http://www.shell.com/eco-marathon>

⁴⁹⁵ <http://www.em6.fr>

7.1.2 ETUDE DE CAS : LES MACHINES D'IMPRIMERIE

7.1.2.1 Contexte du projet

Les projets présentés dans ce cas d'étude ont été réalisés par des groupes de trois à quatre étudiants, dans le cadre de la licence professionnelle Gestion de la Production Industrielle de l'IUT de Nantes, profil Conception Industrialisée de Produits au département Génie Mécanique et Productique [GUILLE & al 2005] [RAMIER & al 2005]. Avec 150 heures allouées au projet, l'objectif pédagogique principal est d'approfondir l'utilisation du logiciel de CAO disponible à l'UNIVERSITE DE NANTES : ici CATIA V5. Au préalable, les étudiants ont suivi une formation relativement courte d'une trentaine d'heures sur différents modules : pièces volumiques, surfaciques, assemblage, cinématique, paramétrage... Le but fixé aux étudiants est de réaliser, en complète autonomie, une maquette numérique la plus fidèle possible d'une machine ancienne et de simuler sa cinématique. Notons cependant que ces étudiants ont déjà acquis auparavant durant leur cursus scolaire l'ensemble des bases de la conception mécanique.

Ces projets ont été menés en partenariat avec le Musée de l'IMPRIMERIE de NANTES et l'ASSOCIATION des ANCIENS IMPRIMEURS. Même si presque centenaires, les objets sont des machines en état de fonctionner actuellement en démonstration au Musée.

L'objectif confié aux étudiants est d'apporter un éclairage supplémentaire aux discours des opérateurs du *Musée vivant*⁴⁹⁷ par l'explication du fonctionnement mécanique de ces machines : la simulation CAO permettant de visualiser la dynamique de sous-ensembles du mécanisme, d'obtenir un rendu de pièces particulier en changeant de couleurs, en ajustant la transparence...

7.1.2.2 Presse à platine : Contextualisation par l'histoire des techniques⁴⁹⁸

Les presses à platine et à marbre verticaux sont les plus connues et les plus répandues. Au 19^{ème} siècle, ces presses sont fabriquées en milliers d'exemplaires selon différents modèles proposant de multiples formats d'impression.

Mais l'un des inconvénients majeurs de ce type de presse est la dimension limitée des formats disponibles conditionnés par la taille de la platine⁴⁹⁹, elles sont donc essentiellement utilisées pour des petites feuilles. Les presses à cylindres, quant à elles, sont préférées pour les grands formats ; nous détaillerons ce modèle par la suite.

Les presses à platine sont couramment dénommées Presses à Pédale.

⁴⁹⁶ <http://www.tropheekidam.org>

⁴⁹⁷ *Musée vivant* = se dit des Musées dans lesquels les artefacts sont utilisables ou fonctionnels.

⁴⁹⁸ Source : [MARTIN 2002b]

⁴⁹⁹ Platine = support de la feuille

Imaginé en 1810 aux ETATS-UNIS, le principe de fonctionnement repose principalement sur la production d'une force motrice humaine. Le mouvement d'entrée en va-et-vient est généré par l'action du pied de l'opérateur sur une pédale. Contrairement aux presses à cylindres, la platine et le marbre sont mobiles et articulés par rapport au bâti. Avec un axe de rotation très bas, le marbre n'a qu'un faible débattement.

Après de nombreuses années de mise au point, la première presse à platine verticale est inventée en 1851 par GORDON. En 1856, afin de remédier au problème de non homogénéité de l'encre sur le papier, il dépose un brevet proposant un double disque d'encrage encastré l'un dans l'autre et tournant en sens contraire.

En 1862, après diverses améliorations et entre autres au niveau de la sécurité des mains et des pieds de l'opérateur⁵⁰⁰, la presse à pédale est exposée à LONDRES. Sa haute qualité technologique lui vaut d'être remarquée par CROPPER qui en obtient la concession et la fabrique sous le nom de MINERVA. Traversant la MANCHE, elle est ensuite construite à PARIS par les établissements BERTHIER sous le nom de MINERVE.

L'évolution de ses différents noms : LIBERTY, MINERVE, PHENIX... est illustrée par l'annexe 34 [BARGILLIAT 1968].

En 1910, BERTHIER et DUREY fondent leur propre entreprise à PARIS et inscrivent dans leur catalogue les platines et les cylindres à pédale.

Une affiche publicitaire de la société BERTHIER & DUREY, nous informe que la marque LA MINERVE est déposée depuis 1871. Comme l'illustre cette archive jointe en annexe 35 [BERTHIER & al 1910], il s'agit ici de la version n°2 du modèle proposé en version manuelle à pédale ou motorisée.

La MINERVE possède, sur les autres machines, de sérieux avantages : Grande solidité ; bâtis fondus d'une seule pièce, assurant ainsi une stabilité parfaite ; cames de déplacement des rouleaux, permettant à ceux-ci de remonter sur une autre partie de la composition qu'à l'aller ; position de la platine presque horizontale et, au moment de la marge, immobilité complète ; mise en train aisée, réglage instantané de la pression ; possibilité d'imprimer ou de passer en blanc, par un simple mouvement, en renversant la barre de foulage, qui, comme l'indique son nom, a pour fonction de régler la pression.

L'exemplaire du Musée de l'IMPRIMERIE de NANTES qui a été étudié porte le numéro 2496.

7.1.2.3 Presse à Cylindre : Contextualisation par l'histoire des techniques⁵⁰¹

En 1811, KOENIG et BAUER remplacent la platine par un cylindre. La feuille de papier est pincée sur un cylindre rotatif. Le marbre-plan est animé d'un mouvement de va-et-vient. Au passage du marbre sous le cylindre en rotation, la pression est telle que l'empreinte

⁵⁰⁰ On retrouve un état des lieux très complet de l'imprimerie pays par pays dans l'ALBUM de l'EXPOSITION UNIVERSELLE de 1862 [ALBUM 1862]. Cependant, il ne s'agit là que de descriptifs élémentaires du fonctionnement global ; pas de traces de documents techniques.

⁵⁰¹ Source : [MARTIN 2002]

transfère l'encre sur la feuille. Cette technique permet ainsi l'impression de formats plus grands.

D'une façon générale, les premières presses à cylindre sont caractérisées par un chemin de fer sur lequel le marbre translate horizontalement. Pour laisser le temps au cylindre d'enrouler l'intégralité de la feuille, le marbre possède un mouvement de va-et-vient non régulier. L'annexe 36 illustre cette technologie grâce à une source historique [BARGILLIAT 1968].

Il existe plusieurs technologies :

- *machines à arrêt de cylindre* : le cylindre s'arrête pendant le retour du marbre,
- *machines deux tours* : le cylindre fait deux tours par feuille et se soulève pendant le retour du marbre,
- *machines à réaction* : le cylindre tourne et détourne à chaque aller-retour du marbre,
- *machines à déroulement de cylindre* sur la forme,
- *machines à vitesse variable* : le marbre a une plus grande vitesse au retour qu'à l'aller.

En 1820, à PARIS, Henry VOIRIN crée sa propre machine. Soixante dix ans après, le modèle atteint l'excellence technologique requise par la précision de l'impression : il s'agissait de typographier à partir d'éléments en relief, tous positionnés à la même hauteur et enduits d'une mince pellicule uniforme d'encre.

La presse à arrêt de cylindre que nous avons étudiée est de cette célèbre entreprise VOIRIN qui est devenue, par rachats successifs durant le 20^{ème} siècle, propriété du groupe allemand HEIDELBERG DRUCKMASCHINEN AG, actuel leader international de machines à imprimer.

Utilisée de 1937 à 1985 par l'entreprise NAZE, plus connue sous le nom des AFFICHES NANTAISES, cette presse typographique imprime un format quadruple raisin⁵⁰² sur des feuilles de papier kraft. Elle est semi-automatique car :

- bénéficie d'un moteur électrique pour créer le mouvement de fonctionnement,
- ne nécessite que deux opérateurs pour assurer la mise en position et le retrait des feuilles après impression (figure 199).

Donnée au Musée de l'IMPRIMERIE de NANTES à une date inconnue des conservateurs, on peut toujours la voir en fonctionnement dans le Musée.

⁵⁰² Format quadruple raisin = 1 mètre x 1.3 mètres

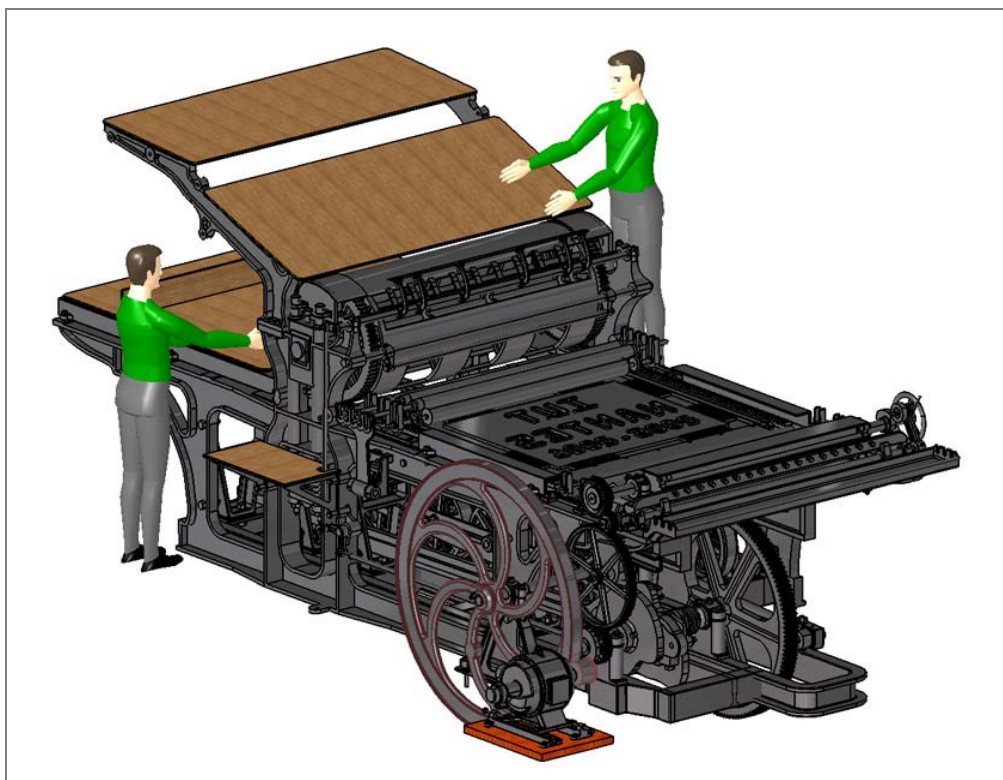


Figure 199 : MAQUETTE NUMERIQUE DE LA PRESSE A CYLINDRE VOIRIN FONCTIONNANT AU MUSEE DE L'IMPRIMERIE DE NANTES

7.1.2.4 L'objet technique comme point de départ

Plusieurs étapes ont été effectuées par les étudiants pour appréhender et comprendre les machines :

1. Définition de ***l'objectum*** - sensibilisation par des visites au Musée :
 - a. étude des machines en fonctionnement et analyse des démonstrations des animateurs du Musée permettant une première approche des aspects ***dynamiques*** pour en déduire la ***cinématique*** et la ***fonction a priori*** [MUSEE 1998],
 - b. choix définitif de la machine à étudier et à modéliser parmi le parc des presses d'imprimerie en état de fonctionnement ou en cours de restauration par l'ASSOCIATION des ANCIENS IMPRIMEURS.
2. Création de la ***Maquette numérique de référence*** - études ***internaliste*** et ***externaliste*** :
 - a. récupération des ***caractéristiques*** de la machine : prises de photos et mesures de la machine en restauration,
 - b. étude de documents historiques afin d'acquérir les connaissances de base sur ces anciennes technologies et appréhender le vocabulaire du métier d'autrefois. Notons que le ***cours de typographie*** de 1968 est un des documents majeurs ayant été utilisés. Pourtant, cette typologie de ***source*** n'est pas celle qu'une recherche historique aurait ***a priori*** retenue en priorité [BARGILLIAT 1968].

Durant la phase de prise de cotes, les étudiants ont été confrontés à un composant impossible à mesurer avec les outils classiques car non démontable et intérieur à la machine. Il s'agit de la *came* permettant de commander l'ensemble des mécanismes de la presse VOIRIN (figure 200). Appliquant l'arbre décisionnel, l'outil de numérisation du HANDYSCAN 3D apporta la solution. Une fois la came digitalisée, le profil du contour est directement récupéré sur le nuage de points (figure 201) et modélisé en CAO volumique (figure 202). [LAROUCHE & al 2007e]

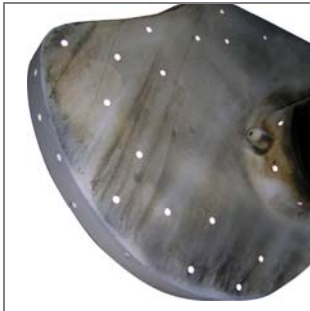


Figure 200 : PRESSE VOIRIN,
CAME REELLE

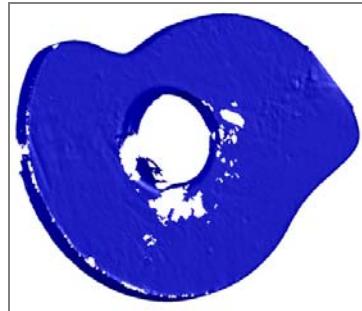


Figure 201 : PRESSE VOIRIN,
CAME SCANNEE

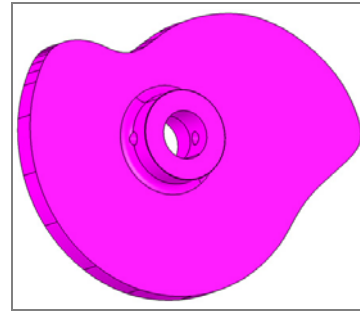


Figure 202 : PRESSE VOIRIN,
CAME CAO

7.1.2.5 Gestion de projet et méthodologie de rétro-conception patrimoniale

Une répartition des tâches dans le groupe de travail s'impose considérant le grand nombre de pièces à modéliser et à reconcevoir :

- environ 90 composants pour la presse à platine,
- et 400 pour la presse à cylindre.

Après avoir déterminé la cinématique, chaque élève s'approprie un sous-ensemble fonctionnel. Ainsi, il peut progresser en autonomie mais doit régulièrement faire le point avec ses collègues pour interfacier les différentes parties. La distribution du travail permet de définir un planning prévisionnel du projet *patrimoine*.

D'un point de vue méthodologique, nous avons suivi le *processus de rétro-conception patrimoniale* défini dans la partie 3.3.1 de ce manuscrit et appliqué en 4.4.1.2 sur le cas d'étude PIGUET. Cependant, au fur et à mesure des années, la démarche s'est affinée (figure 203). Elle synchronise désormais une étape de maturation de la **connaissance** devenue centrale dans le *processus de patrimonialisation* : la compréhension du mécanisme. La phase d'habillage du volumique a disparu et les éléments temporels sont directement intégrés dans le modèle CAO volumique. Cependant, cette nouvelle phase ne remplace pas le modèle filaire, pré-requis indispensable à la validation virtuelle du principe de fonctionnement.

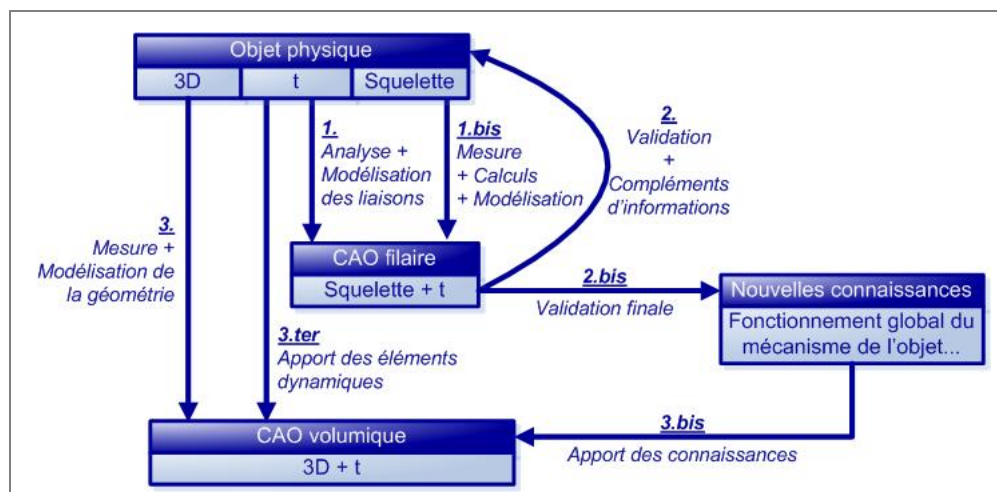


Figure 203 : METHODOLOGIE DE MODELISATION EN CAO 3D+T D'UN OBJET PATRIMONIAL POUR UNE UTILISATION DANS UN CADRE PEDAGOGIQUE

7.1.2.6 Maquette numérique et découvertes techniques

La réalisation de la maquette numérique est un travail aisé pour les étudiants. Habités aux environnements de conception, ils reconçoivent les pièces en prenant comme conditions initiales les paramètres du squelette. Cependant, de par les *attributs* des **brèves** définis au chapitre 6.3.2, la machine étant usée, les composants reconçus ne peuvent pas être identiques au **schème** de *l'objectum*. Aussi, les étudiants doivent se placer dans un **schème** où la machine est utilisée en production : les pièces doivent impérativement être fonctionnelles (figure 204).

La simulation de la maquette numérique 3D d'une MINERVE décrit un cycle de fonctionnement complet en trois étapes principales :

1. mise en route et entretien du mouvement grâce au volant d'inertie entraîné par la force manuelle exercée sur la pédale,
2. encrage de la forme⁵⁰³ à l'aide des rouleaux,
3. mise en pression de la feuille sur la forme.

⁵⁰³ Forme = négatif métallique de l'affiche à imprimer

De plus, d'autres fonctions de services doivent être assurées :

- Mise en place de la forme sur le marbre,
- Mise en place de la feuille : marge et calage,
- Alimentation et sortie des feuilles,
- Maintien du support papier lors de l'impression,
- Encreage des rouleaux encreurs,
- Rotation des plateaux pour une répartition homogène de l'encre.

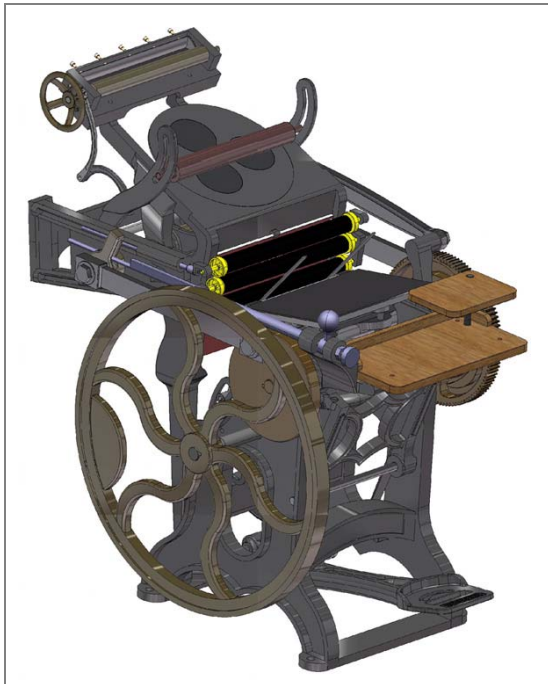


Figure 204 : LA MINERVE, MAQUETTE NUMERIQUE

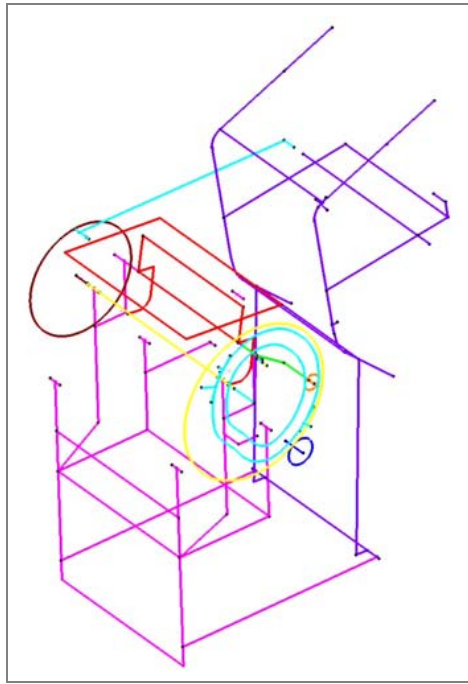


Figure 205 : LA MINERVE, MODELE FILAIRE PARTIEL

L'utilisation de la simulation cinématique (figure 205) en préliminaire à une conception volumique demande aux étudiants de maîtriser parfaitement les détails afin que les mouvements de l'ensemble des **fonctions** soient correctement restitués et synchronisés.

Prenons deux exemples technologiquement remarquables :

- Le mouvement de la pince pour le maintien de la feuille pendant l'impression (figure 206) : la came pilotant la fermeture doit être très précise afin de pouvoir plaquer la feuille sur la platine à la pression donnée sans la détériorer.
- Le mécanisme des plateaux encreurs (figure 207) : pour optimiser l'encreage des rouleaux, un mouvement de rotation global et de contre-rotation localisé en trois sous-plateaux circulaires est effectué. De plus, cette fonctionnalité n'est pas permanente : la fréquence est synchronisée sur celle de la machine.

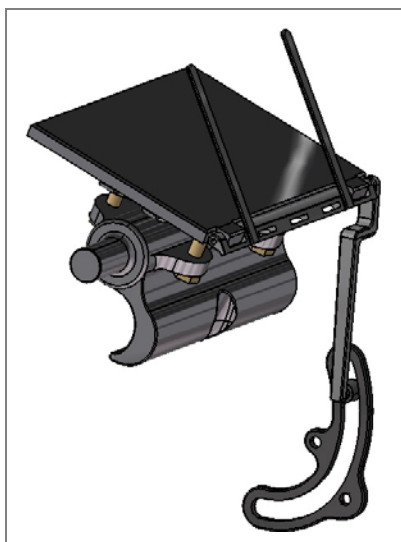


Figure 206 : LA MINERVE, SYSTEME DE PINCE POUR LE MAINTIEN DE LA FEUILLE

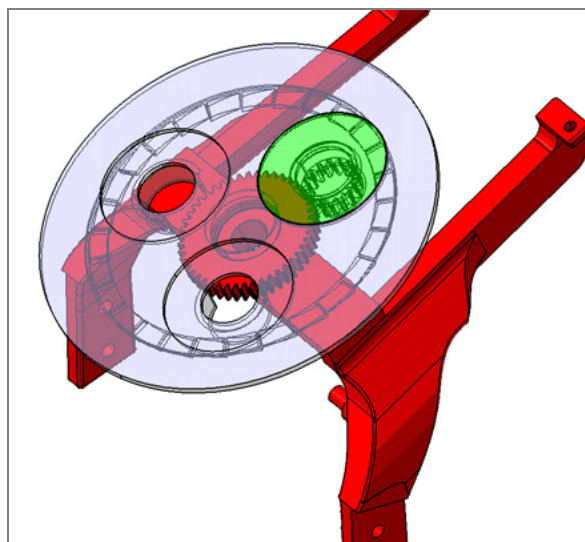


Figure 207 : LA MINERVE, MECANISME DES PLATEAUX ENCREURS

7.1.3 BILAN : EVOLUTION DU DHRM

Cet exemple pédagogique démontre le fait qu'étudier un **objet technique ancien** permet aux élèves, ainsi qu'aux encadrants, de découvrir voire d'acquérir une culture technique véritable, à partir de machines anciennes.

Du point de vue de la conception mécanique en CAO, les **machines anciennes** sont intéressantes à plusieurs points de vue :

- de nombreuses pièces sont de formes complexes car moulées ou forgées imposant l'utilisation **d'outils** de dessin avancés comme les modules de conception surfacique,
- l'utilisation d'un seul actionneur - parfois même l'énergie humaine - implique une **cinématique** complexe qui, sans **l'outil** de numérisation 3D, la CAO paramétrique et la simulation cinématique, serait difficile à recréer à partir de cotes approximatives.

De nos jours, la partie commande des mécanismes industriels est poussée à l'extrême avec des équations de fonctionnement, de l'électronique omniprésente... ceci a permis de gagner en flexibilité. Mais en contrepartie, ces systèmes ont minimisé la qualité de la mécanique alors qu'auparavant, la commande se réalisait par de la mécanique de précision. Utiliser un seul mouvement d'entrée pour plusieurs mouvements de sorties, il s'agit là du témoignage le plus saisissant recueilli auprès des étudiants ayant travaillé sur les *projets patrimoine* comme ils les dénomment désormais. On notera tout de même que même si leur implication a été remarquable, au premier abord ils affichent souvent une réticence vis-à-vis des *vieilles machines*. *Il suffit d'y goûter !*

D'un point de vue pédagogique, suscitant plus qu'un intérêt sanctionnable par une note, les étudiants sont devenus *gourmands* des **objets techniques anciens** et n'attendent plus le lancement des projets par les enseignants pour demander quel sera le sujet de l'année en

cours : les *projets patrimoine* sont parfois plus riches technologiquement que des machines modernes qui ne sont ni disponibles ni démontables.

Ainsi, approfondissant les différents modules de CAO introduits en cours, ces projets incitent les étudiants à développer le *travail coopératif en groupe*. Cependant, notons que les expériences menées ont confirmé les hypothèses du chapitre 3 selon lesquelles les **outils** modernes des NTIC sont mal adaptés aux **objets anciens** : en réalité, les outils sont trop parfaits pour ces **machines** issues généralement d'un savoir-faire non validé par le calcul. Dans le passé, elles ont d'ailleurs souvent nécessité une longue mise au point et de nombreux ajustages pour fonctionner de façon optimale.

L'utilisation des *méthodes de reverse-engineering* n'est pas l'objectif pédagogique visé. Cependant, exploiter les **outils** de numérisation 3D et de reconstruction de surfaces en CAO permet aux étudiants d'approcher des techniques de *pointe* en résolvant certaines parties délicates des modélisations.

D'un *point de vue de la motivation*, le contexte de machines du patrimoine technique a fortement impliqué les étudiants grâce à :

- la découverte de machines et techniques inconnues, contrairement aux diverses pompes ou perceuses qu'ils ont déjà étudiées dans leur scolarité,
- la prise de conscience à travers les rencontres avec les différents acteurs du projet de la singularité de l'étude et de la nécessité de sauvegarder le patrimoine technique,
- la valeur ajoutée offerte par ces travaux par rapport aux projets pédagogiques tuteurés classiques.

7.2 VERS UN NOUVEAU PROCESSUS COOPERATIF D'INGENIERIE

7.2.1 INTRODUCTION : UNE PROBLEMATIQUE MULTI-POINTS DE VUES

Les équipes pluri-disciplinaires mises en place pour concevoir nos produits du 21^{ème} siècle mettent en œuvre des connaissances et des compétences relativement récentes. Malgré cette diversité des compétences dans les équipes projet, les métiers appartiennent tous à un même domaine : celui de la *conception* et/ou de *l'ingénierie*. Qu'ils soient designers, ergonomes ou technologues spécialisés, les notions et connaissances auxquelles font appel les différentes disciplines possèdent une intersection commune avec une sémantique de même niveau. Dès lors, il y a création d'un *référentiel de coopération* conjoint [BOUJUT & al 1998]. De plus, les *processus d'ingénierie* s'en trouvent simplifiés de par l'utilisation **d'outils** de collaboration.

Le cadre de la *rétro-conception d'artefacts* anciens requiert aussi de nombreuses compétences et de nombreuses connaissances. Cependant, celles-ci semblent apparemment très éloignées des préoccupations industrielles contemporaines. En effet, cette nouvelle démarche concerne des métiers nécessitant de couvrir des champs de compétences à *multi-dimensions* et *multi-temporalités*. En se plaçant dans le **schème** de la phase *d'archéologie industrielle avancée*, prenons l'exemple de deux instanciations possibles de la classe **Homme** :

- un ingénieur thermicien concevant des génératrices à vapeur industrielles pour le nucléaire,
- et un historien des techniques spécialiste des chaudières des 19^{ème} et 20^{ème} siècles.

Quelles sont les distinctions entre les deux métiers ? Aucune, si ce n'est que chacun contribue au même **usage** mais avec des *temporalités* différentes et donc des **contextes** différents. Il apparaît alors un décalage de vocabulaire du *référentiel de coopération* ; cependant, cette difficulté est surmontée grâce à la capacité du **DHRM** à encapsuler les sémantiques *multi-temporelles* via la classe **outils** : c'est le concept des *boîtes noires* / *boîtes blanches* que nous allons démontrer ici.

Toujours dans un cadre d'utilisation de *l'archéologie industrielle avancée* comme *projet de valorisation*, nous avons mené une expérience en partenariat avec un industriel : la DCNS⁵⁰⁴, spécialisée dans les systèmes navals de défense à haute valeur ajoutée. Ce projet a plus particulièrement été suivi par le site d'INDRET (44) de la DCNS, dédié à la propulsion nucléaire.

Cette dernière étude de cas permet de valider une nouvelle hypothèse : la nécessité de créer un projet réunissant des métiers qui ne se côtoient pas d'ordinaire. Cette expérience didactique a requis une équipe inter-disciplinaire composée aussi bien de professionnels

⁵⁰⁴ <http://www.dcn.fr>

que d'étudiants, provenant des SHS comme des SPI. Dès lors, il s'agit d'un nouveau *processus de conception collaboratif* nous permettant d'enrichir la classe **homme** de la phase *d'archéologie industrielle avancée* du **DHRM**.

7.2.2 CONTEXTE DE L'ETUDE DE CAS : LE CANOT A VAPEUR DE 1861

7.2.2.1 Définition du projet et de l'Objectum

En septembre 2001, le site d'INDRET de la DCN PROPULSION rassemble diverses archives de l'entreprise. Afin de valoriser ce patrimoine, le POLE HISTORIQUE D'INDRET est créé en janvier 2002. Le PHI⁵⁰⁵ est considéré comme une entité à part entière de DCN PROPULSION et est placé sous la coordination du secrétaire général de l'établissement. Sa mission : sauvegarder le patrimoine historique, industriel et bâti du site créé en 1777 sous tutelle de la MARINE FRANÇAISE.

On notera que la présence d'un tel département dans une entreprise est exceptionnelle. En effet, comment calculer un ROI⁵⁰⁶ sur du patrimoine⁵⁰⁷ ? Sauf cas des Musées, une entreprise n'investit pas en interne sur des moyens qui ne lui rapportent pas d'argent. Nuançons nos propos en précisant, qu'à terme, l'Entreprise peut y voir un intérêt :

- d'image et de communication,
- le *sérieux* d'une entreprise sur la longue durée et donc une valeur ajoutée du produit vis-à-vis de ses clients et fournisseurs,
- un avantage stratégique par une meilleure compréhension des facteurs temporels des Systèmes Techniques agissant alors sur sa propre conception,
- un sentiment d'identité des employés de l'Entreprise et d'appartenance à une communauté.

Quoi qu'il en soit, précurseur de ces nouvelles valeurs, le PHI a le mérite d'exister et l'engouement suscité par la DCNS est prometteur. Constitué de 1.2 personnes⁵⁰⁸, elles répertorient et collectent les documents témoignant du passé de l'entreprise. Ce fonds est placé sous le contrôle du Conservateur des archives de la Marine de LORIENT.

Dans les milliers de mètres linéaires d'archives de tous types de **sources** que le PHI possède, un ancien plan couleur de grand format à échelle 1:10 est retrouvé ; il n'est pas daté⁵⁰⁹ (annexe 37). Cependant, il s'agirait d'un projet d'élaboration d'un canot à vapeur destiné à la marine française comme en témoigne la dépêche ministérielle du

⁵⁰⁵ PHI = Pôle Historique d'INDRET

⁵⁰⁶ ROI = Retour sur investissement

⁵⁰⁷ Voir partie 7.3.2

⁵⁰⁸ Une personne à plein temps (retraité) et 2 employés de la DCNS travaillant dans les bureaux d'études de l'entreprise affectés au PHI à 1/10 de temps.

⁵⁰⁹ Source : [EM 1860]

9 décembre 1860⁵¹⁰. Le 28 août 1862, le rapport de commission chargée des essais du canot est dressé⁵¹¹ : ce bateau aurait donc effectivement été construit en 1861-1862 et testé sur la LOIRE, à titre de prototype.

Afin de valoriser son patrimoine historique industriel, le PHI décide d'étudier cet **objet** en alliant l'histoire technique du canot à son métier de la propulsion contemporaine. Le plan original est restauré et l'étude commence (figure 208) [LAROCHE & al 2007f].

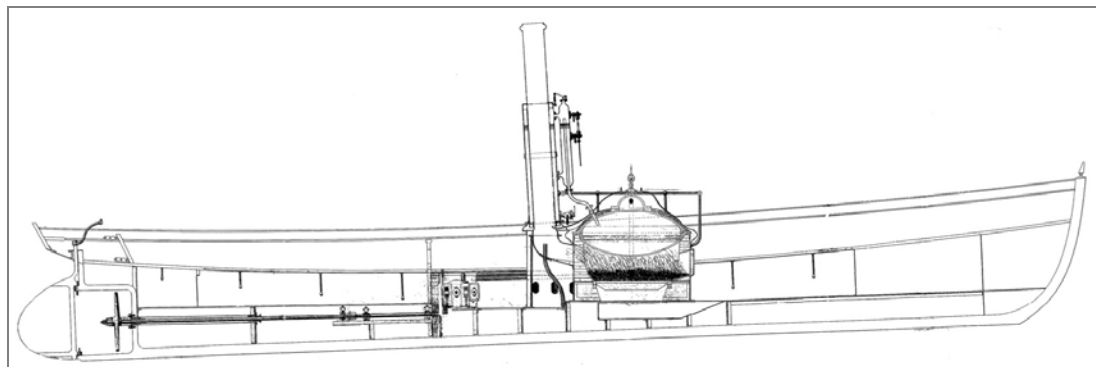


Figure 208 : CANOT A VAPEUR, VUE DE TRIBORD COUPE DU PLAN DE 1860

Le canot, avec 10 mètres de longueur, a sa chaudière positionnée en son centre. La sortie du foyer est connectée directement à la cheminée. Cette dernière est renforcée par des armatures métalliques. La machine à vapeur est disposée à l'arrière de la chaudière. Des instruments de contrôle et des systèmes de sécurité sont également installés sur la chaudière.

Mais, à la vue des croquis, des interrogations et des particularités peu communes pour une conception du 19^{ème} siècle apparaissent.

C'est, entre autre, le cas de l'utilisation d'une chaudière de type bouilleur. En effet, cette technologie n'est plus que brièvement évoquée dans les littératures de l'époque. A cette période, les chaudières tubulaires sont préférées car plus performantes et surtout plus sécurisées.

De plus, le cartouche du plan fait mention d'une vitesse de rotation de l'hélice de 420 tr/min. Considérant le profil de l'hélice dessinée, cette valeur met en doute la réelle efficacité du bateau.

L'objectif du *rétro-processus de conception patrimoniale* est donc formalisé :

Quelle est la finalité d'utilisation de ce bateau en 1861 ?

⁵¹⁰ Source : [MM 1860]

⁵¹¹ Source : [EM 1862]

Plusieurs hypothèses sont avancées :

1. *Bateau relais* pour transporter les officiers de la Marine depuis les grands navires ne pouvant accoster sur les rives à cause d'une eau peu profonde ?
2. *Prototype* de test pour les profils d'hélices ? Ou pour d'autres technologies innovantes en 1860...

Ainsi, pour pouvoir expliquer le fonctionnement du canot, comprendre son dimensionnement ainsi que les choix techniques réalisés à l'époque, l'équipe projet vise la constitution d'un guide de conduite du canot à vapeur.

7.2.2.2 Un projet interdisciplinaire : quelles interactions ?

Comprendre ***l'objet*** dans son temps présent avec les ***outils*** modernes requiert une mise en perspective avec le passé. La complexité du bateau a donc nécessité de créer une équipe inter-disciplinaire.

A ces fins, les gens de la Navale sont à la base du projet : ils possèdent le savoir-faire technique et peuvent apporter des réponses aux technologues contemporains sur la/les technologie(s) employée(s), les matériaux, le mode de fabrication de l'époque...

En complément, les historiens des techniques envisagent le fonctionnement du ST⁵¹² au regard de leurs connaissances de ST parallèles. Ils replacent ***l'objet*** dans son ***contexte*** historique, donc dans le ***schème fonctionnel*** : production industrielle, évolution technique... De plus, ils sont les seuls capables de *traduire* les documents techniques anciens dans un langage compréhensible par l'ensemble de l'équipe de sauvegarde patrimoniale. Plans, brevets, rapports d'essais, livres de formation de techniciens... ces ***sources*** sont indispensables à la réussite du projet.

A ce panel d'experts de l'histoire, il est possible d'adjoindre des bibliothécaires, des archivistes...

De plus, il faut mettre en place une cellule de technologues dont les compétences couvrent l'ensemble des technologies utilisées. Le choix des métiers est souvent difficile car la sémantique employée il y a 150 ans a pu évoluer au cours du temps et les disciplines peuvent ne plus exister ou avoir été renommées.

S'agissant d'un projet universitaire, l'objectif est de proposer aux étudiants de découvrir une technologie révolue. Outre leur fonction d'encadrants, les enseignants sont dès lors également considérés comme des experts. Ils donnent des conseils sur la démarche à suivre, des pistes pour lever les hypothèses soulevées par les étudiants...

Ce travail *d'archéologie industrielle* a donc regroupé des étudiants :

- mécaniciens de l'IUT de l'UNIVERSITE de NANTES : projet de conception,
- thermiciens de l'ECOLE POLYTECHNIQUE de l'UNIVERSITE de NANTES : stage d'ingénieurs.

⁵¹² ST = Système Technique

On notera également la présence d'un Master Patrimoine de la Fac de Lettres de l'UNIVERSITE de NANTES en charge du travail d'archiviste. Cette étudiante était, elle, encadrée par des enseignants historiens.

Enfin, à l'issue de la constitution d'un premier **Dossier d'œuvre patrimoniale technique**, il convient d'intégrer des spécialistes multimédia et des informaticiens pour envisager une vulgarisation grand public. Il s'agit d'une 2^{ème} phase sur laquelle nous reviendrons dans le bilan de ce cas d'étude.

Les discussions entre les étudiants et ces acteurs d'horizons inhabituels pour eux soulignent la richesse et l'ouverture apportées par le projet : l'ensemble des intervenants ayant à cœur de partager leurs connaissances.

7.2.2.3 Le processus de rétro-conception patrimoniale : premières approches et confrontations temporelles de deux époques

Le plan du canot à vapeur est la première donnée d'entrée. C'est un maigre point de départ bien que quelques chiffres soient mentionnés : dimensions de la machine et de ses équipements, surfaces de chauffe, vitesse de rotation de l'arbre de transmission et pression dans la chaudière.

A la lumière des **connaissances** contemporaines de l'équipe projet, une première analyse des plans fait apparaître les principaux équipements fonctionnels :

1. coque et châssis,
2. chaudière et foyer,
3. pompes et injecteurs,
4. machine à vapeur et système de transmission.

Ces éléments sont connectés entre eux par trois circuits de fluides : eau, vapeur et fumées.

Mais ces premières analyses sont encore floues : des informations complémentaires étaient donc nécessaires. Grâce aux archives du PHI et à des ouvrages généraux de l'époque, les recherches dans la littérature historique ont permis de retrouver :

- des dessins techniques de ST similaires,
- des descriptions des principes utilisés,
- des renseignements sur les matériaux employés à l'époque,
- de nombreuses indications chiffrées sur le cycle thermodynamique :
 - températures,
 - pressions,
 - débits,
 - consommations,
 - puissances,
 - rendements...

Ces données sont des indications généralement fournies par l'expérience. Elles ne sont valides que si adaptées aux conditions initiales de ***l'objet*** étudié. Néanmoins, elles permettent de restreindre les hypothèses en les rendant plausibles par rapport au ***contexte***.

Les paramètres de conception du canot n'étant pas encore tous déterminés, des informations complémentaires ont été apportées par les ***sources*** administratives historiques de l'entreprise : correspondances, dépêches ministérielles et rapport d'essai du canot⁵¹³. Ces ***sources*** exprimées dans un langage pourtant non technique confirme la réelle fabrication de ce bateau comme prototype et apportent des informations supplémentaires sur :

- la modification de la cylindrée de la machine à vapeur,
- la consommation de charbon,
- la confirmation de la pression et de la vitesse de rotation de l'hélice.

La majorité des systèmes présents sur le canot à vapeur sont des technologies qui ne sont plus utilisées. De plus, les mécanismes des transferts thermiques sont aujourd'hui connus. Les lois décrivant les phénomènes physiques sont de réelles équations formelles démontrées et non plus empiriques comme il y a cent cinquante ans : c'est le concept des *boîtes noires / boîtes blanches*.

Malheureusement, de nos jours, ces théories récentes s'appliquent uniquement pour de nouveaux ***objets*** contemporains. Aucune application des méthodes de calcul modernes aux technologies présentes sur le canot n'est retrouvée : cette conception ancienne est donc obsolète. Par exemple, les transferts de chaleur dans le foyer et la cuve de la chaudière ou la combustion du charbon ne se fait aujourd'hui que par pulvérisation⁵¹⁴.

Aussi, le problème est considéré à la base en imaginant le *processus de conception* suivi par le dessinateur de 1861 [LAROCHÉ & al 2007g].

Chaque sous-système du bateau est alors étudié séparément. Faisant intervenir un nombre important de paramètres, beaucoup sont communs à plusieurs éléments et ont été obtenus par calcul. Mais pour d'autres paramètres, il s'agit de compromis entre une estimation par l'expérience des ***technologies*** contemporains ou un croisement entre les tables de documents anciens et de documents modernes. Ainsi, en raison des nombreuses incertitudes sur plusieurs données, l'ensemble des analyses thermodynamiques est réalisé paramétriquement en se focalisant sur des ordres de grandeur.

⁵¹³ Source : [EM 1862]

⁵¹⁴ Toutefois, il convient de préciser que la pulvérisation utilisée pour condenser la vapeur détendue est déjà en usage dès le 18^{ème} siècle (NEWCOMEN puis WATT...)

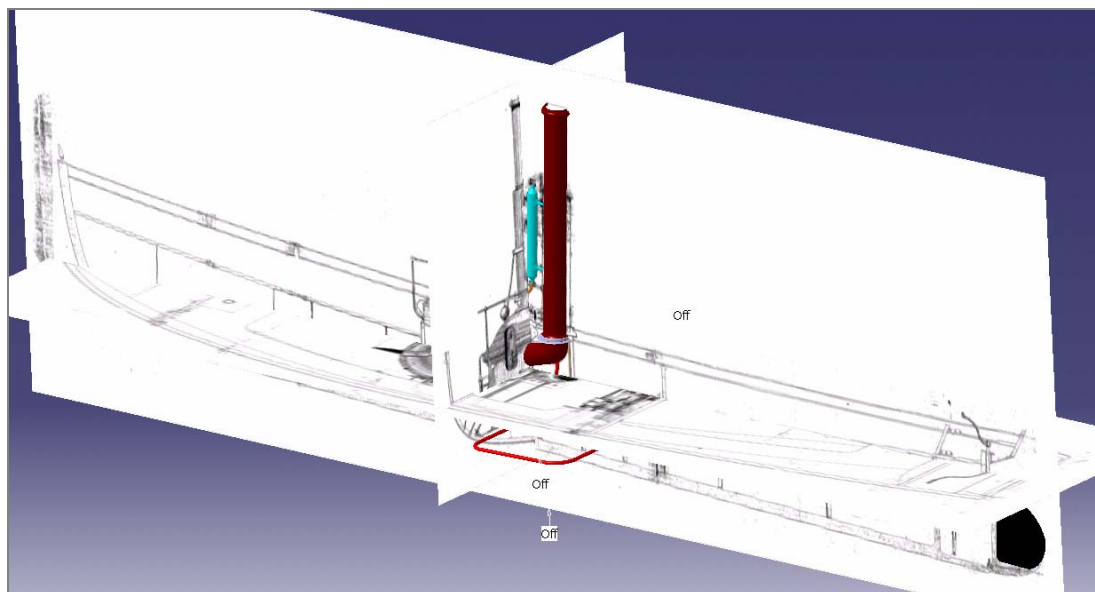


Figure 209 : CANOT A VAPEUR DE 1861, INTEGRATION DES VUES DU PLAN D'ENSEMBLE DANS L'ENVIRONNEMENT DE CAO

Afin d'obtenir les données relatives aux dimensionnements de la machinerie, nécessaires pour les calculs de thermodynamique, le bateau a en parallèle été reconçu en CAO. Ne possédant pas la machine réelle, la phase de prise de cotes ou de numérisation 3D de *l'objet* en est tronquée. La seule donnée de départ est le plan de 1860 restauré. Les différentes vues du plan d'ensemble ainsi que les plans de mécanismes similaires retrouvés dans les archives ont directement été intégrés dans l'environnement de CAO avec un facteur 10 pour obtenir une définition à l'échelle 1:1 (figure 209). Cet anachronisme du rapport *outil* du présent avec des *sources* du passé vieilles de 150 ans démontre, une fois encore, la *multi-temporalité* entre les *schèmes d'usages* validant ainsi le méta-modèle du *DHRM*.

Ne pouvant démonter une machine inexistante (!), son appropriation par les technologues est rendue plus difficile et des questions techniques subsistent. Pour lever les incertitudes, les discussions avec les historiens sont très importantes car elles permettent de cerner *l'objet* dans le *contexte* historique de ses mécanismes.

Grâce aux *sources* généralistes et spécialisées sélectionnées par les *historiens*, les *connaissances* externes produites ont permis de comprendre et de modéliser les détails non visibles sur le plan. C'est le cas des parties internes des injecteurs, des pompes... Elles proposent également différents matériaux utilisables à l'époque... Il s'agit d'informations que les *concepteurs mécaniciens* contemporains ne peuvent interpréter car les techniques modernes ne les utilisent plus.

Par exemple, l'hypothèse de fabrication d'une coque en métal par rivetage a été validée. De nos jours, le soudage est usuellement préféré. Ce fait confirmerait qu'il s'agit d'un prototype : ce canot est bien plus qu'une simple annexe de l'estuaire mais un vrai banc d'essai grandeur nature.

7.2.3 ANALYSES DES COMPOSANTS DU CANOT A VAPEUR⁵¹⁵

Le canot à vapeur modélisé sous CATIA V5 se présente selon la vue d'ensemble 3D de la figure 210. Les avatars⁵¹⁶ sont présents dans le modèle CAO pour donner une notion d'échelle.

Détaillons maintenant les principales sous-parties fonctionnelles en analysant les interactions développées entre les métiers inter-disciplinaires intervenant lors du *rétro-processus de conception*.

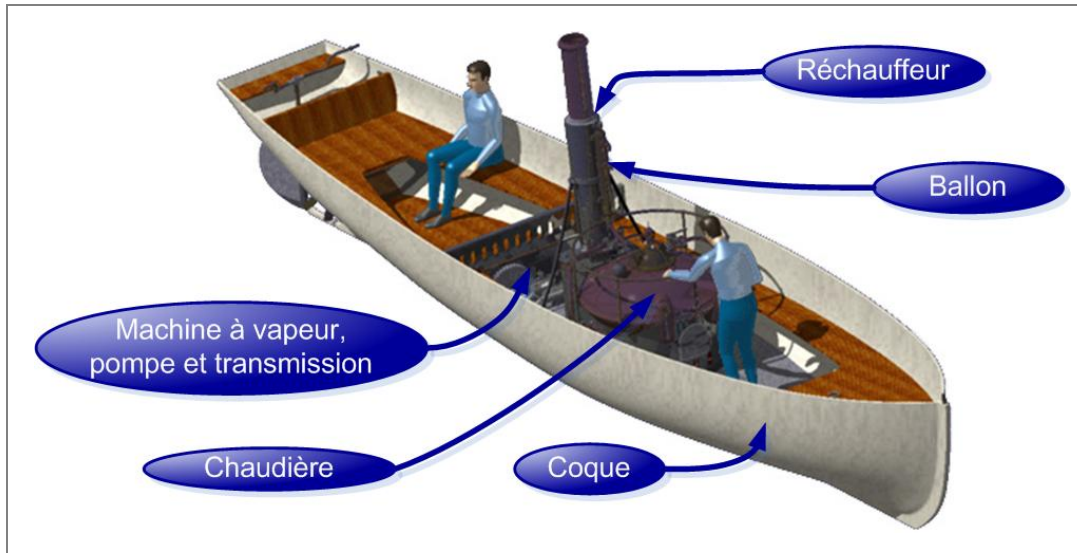


Figure 210 : CANOT A VAPEUR DE 1861, MAQUETTE VIRTUELLE FONCTIONNELLE CAO

7.2.3.1 La coque : reconception d'une pièce surfacique complexe

La navale est un métier nécessitant un savoir-faire acquis souvent de génération en génération. De plus, certaines étapes de base demandent de la pratique : c'est le cas de la conception de la coque qui, au 19^{ème} siècle, requiert une capacité développée grâce à l'expérience : le **projeteur** doit tout d'abord se représenter mentalement le bateau en 3D ; puis il dessine sur papier les projections des arêtes saillantes sur plusieurs vues 2D.

De nos jours, la conception d'une coque de navire se réalise grâce à la CAO. Le **dessinateur** n'a plus besoin d'imaginer mentalement la coque car il la conçoit directement en 3D.

Dans le cas du canot à vapeur, le dessin d'ensemble ne présente pas les arêtes saillantes : il s'agit d'une vue plus esthétique que fonctionnelle. Aussi, les **membres du PHI** ont traduit le plan de 1860 pour être interprété directement par les étudiants **mécaniciens**. Les plans 2D du squelette en vue de dessus, vue de tribord, vue de face-babord et vue face-tribord sont ensuite directement intégrés dans l'environnement de **l'outil** 3D. Grâce à

⁵¹⁵ Sources : [JOLLY & al 2007] et [BABIN & al 2007]

⁵¹⁶ Avatar = appellation donnée à un mannequin numérique dans le domaine de la Réalité Virtuelle

l'utilisation du module Générative Shape Design de CATIA V5, chaque arête de la coque est reproduite en 3D. Quelques retouches sont ensuite nécessaires pour lisser la coque. Enfin, les planchers et traverses de renforts sont réalisés grâce au module classique de dimensionnement de composants 3D. L'annexe 38 illustre cette démarche : les différents dessins successifs depuis les plans 2D papier traduits par les membres du PHI grâce à leurs connaissances du domaine de la navale jusqu'à l'obtention de la coque en 3D.

On notera que durant l'assemblage, plusieurs erreurs de dimensionnement dans les plans originaux de la coque sont apparues mais ont pu être résolues grâce à l'utilisation d'un **outil** 3D intégré.

7.2.3.2 Le foyer et la chaudière

L'énergie primaire nécessaire à la production de la vapeur est fournie par du charbon, de la houille ou du coke. Le combustible est introduit par la porte avant de la chaudière, directement sur la grille du foyer au dessus du cendrier. L'air frais nécessaire à la combustion est aspiré de l'extérieur par un tirage naturel traversant les grilles. Les fumées de combustion générées sont évacuées vers la cheminée.

La cuve placée directement au dessus du foyer contient de l'eau. Le combustible incandescent fournit alors la chaleur nécessaire pour chauffer l'eau qui atteint son point de saturation puis se transforme ensuite en vapeur. On notera que les calculs de rendement thermique démontrent qu'au niveau de la chaudière, plus de 75 % de la puissance issue de la combustion est perdue.

D'autres composants secondaires tels que des vannes, le niveau d'eau, le manomètre et quelques tuyaux viennent compléter l'assemblage du groupe chaudière. La figure 211 est un extrait du plan de 1860 comparant la faisabilité de conception de la chaudière avec la maquette numérique CAO de la figure 212.

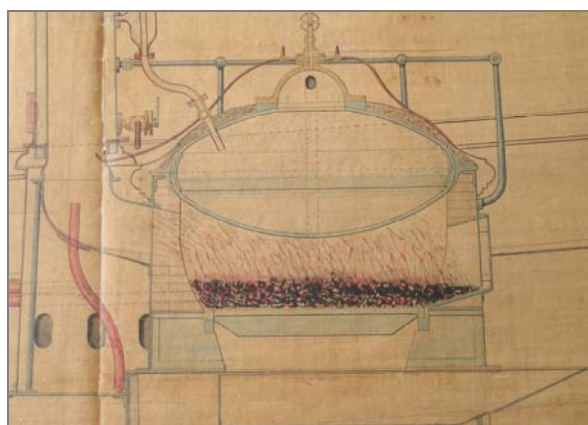


Figure 211 : CANOT A VAPEUR DE 1861, DETAIL DE LA CHAUDIERE DU PLAN D'ORIGINE

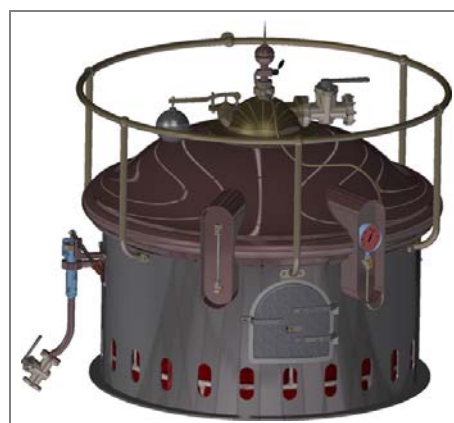


Figure 212 : CANOT A VAPEUR DE 1861, MAQUETTE CAO DE LA CHAUDIERE

Durant la phase de compréhension de cet élément central du canot, l'ensemble des métiers inter-disciplinaires du *processus de rétro-conception patrimoniale* a collaboré pour résoudre deux problèmes :

- Le premier consistait à obtenir la surface d'échange thermique du récipient d'eau chaude. Après reconception en 3D de la cuve à géométrie en demi-sphère élipsoidale, les **mécaniciens** ont directement mesuré la surface sur la DMU apportant ainsi la réponse attendue par les **thermiciens**.
- La deuxième difficulté résidait dans les propriétés de la nature du combustible utilisé : l'intégralité des calculs thermiques repose sur cette hypothèse. Mais ces informations étaient, *a priori*, totalement inconnues. Pour obtenir des données exploitables, les **archivistes du PHI** ont retrouvé une correspondance datée du 17 octobre 1861 faisant état du renouvellement des commandes de charbon des mines de BLANZY dans le bassin du CREUSOT⁵¹⁷. En considérant la quantité de la commande, ce courrier sous-entend que le MINISTERE DE LA MARINE a utilisé ce type de charbon pour tous ses sites en 1861 et qu'il souhaite renouveler ce partenariat exclusif pour 1862. Le charbon extrait des mines de BLANZY est en majorité de la houille maigre, également appelée houille anthraciteuse dont les sources historiques généralistes fournissent des tableaux de correspondance des pouvoirs massiques⁵¹⁸. Les **thermiciens** ont ainsi pu poursuivre leur étude.

7.2.3.3 L'alimentation en eau et l'injecteur Giffard

L'eau nécessaire à la production de vapeur est directement aspirée de la rivière par trois systèmes de pompage intervenant successivement dans le cycle de fonctionnement du bateau :

1. Au démarrage ou en cas d'avarie, une première pompe manuelle à bras permet l'alimentation.
2. En utilisation normale, une pompe alimentaire est entraînée par la machine à vapeur que nous détaillerons ci-après. L'alimentation d'eau provenant de la rivière dans le système s'effectue par une tuyauterie placée en partie inférieure de la coque et un refoulement est placé au dessus de la ligne de flottaison. Une troisième canalisation permet de conduire l'eau aspirée. Le réglage de la pression s'effectue par une molette agissant directement sur le bouchon positionné à l'entrée de la pompe.
3. Après l'accostage du canot, suite à l'inertie de la chaudière, la génération de vapeur est toujours importante. Elle impose une alimentation continue d'eau jusqu'à refroidissement du foyer pour éviter une détérioration de la cuve due à des écarts de températures trop élevés.

⁵¹⁷ Source : [MB 1861]

⁵¹⁸ A cette époque, on utilise le terme *pouvoir massique* pour mentionner ce qu'il est appelé de nos jours *pouvoir calorifique* [DEJUST 1919].

Afin d'optimiser le pompage, un injecteur hydraulique est ajouté. Mais la compréhension de cet élément à haute précision par rapport aux autres composants du canot ne fut pas sans difficulté. En effet, le plan de 1860 ne le détaille pas en coupe. C'est lors d'une discussion chez des amis que l'un des **membres du PHI** mis au jour une liasse de plans de détails de cette technologie.

Il s'agit d'un injecteur GIFFARD. Avec son appellation, les recherches historiques en furent simplifiées : des **sources** spécialisées de l'époque validèrent le fait que ce composant était couramment utilisé au 19^{ème} siècle dans la marine⁵¹⁹. Le fonctionnement repose sur le principe de l'effet VENTURI. Le débit du système est réglé en manœuvrant l'aiguille filetée tel qu'illustrée par la figure 213.

De plus, notons que les trois circuits d'eau d'alimentation peuvent être gérés indépendamment par l'intermédiaire de vannes. Cependant, ces vannes d'arrêt n'étant pas exclusives, il semble possible d'utiliser la pompe alimentaire et l'injecteur GIFFARD en simultané.

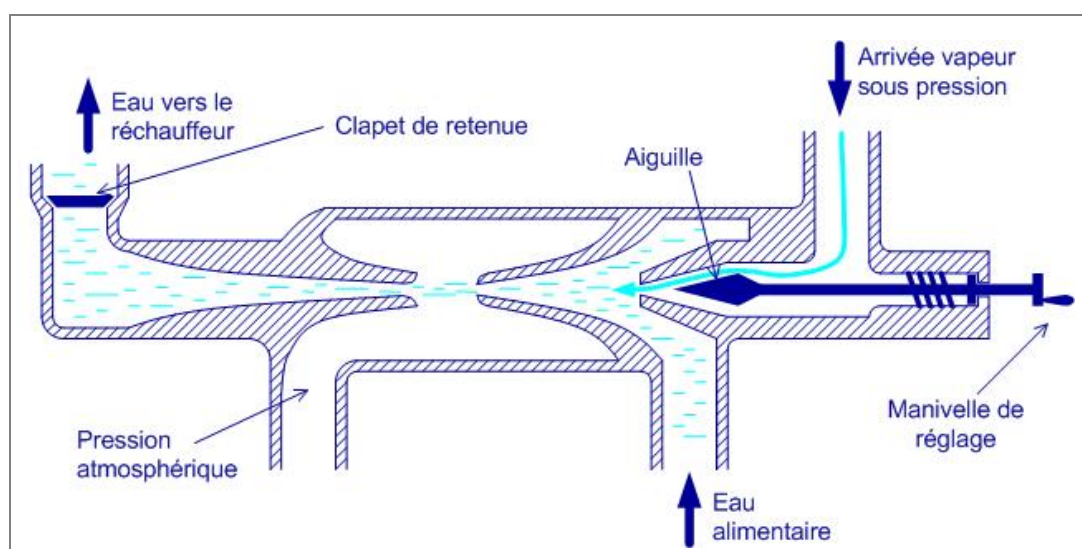


Figure 213 : CANOT A VAPEUR DE 1861, SCHEMA DE L'INJECTEUR GIFFARD

7.2.3.4 Le réchauffeur et le ballon d'eau alimentaire

Quelle que soit la phase de fonctionnement, entre le pompage et la cuve, l'eau est envoyée vers le réchauffeur pour être préchauffée.

⁵¹⁹ Source : [LEDIEU 1862]

La cheminée et le réchauffeur ne font qu'un. Le système se compose de deux cylindres :

1. La fumée circule dans le cylindre intérieur et le chauffe.
2. L'eau passe alors entre les deux cylindres, autour de la cheminée. Elle bénéficie d'une augmentation de température grâce à l'échange thermique produit par la rémanence calorifique des fumées. Les calculs thermiques ont évalué à 41°C la température de l'eau en sortie du réchauffeur.

De plus, le réchauffeur est connecté à un ballon d'alimentation adossé à la cheminée et situé au dessus de la chaudière. Il s'agit là d'un des premiers appareils d'alimentation des chaudières mais peu utilisé à l'époque⁵²⁰. En effet, le ballon exige une attention constante car doit être alimenté de façon périodique.

Le ballon est constitué d'un cylindre vertical. Un niveau indique la hauteur d'eau dans le réchauffeur. Une tubulure, la crépine, placée à l'intérieur du ballon permet de conduire l'eau jusqu'à la cuve de la chaudière. Cependant, l'eau n'est libérée que si celle-ci atteint l'extrémité haute de la crépine. L'eau est représentée en bleu foncé dans la vue de détail en coupe de la figure 214.

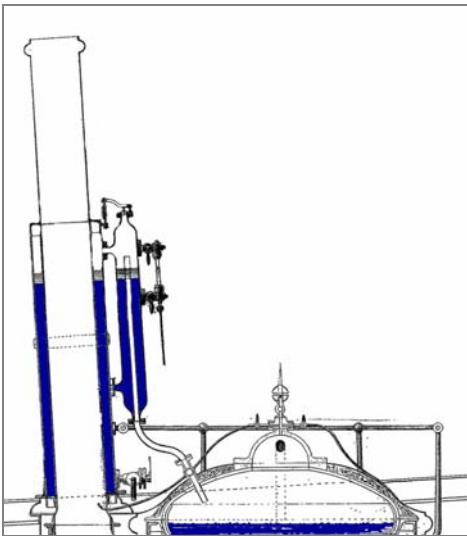


Figure 214 : CANOT A VAPEUR DE 1861, DETAIL DU RECHAUFFEUR ET DU BALLON D'ALIMENTATION

En marche de fonctionnement normal, l'alimentation en eau du réchauffeur est assurée par l'injecteur GIFFARD gagnant ainsi en puissance car n'utilisant pas la pompe mécanique. Cependant, en contre partie, l'injecteur fonctionnant avec une différence de pressions, une partie de la vapeur produite par la chaudière doit être détournée.

Arrivée au terme de l'étude **thermique**, un schéma du système avec injecteur GIFFARD en fonctionnement figure en annexe 39.

⁵²⁰ Source : [DEJUST 1919]

7.2.3.5 Transmission : machine à vapeur, arbre et hélice

La vapeur saturée générée dans la chaudière est conduite par des tuyauteries vers la machine à vapeur. Le fonctionnement de ce système mécanique est tel que décrit précédemment au chapitre 4 dans le cas d'étude de la machine FIGUET, aussi nous ne le détaillerons pas ici.

Depuis la combustion du charbon jusqu'à l'entrée de vapeur dans le cylindre du piston, le rendement théorique est de 18 %, soit 5 % de pertes dans la tuyauterie.

Le mouvement alternatif du piston est converti en rotation par un excentrique. La non utilisation d'un système bielle-manivelle classique s'explique sûrement par la nécessité de limiter l'encombrement de la machine à vapeur dans le canot. De plus, considérant le guidage du piston réalisé par des liaisons glissières appuis-plans, l'expertise des *historiens* spécialistes des machines à vapeur confirme que le système est réversible et que le bateau peut naviguer en marche arrière.

Enfin, sur l'arbre de sortie, deux autres excentriques entraînent la commande des tiroir-plans ainsi que la pompe à eau. Un système d'engrenage avec un rapport de multiplication de 2 met en rotation l'hélice du canot à vapeur. Sur le plan d'origine de 1860, il est fait mention que la vitesse de rotation théorique de l'hélice est de 420 tr/min. De plus, les sources historiques confirment que la puissance de la machine à vapeur serait de 2 chevaux et la vitesse du bateau de 6 nœuds⁵²¹.

La figure 215 est une vue globale du système de transmission avec, au premier plan : la pompe et son excentrique ainsi que la commande des tiroir-plans avec le deuxième excentrique.



Figure 215 : CANOT A VAPEUR DE 1861, MAQUETTE CAO DE LA TRANSMISSION

On notera que durant la phase de re-conception de la transmission, les *mécaniciens* ont été confrontés à des problèmes de correspondances selon le plan de 1860. Entre autres, l'arbre de l'hélice mesurant 3 mètres de long, il possède trois paliers intermédiaires pour le maintenir en position. L'axe étant placé sous le pont du bateau, des burettes de lubrification pour les paliers sont accessibles via des trappes. Erreur de dessin, d'inattention ou manque

⁵²¹ 1 nœud = 1.852 km/h

de compétence, entre les vues de côté et de dessus, ces orifices ne sont pas positionnés au dessus des burettes. Lors de la fabrication, les plans de conception ont donc dû être modifiés. Cependant, aucune autre **source** n'a été retrouvée pour valider cette hypothèse.

7.2.4 GENERALISATION : VERS DES EQUIPES PROJETS INTER-DISCIPLINAIRES POUR LA PATRIMONIALISATION

7.2.4.1 Conclusion et perspectives du projet canot

L'étude d'une embarcation à vapeur du 19^{ème} siècle est un sujet pédagogique peu ordinaire. Avec une haute technicité, **l'objet** a demandé une réelle capacité d'appropriation du sujet par les **étudiants**. Elle les interpelle pour plusieurs raisons :

- ils n'ont jamais vu ces machines en situation,
- la conception est différente des logiques de conception qu'ils connaissent,
- les principes physiques employés ne sont plus utilisés aujourd'hui,
- ...

Ces projets permettent de couvrir un domaine très large des *compétences* acquises durant la formation. Le témoignage des deux élèves ingénieurs thermiciens en stage de fin d'études est un exemple marquant :

Nous avons dû faire appel à nos connaissances dans tous les modes de transferts thermiques, en mécanique des fluides, en combustion, en échangeurs ou en méthodes numériques. C'est l'intégralité de nos cours suivis pendant trois ans d'études que nous avons appliquée.

Cependant, des **sources** documentaires historiques sont indispensables afin d'aider à la compréhension de certains mécanismes. De plus, il est à noter que ces données ne sont plus protégées par la confidentialité industrielle comme c'est le cas sur les systèmes complexes récents favorisant ainsi la multiplicité de potentiels *projets patrimoine*.

Grâce aux requêtes des **technologues**, les **historiens** ont fait apparaître des documents pour lesquels ils n'estimaient pas la valeur technique qu'ils peuvent apporter à l'étude. Ainsi, un corpus documentaire de plus de vingt documents précis de l'histoire de **l'objet** canot à vapeur dans son **contexte** de 1860-1862 a pu être réalisé par le Master Patrimoine (voir annexe 40). Une fois encore, on peut remarquer l'intérêt d'une structuration du corpus documentaire en corrélation avec les disciplines requises afin d'exploiter un ensemble cohérent : c'est le **DHRM**.

Au bilan, dans une certaine mesure, le canot a été réinventé ; tout en sachant qu'il a existé et fonctionné, mais sans connaître réellement comment il était [LAROCHÉ 2007b]. Aussi, l'écart à la **réalité** est difficile à estimer et peut-être seul une reconstruction

à échelle 1:1 fonctionnelle permettrait de valider l'ensemble de ce prototype de canot⁵²². En effet, des incertitudes demeurent sur le nombre de personnes pouvant être embarquées et donc sur sa finalité exacte. Obtenir un guide de conduite nécessite de lever certaines hypothèses comme la perte de rendement de 5 % entre la chaudière et l'admission de la machine à vapeur. Ne faudrait-il pas envisager une isolation thermique même si elle n'est pas représentée sur le plan d'origine ? Quel matériau était utilisé à l'époque ? Quel coefficient prendre en compte ? Des précisions pourraient également être apportées sur la résistance mécanique de la chaudière ou du bateau dans sa globalité, sur la résistance à l'avancement par des simulations fluides, sur la redéfinition du processus de conception de 1860 par les documents administratifs de l'époque... autant de données requises pour lesquelles les recherches archivistiques n'ont encore pu aboutir.

Au-delà de l'aspect technique, la complexité de l'objet a impliqué de multiples acteurs (étudiants, enseignants, industriels) ayant chacun leur spécialité (patrimoine, histoire, thermique, mécanique). Afin de confronter plusieurs visions du projet avec des objectifs différents dans un seul but commun, chaque semaine une revue d'avancement interdisciplinaire assura un suivi du travail des étudiants. Cet enrichissement par un partage de pratiques créa une dynamique pluri-culturelle.

7.2.4.2 Les métiers du rétro-processus de conception

A l'illustration de ce cas d'étude, nous avons démontré que les métiers présents dans ces nouveaux types de *projets inter-disciplinaires* diffèrent de ceux usuellement concernés par un *projet de conception standard*. En effet, faire cohabiter des **mécaniciens** et des **informaticiens** avec des **archéologues**, des **historiens** ou des **anthropologues** n'est pas aisé [LAROCHE & al 2007h].

Dans cette première phase *d'archéologie industrielle avancée*, chaque compétence intervient de façon précise dans le *rétro-processus de conception*.

Les tâches s'effectuent non pas en série mais en parallèle *contributif* : il ne s'agit pas d'un *processus de collaboration* mais d'une réelle *ingénierie coopérative*. Par exemple, les données de sortie d'un métier n°1 sont nécessaires aux données d'entrée du métier n°2 mais ce même métier n°2 va produire de nouvelles **connaissances** que le métier n°1 va réutiliser ; l'itération est perpétuelle et est synchronisée entre toutes les compétences.

De plus, à chaque typologie **d'artefact** étudié, le *processus de coopération* est différent. Notons également que certaines compétences existent mais que d'autres ne sont pas

⁵²² On notera toutefois qu'actuellement, ces premiers travaux font l'objet d'une deuxième phase orientée sur la valorisation de la démarche à l'aide d'une vidéo descriptive.

encore formalisées dans le sens où le/les métier(s) ne porte(nt) pas encore d'appellation(s) pour le(s) désigner. On pourrait ainsi imaginer un nouveau type de formation à destination d'un métier qui deviendrait celui d'*ingénieurs-historiens*, au service de la genèse des produits et de leurs technologies associées [COTTE 2007b].

Cependant, la classe **Homme** permet d'encapsuler ces multiples compétences. **L'Homme** manipule alors l'ensemble des classes d'équivalence *multi-temporelles* et *multi-dimensionnelles* du **DHRM** en naviguant dans l'intégralité de son domaine ontologique. D'une façon générale, l'instanciation de la classe d'équivalence **Homme** se décline par la typologie de métiers de la figure 216.

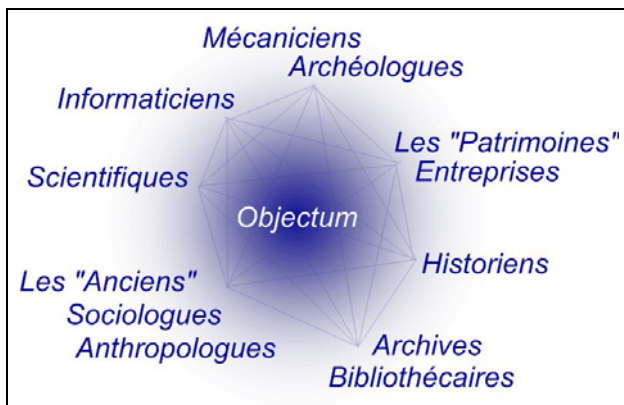


Figure 216 : LE RESEAU DE COOPERATION DES METIERS D'UNE EQUIPE INTER-DISCIPLINAIRE DE RETRO-CONCEPTION PATRIMONIALE

On distingue :

- Les **technologues spécialistes des domaines scientifiques** mis en œuvre pour comprendre les principes de base de fonctionnement de **l'objet**.
- Les **technologues à vocation mécanicienne** qui analysent **l'objet**, le reconçoivent, le modélisent en 3D et simulent ses situations dynamiques **d'usages**. Les mécaniciens assurent également en partie le travail *d'archéologie industrielle* sur site.
- Les **technologues experts en informatique** pour mettre en œuvre la base de **connaissances** et le **DHRM** déclinés à partir du **Dossier d'œuvre patrimoniale technique**. Les informaticiens règlent également les problèmes d'interopérabilité des **outils** numériques et de leurs fichiers depuis la numérisation 3D jusqu'au portage dans une application de Réalité Virtuelle ou autre...
- Les **personnes ressources** possédant le savoir-faire implicite, en général des *anciens* de la société. Ils peuvent être accompagnés dans leur démarche par des **sociologues** ou des **anthropologues** menant des enquêtes ethnologiques afin d'adapter le discours au langage contemporain.
- Les **personnes connaissant parfaitement le milieu du patrimoine**; ce sont traditionnellement les commanditaires du projet. Ils sont en général en étroite relation avec l'entreprise dans laquelle **l'objectum** a vécu ; ils donnent accès aux nombreuses **sources** privées lorsque celles-ci existent.

- Les **bibliothécaires** et les responsables des centres d'archives départementales, régionales ou nationales (BIBLIOTHEQUE NATIONALE DE FRANCE, Musée des ARTS-ET-METIERS, INPI...) dans lesquelles se trouvent une majorité des **sources** généralistes nécessaires à l'équipe inter-disciplinaire.
- Les **historiens**, spécialistes de la thématique concernée. Ils aident les scientifiques et les technologues dans leurs démarches en réalisant les interfaces avec les personnes détenant les **connaissances** et/ou le **savoir-faire**. Les historiens assurent également la *traduction* des documents anciens afin de les rendre compréhensibles par les spécialistes contemporains. Ils ont une vision globale de l'évolution de **l'objet** au cours du temps : c'est le métier de généticien [COTTE 2007].

Cependant cette liste n'est pas exhaustive et d'autres compétences sont parfois nécessaires: des **architectes** pour comprendre les bâtiments, des **métrologistes** pour la numérisation 3D... Au bilan, une même personne assurant l'intégralité de ces compétences consisterait en :

1. une nouvelle forme du métier d'**archéologue**,
2. travaillant dans le domaine **industriel**,
3. en utilisant les technologies du **numérique**.

7.3 SYNTHÈSE

Etudier un **objet technique ancien** nécessite de nombreuses *compétences* parfois disparues ou n'existant pas encore. Ceci s'explique essentiellement par le fait que les qualifications et aptitudes requises autrefois ne sont plus exploitées de nos jours.

Malgré tout, d'une manière générale, semblable à un projet de *conception classique contemporain* :

Le processus de patrimonialisation orienté sur sa première phase d'**Archéologie industrielle avancée** met en œuvre une équipe projet collaborative. Afin de rendre interopérable l'ensemble des métiers de la classe **homme**, le langage commun est alors encapsulé grâce à la sémantique du **DHRM** : c'est un méta-modèle produit-processus.

De plus, la découverte d'anciennes technologies, dans un cadre pédagogique, permet de valider le concept de la *spirale patrimoniale* selon laquelle le **DHRM** induit l'inclusion de $A \rightarrow B$ dans un **état** de valorisation $C [f(C)=A \rightarrow B]$. En effet, les étudiants déployant le *rétro-processus de conception* vont découvrir d'eux-mêmes **l'objet technique ancien** et faire ressortir des **connaissances** oubliées de notre culture technique.

En conséquence, dès la phase d'archéologie industrielle avancée ils entament la phase de valorisation.

La structure générale du **DHRM** à un niveau macroscopique évolue alors vers la nouvelle ontologie de la figure 217 établissant des liens entre les classes composants les **états** et les **schèmes d'usage** de **l'objet technique ancien**.

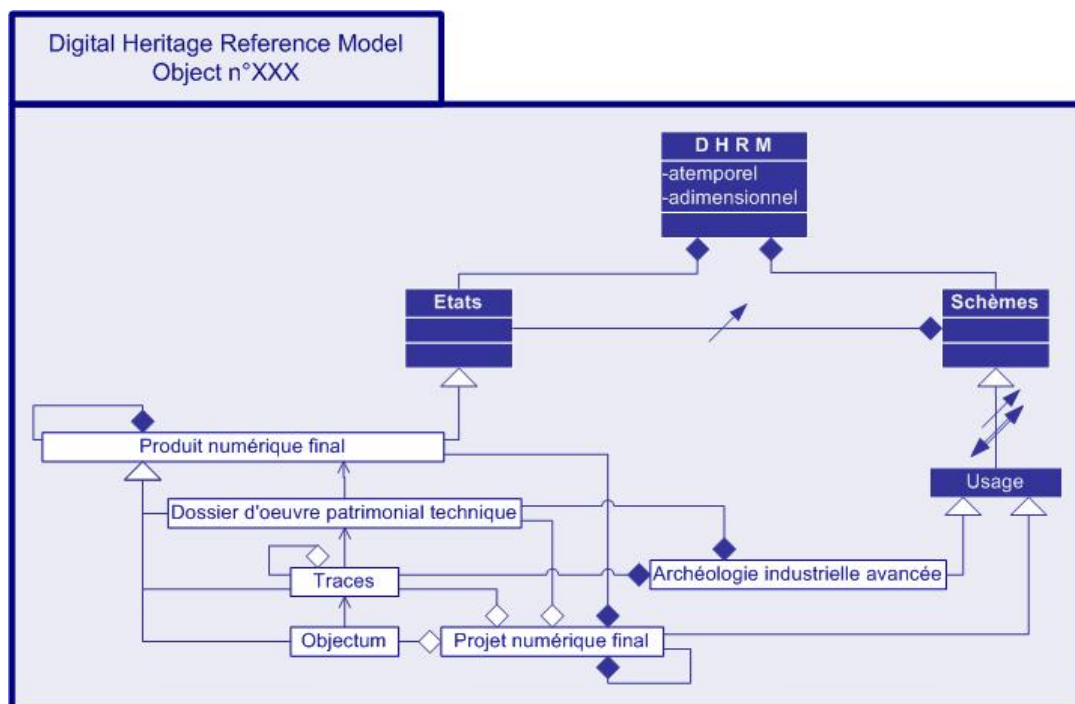


Figure 217 : NOUVELLE VUE MACROSCOPIQUE DU DHRM PAR L'APPORT DE LA VALORISATION EN PÉDAGOGIE

De plus, même si les cas d'études de ce chapitre 7 ont permis de décliner l'application du *rétro-processus de patrimonialisation* comme objet de *valorisation pédagogique*, la phase de *vulgarisation* peut se décliner en de nombreux autres projets de *valorisation* comme spécifiés au chapitre 5.

En effet, grâce à la véracité scientifique de la démarche de conservation socio-technique qui fut aussi exhaustive que possible grâce au **DHRM** ayant permis de constituer le **Dossier d'œuvre patrimonial technique**, la phase de *médiation* pourra reprendre les éléments le composant pour les adapter en fonction des **publics**. Sans cette démarche scientifique fondée comme Louis FIGUIER nous l'a dit il y a plus de 100 ans [FIGUIER 1896], que deviendrait la vulgarisation d'un **objet industriel patrimonial**, porteur d'un message aussi bien anthropologique que technologique ?

C'est l'objet du chapitre 8 qui va, en terme de bilan mais surtout en terme de perspectives, statuer sur cet état C : la valorisation, qui est un déplacement du schème dans l'espace multi-dimensionnel et multi-temporel du DHRM.

Enfin, dans ce bilan du chapitre 7, il est intéressant de remarquer que le cas d'étude de l'imprimerie attire notre attention sur le fait que le domaine de la typographie est, en partie, le support de création et de diffusion de l'ensemble des **sources** du **patrimoine**. Pouvoir en disposer de nos jours nécessite de les conserver et nombre d'initiés se souviennent de la problématique soulevée en 2004 pour la préservation d'un fonds de 30 000 ouvrages anciens de l'IMPRIMERIE NATIONALE [GUILLERME 2004] ainsi que de tout son matériel associé :

*Ces trésors sont propriété de la culture, de la connaissance.
Il ne peuvent échapper au bien commun de l'humanité.*

8. CONCLUSION GENERALE

Dans le chapitre précédent, nous avons analysé deux cas d'études réalisés par des universitaires en partenariat avec des professionnels du patrimoine ou des industriels contemporains. Les rencontres humaines furent très riches grâce à la diversité des acteurs concernés : plusieurs milieux et plusieurs générations.

D'une façon générale, travailler sur les traces d'un objet technique ancien en vue de sa patrimonialisation nécessite des historiens, des cognitivistes, des métrologistes, des mécaniciens... C'est toute une équipe inter-disciplinaire d'un genre nouveau qui est mise en place.

Pour enrichir le **DHRM**, il serait nécessaire d'itérer une nouvelle fois le *processus de patrimonialisation* en intégrant la phase de *valorisation*. A l'aide de nouveaux travaux de recherche et d'experts en sociologie, en ingénierie didactique, en muséographie..., la classe **homme** utilisant le **Produit numérique final** pourrait alors affiner la définition proposée dans la partie 5.2.4.2 de manuscrit : les **émetteurs** et les **récepteurs**. Abordant les principes de base de la science de la communication, l'état C deviendrait une nouvelle forme de médiation muséologique [de BARY & al 1998].

Ces travaux de recherche ayant été soutenus par le MINISTERE DE LA RECHERCHE et le MINISTERE DE LA CULTURE, cette conclusion générale est un compte-rendu scientifique de ces trois années de doctorat :

1. Tout d'abord, nous effectuerons un bilan de la question posée quant à l'interopérabilité potentielle de deux disciplines oeuvrant dans le domaine du **patrimoine industriel**.
2. Puis, nous suggérerons de nouvelles perspectives de recherches à effectuer aussi bien en GENIE INDUSTRIEL qu'en HISTOIRE DES TECHNIQUES ou dans d'autres domaines connexes liées aux potentialités d'évolution du **DHRM**.

8.1 CONTRIBUTION DES TRAVAUX DE DOCTORAT

Les travaux de recherche que nous venons de présenter démontrent que des disciplines appartenant à deux entités administratives distinctes peuvent et doivent cohabiter lorsqu'il est question de **patrimoine technique et industriel** (chapitre 2 et 3).

La démarche d'essai-erreur que nous avons menée à travers de nombreux cas d'études (chapitres 4, 6 et 7) permet d'itérer sans cesse la *méthodologie* et les *résultats* de la thèse (chapitres 3, 5, 6 et 7).

Pour réaliser un bilan scientifique de notre contribution, reprenons le SADT défini en conclusion du chapitre 1. Ces travaux distinguaient plusieurs objectifs :

- un apport épistémologique,
- un apport méthodologique,
- un apport instrumental.
- un apport conceptuel.

8.1.1 LE CONSTAT SUR LA CONSERVATION DU PATRIMOINE TECHNIQUE ET INDUSTRIEL AUJOURD'HUI

En terme de faits et de pratiques du patrimoine, nous avons démontré qu'il existe un phénomène de vieillissement intrinsèque de *l'information technique*. Sur le terrain, les expériences pédagogiques du chapitre 7 laissent transparaître que la question de la transmission du **patrimoine technique et industriel** aux générations futures est en réalité plus cruciale encore que ne le laissent entendre aujourd'hui les instances officielles ou officieuses du patrimoine industriel. Comme Paul VALERY le dit :

La mémoire, c'est l'avenir du passé.

D'une façon générale, une priorité est accordée aux approches d'architecture industrielle. S'orientant vers les stratégies de gestion des territoires et des paysages, une moindre mesure est accordée à l'héritage des machines, des processus industriels ou des savoir-faire ouvriers. Cette situation se comprend aisément :

- en raison d'une meilleure conservation fréquente du **contenant** bâti de l'industrie au détriment du **contenu** en machines, rapidement revendues ou ferrailles,
- mais également par les nécessités souvent impérieuses de la restructuration urbaine et des projets de réutilisation et de réaffectation entrepris par les collectivités.

Ainsi, la faible place de la culture technique en FRANCE ne favorise pas, pour l'instant, l'approche que nous proposons. Certaines démarches de réhabilitation architecturale revendiquent même une coupure avec le passé privilégiant les cotations immobilière et foncière à la valeur industrielle intrinsèque [SMITH 2006].

De plus, les évolutions géopolitiques dans les systèmes techniques classiques de productions menacent les pays ayant un passé industriel important d'une *perte de mémoire*.

Les conséquences sont sans aucun doute nombreuses et peuvent se situer entre deux pôles opposés :

- pour les branches professionnelles : c'est une disparition irréversible de compétences techniques et industrielles,
- selon le point de vue des observateurs : l'oubli de la valeur ajoutée potentielle que pourrait apporter une culture technique et industrielle pleinement assumée.

Une certaine urgence est donc associée à un tel risque de déperdition de **connaissances**. En somme, ce que les générations actuellement en activité sont encore capables de comprendre en détail n'appartiendra plus aux systèmes techniques des siècles futurs : une solution réside ici dans l'intérêt de la *spirale patrimoniale* du **DHRM**.

La relation **Homme / Machine** reste au cœur des processus technologiques d'hier comme d'aujourd'hui, mais elle est particulièrement délicate à rendre sensible dans les approches traditionnelles de patrimoine ou de muséographie. Le témoignage des collections et des sites du **patrimoine technique et industriel** est généralement statique, alors que par nature, une machine ou un processus industriel est dynamique. Il y a là une contradiction épistémologique fondamentale qui est généralement oubliée ou simplement traitée comme une valeur médiatique [COTTE & al 2005b].

Les éléments apportés par ce travail de recherche n'ont pas pour but de proposer une solution alternative de type *miracle technologique virtuel* en lieu et place des actions de conservation classiques. Il s'agit de prendre conscience des limites imposées par les faits et par les pratiques du patrimoine, pour les compléter, les renforcer, les accompagner et les aider à enrichir leur démarche. Par ailleurs, non seulement le statut numérique possède ses propres limites, mais il pose à son tour de nouveaux problèmes spécifiques, tant pratiques qu'épistémologiques !

8.1.2 UNE METHODOLOGIE POUR TRADUIRE LE PATRIMOINE TECHNIQUE ET INDUSTRIEL

En terme de problématique de la conservation du patrimoine technique et industriel par les techniques numériques, les fondements perçus par l'état de l'art des chapitres 2 et 3 ont été confirmés par le cas d'étude de la machine à vapeur PIGUET du chapitre 4. La seconde phase de conceptualisation a apporté de nombreux éléments complémentaires :

- d'une part en renforçant et en approfondissant les hypothèses de départ par la définition de **l'objet technique ancien** dans le chapitre 5,
- d'autre part en démontrant l'élargissement possible des objectifs du projet par le méta-modèle d'information spécifié dans le chapitre 5 et en validant la démarche par le cas d'étude de la machine à laver le sel de BATZ-SUR-MER du chapitre 6.

Les étapes de la **methodologie** globale ont été définies : depuis la capitalisation des **traces** jusqu'au **produit patrimonial final**, en fonction des différentes stratégies des acteurs impliqués à chaque phase. Il s'agit ensuite d'identifier convenablement les enchaînements des différentes étapes entre elles. L'apport scientifique réside alors dans la démarche **d'archéologie industrielle avancée** mise en place.

De plus, considérant la complexité des **objets techniques anciens** étudiés, l'effort est intrinsèquement envisagé de facture inter-disciplinaire : c'est un nouveau **processus coopératif d'ingénierie**. Plusieurs types de compétences nécessaires à un tel projet ont été identifiés :

- d'une part les métiers couvrant le domaine des sciences humaines et sociales,
- d'autre part les domaines de la recherche des sciences exactes et des sciences pour l'ingénieur.

L'ensemble des **connaissances** acquises en complément de la **maquette numérique de référence**, quel que soit leur domaine d'application et leur niveau d'approfondissement, constitue ce que nous convenons d'appeler, par extension du vocabulaire du patrimoine et de la muséographie : le **dossier d'œuvre patrimoniale technique**. On notera qu'à l'issue de son processus de création, ce dernier peut lui-même prendre le statut de **source** bouclant ainsi le **rétro-processus de patrimonialisation**.

De nouveaux axes de recherche pourraient alors être développés en Génie Industriel afin de comparer le **processus de conception contemporain** et ce **rétro-processus patrimonial** qui s'appuie également sur un **processus de conception** mais appartenant au passé. Une telle mise en corrélation comme sur le cas d'étude du Canot à vapeur de 1861 permettrait alors d'enrichir les pratiques industrielles actuelles en identifiant la concordance ou la non adéquation des différentes phases du processus passé et du processus présent, l'objectif visé étant d'apporter de nouvelles pratiques pour la génération d'innovations en rupture.

8.1.3 QUELLE INSTRUMENTALISATION POUR LA PATRIMONIALISATION ?

Comme l'ont été en leur temps la photographie puis le cinéma, nous sommes sans doute à une césure majeure dans les outils techniques d'étude et de prévision de la réalité matérielle. Les nouvelles compétences apportées par les **outils** de CAO, et plus largement les **outils** de 3D, ainsi que les bases de données tendent aujourd'hui à remplacer ces anciens systèmes archéologiques. Il s'agit là également d'une proposition de conversion d'un système technique ancien dans celui d'aujourd'hui : **l'outil** peut alors être instancié dans la classe **objet technique ancien**.

Le monde technique et industriel est d'ailleurs lui-même à l'origine de cette rupture du numérique où il en est le premier utilisateur, notamment par l'utilisation de la CAO 3D+t. Il est donc indispensable que le domaine du patrimoine le fasse à son tour. Des liens essentiels doivent s'établir avec les bases de **connaissances** déjà engagées par la numérisation des livres, des archives sonores / audiovisuelles ou architecturales. Au vu des expériences menées dans ce travail de recherche, il est nécessaire d'effectuer cette transition aussi tôt que possible en raison du changement de système technique en cours et du risque croissant de déperdition des savoirs et savoir-faire techniques et industriels.

Enfin sur la globalité du **rétro-processus de conception patrimoniale**, l'intégration des **outils** du GI a mis en exergue des spécificités supplémentaires devant être prises en

compte, aussi bien dans la démarche patrimoniale que par itération auprès des fabricants industriels contemporains de matériel de numérisation 3D par exemple.

De plus, les **outils** de CAO étant régis par les lois de la physique et de la dynamique, ils sont trop parfaits pour ces **objets** appartenant à la période *proto-industrielle*. L'implémentation des modèles numériques dans un environnement 3D démontre que ces machines industrielles fonctionnaient en réalité comme des **objets artisanaux**. Ce paradigme induit donc une faible adaptabilité des outils numériques et de leur interopérabilité vis-à-vis du patrimoine : une itération serait nécessaire pour identifier les évolutions à effectuer, entre autre, sur les logiciels cités dans ce manuscrit.

Enfin, précisons que ces modèles numériques ne sont qu'illustrations ou évocations et ne doivent pas être considérés comme un moyen de conservation de l'information au sens rigoureux du terme mais plutôt comme un support à la compréhension. La **maquette numérique de référence** est impérativement associée à ses **connaissances** pour constituer le **Dossier d'œuvre patrimoniale technique**. Ainsi, compte-tenu de la croissance des expériences de virtualisation et la disparité qu'elles entraînent de par une non interopérabilité des **outils** utilisés et la non homogénéisation des modèles d'information les supportant, il est nécessaire de convenir d'une véritable déontologie de la **connaissance** contenue dans le **patrimoine industriel et technique**.

8.1.4 VERS UNE DESCRIPTION CONCEPTUELLE DU DOMAINE ETUDIE

Les archives techniques, les plans et les descriptions de machines sont des documents particulièrement fragiles et disparaissent souvent. Si par chance ces écrits sont retrouvés, ces **traces** révèlent des **informations** essentielles et nécessaires à la compréhension de **l'objet technique ancien**. Le corpus de connaissances considéré pour la patrimonialisation conduit alors à la constitution du **Dossier d'œuvre patrimonial technique**.

Afin de pouvoir cerner **l'objet** dans son intégralité, trois strates de modélisations conceptuelles à partir de cas d'études sont délimitables :

1. le cas d'étude,
2. la conceptualisation du cas d'étude,
3. une généralisation conceptuelle applicable sur plusieurs domaines.

Pour nous aider dans notre démarche de conceptualisation, nous avons utilisé les bases de la modélisation UML. Ce langage étant très riche, seule une partie de la sémantique établie par les diagrammes de classes a été employé. De plus, chaque étude présentant des complexités *multi-dimensionnelle* et *multi-temporelle*, nous avons proposé une simplification de la notation par une autre forme de représentation des classes d'association.

Pour guider la patrimonialisation, nous avons alors élaboré un système d'information encapsulant l'intégralité des classes d'équivalence manipulées : c'est le **DHRM, Digital Heritage Reference Model**.

Celui-ci permet aussi bien de décrire le **rétro-processus de conception patrimoniale** que **l'objet technique ancien** dans ses aspects *internalistes* et *externalistes*. Capitaliser les

propriétés intrinsèques des **objets** apparaît comme une nécessité mais elle est moins évidente pour justifier la conservation du **contexte** de *l'objet*. Et pourtant [PAINLEVE & al 1913] :

Qu'on réfléchisse au progrès réalisé dans toutes les branches de l'activité industrielle. Qu'on songe aux inventions et aux perfectionnements sans nombre appliqués à la mécanique qui est la puissance, sans conteste, du jour. Puissance qui s'impose partout et en tout, de gré ou de force. Puissance qui modifie sans cesse l'état social, l'hygiène, la vie économique, et transforme jusqu'à la face du globe.

Aussi, envisager la classe **objet** sur de multiples niveaux selon une **typologie structurante** induit de rechercher les **usages** du passé de *l'objet*. Par introduction des classes d'équivalence du *triptyque du patrimoine*, ces **usages** définissent des **schèmes** positionnés dans une *temporalité* et une *dimension* données. En diffusant cette modélisation sur l'intégralité du **processus de patrimonialisation**, **l'archéologie industrielle avancée** et la phase de **valorisation** définissent des **états de représentation intermédiaires de l'objet** qui s'inscrivent alors dans de nouveaux **schèmes**.

Mais un **schème** peut également être défini non pas pour une seule *temporalité* et une seule *dimension* mais dans un espace *multi-temporel* et *multi-dimensionnel* complexe. Ainsi, nous avons vu que l'utilisation **d'outils** de numérisation 3D nécessite que le **processus de reverse-engineering contextualisé** élargisse son champ d'investigation en intégrant les dimensions *socio-économico-techniques*.

De plus, la globalisation des **schèmes** à un niveau **architectural** en fonction de la technologie de *l'objet* à un niveau **infrastructural** permet de cerner l'évolution de *l'objet*. Il s'agit là de la notion de génétique abordée au chapitre 3. Cette uniformisation des **schèmes** à travers une structure ontologique commune élabore ainsi un lexique à *multi-temporalités* et *multi-dimensions* permettant aux acteurs du passé, du présent et du futur, et ce quelque soit leur champ de compétence, d'employer la même sémantique.

Enfin, les classes d'équivalence ainsi que les liens les unissant dans le **DHRM** se superposent à la grille de lecture proposée par la convention de l'UNESCO. Le **DHRM** est donc un guide pour valider *l'intégrité* et *l'authenticité* du **patrimoine technique et industriel** voire même pouvant aider à justifier sa *valeur universelle exceptionnelle*.

Cependant, remarquons que les notions élaborées, conditionnées et validées peuvent parfois sembler avant-gardistes. Ici réside l'intérêt de la recherche scientifique fondamentale : ces résultats pourront être utilisés dans un an, dans un demi siècle ou ne jamais aboutir. Aussi, précisons que le **DHRM** est uniquement un outil conceptuel destiné à guider les analyses et les études menées sur les **objets techniques anciens**. Dans son état actuel, il s'agit d'une maquette qui devra être enrichie et nécessitera des évolutions pour s'ajuster aux pratiques des futurs projets patrimoniaux. Même si la méthode UML, enrichie par l'introduction de la *multi-temporalité* et de la *multi-dimension*, est la base de modélisation utilisée, on ne peut prétendre à réaliser, sous cette forme, une application informatique à l'issue de ces travaux de doctorat. C'est pourquoi les exemples sont traités ici de façon littérale et il serait prétentieux de notre part de concevoir une base de connaissances pour

encapsuler le méta-modèle d'information dans son état actuel. Ce n'est qu'après de multiples itérations et adaptations au nouveau cas d'étude considéré que le **DHRM** pourra se décliner sous une forme informatique. Ce manuscrit peut donc être considéré comme la base d'un cahier des charges que la maîtrise d'ouvrage pourra traduire dans un langage informatique et ensuite décliner en application autonome.

8.2 PERSPECTIVES DE VALORISATION DU PATRIMOINE TECHNIQUE ET INDUSTRIEL

Dans le chapitre 5, nous avons vu qu'à partir du **dossier d'œuvre patrimoniale technique**, plusieurs nouveaux **objets** intermédiaires de représentations peuvent être déclinés. Outre l'intérêt du **DHRM** pour aider au rapide sauvetage d'un objet patrimonial, ce méta-modèle encapsule également une vue **Produit numérique final de valorisation** : reconstruction, thésaurus virtuel, utilisation didactique pour experts ou universitaires, valorisation muséographique, innovation...

Si les **schèmes multi-temporels** et **multi-dimensionnels** de **l'objet** du passé sont complets, cette liste de finalités est *illimitée* et on remarque que les valorisations s'auto-encapsulent les unes dans les autres à l'intérieur du **DHRM**. Proposons quelques axes majeurs d'études qui pourront faire suite à ces premiers travaux de recherche :

- Reconstruire les objets techniques appartenant au passé en renouvelant les pratiques des collections muséologiques,
- Introduire le Virtuel comme moyen de médiation spécialisé et/ou muséographique,
- Réinjecter les connaissances du passé dans nos entreprises contemporaines pour faire émerger de nouveaux produits innovants.

8.2.1 RECONSTRUIRE LES OBJETS D'AUTREFOIS ?

Si la **maquette numérique de référence** a été suffisamment détaillée depuis un *extremum architectural* à un *extremum infrastructural* de sa **typologie structurante**, elle peut permettre de reconstruire **l'objet technique ancien** avec toutes ses qualités physiques initiales.

En effet, la reconstruction apparaît comme une question importante, notamment pour les partenaires avec qui nous avons mené les études de cas. Face à une machine en ruine mais dont l'étude **archéologique industrielle avancée** a abouti, la réalisation de la **maquette numérique de référence** montrant un **objet** en état de marche et fonctionnant virtuellement a créé le désir d'un retour au réel en envisageant une refabrication à échelle réduite ou réelle, fonctionnelle ou non. Ainsi, la capitalisation des connaissances par **l'outil** numérique pourrait également permettre de reconstruire l'objet ou de le restaurer en réalisant les pièces manquantes. En effet, dans le cas de la machine à vapeur PIGUET, après

étude socio-technique, il est apparu que *l'objet* avait été mal entretenu durant sa troisième phase de vie. Une remise en service des pièces d'origine sans changer les éléments critiques non visibles sur les *vestiges* de *l'objet* aurait donc été dangereuse pour le public du Musée.

8.2.2 LA MAQUETTE VIRTUELLE COMME MEDiateUR

La pratique des collections de machines débute au 18^{ème} siècle en EUROPE et leur utilisation est destinée à la formation technique comme c'est le cas au CONSERVATOIRE NATIONAL des ARTS-ET-METIERS en FRANCE ou au SCIENCE MUSEUM en ANGLETERRE. Ces maquettes matérielles encombrantes souvent animées sont de véritables chefs d'œuvres et d'une haute fidélité technique. Cependant, elles se sont actuellement orientées vers des buts à caractères uniquement muséographiques suite à la crise de la collection systématique des machines et des objets techniques au 20^{ème} siècle. Mais en règle générale, les collections sont présentées statiquement, ce qui se comprend fort bien pour des questions de coût, de compétences techniques, d'entretien et d'usure sur le long terme compte tenu de leur utilisation. A ces fins, certains Musées ou écomusées ont développé des efforts importants de maintien en service de machines et du savoir-faire de leur usage par d'anciens ouvriers capables de faire des démonstrations. De tels choix muséographiques sont néanmoins rares et tendent à disparaître avec l'âge des acteurs. De plus, le maintien des ateliers et des outillages d'entretien est également problématique. Enfin, les maquettes réelles, statiques ou animées des Musées paraissent aujourd'hui démodées pour les jeunes générations, avares d'imageries numériques, qui préféreraient *utiliser* ces vieilles machines dans SECOND LIFE⁵²³.

Les *maquettes numériques de référence* peuvent alors venir compléter les inventaires et les collections de machines anciennes du *patrimoine technique et industriel*. En effet, à long terme, grâce à une implémentation de type contributive, un thésaurus de machines constitué d'une base de données conséquente serait appelée à devenir une collection numérique destinée à la conservation de la connaissance des processus industriels ; renouant ainsi les liens avec les objectifs originaux des collections de machines.

Les applications didactiques paraissent nombreuses et des plus intéressantes pour la formation technique et scientifique. Les produits pédagogiques basés sur l'usage de la CAO existant aujourd'hui, notre proposition apporte une extension vers la compréhension du passé, pour des démarches de culture métier ou de culture produit, au sein des écoles comme des entreprises. En effet, nos études de cas comme celles de l'imprimerie ont

⁵²³ Seconde Life est un monde virtuel en 3D, imaginé, créé et possédé par ses joueurs sur Internet. <http://www.secondlife.com>

montré que les étudiants et les enseignants/chercheurs ayant réalisé des projets de **maquettes numériques de patrimoine** dans des formations de conception mécanique ou d'apprentissage de la CAO en ont reçu de riches enseignements. L'utilisation de moyens virtuels sur des vieilles machines pourrait accélérer le processus de formation, anticiper et donc prévenir les pannes, rendre réel la disponibilité de la machine... [OLIVE & al 2007]

8.2.3 LA REALITE VIRTUELLE RENTRE DANS LES MUSEES...

Une application du **Dossier d'œuvre patrimoniale technique** peut également être envisagée à des fins de valorisation du **patrimoine technique et industriel**. Elle interviendra soit comme élément de complément et de mise en contexte d'objets de référence, soit comme projet de **restitution**. Au vu de la croissance exponentielle des technologies de Réalité Virtuelle, une approche du patrimoine par les moyens modernes est désormais envisageable et pourrait se concrétiser par la réalisation de parcours muséographiques *grand public* dans le cadre de la diffusion de la *culture scientifique et technique*.

Outre l'intérêt que de telles expositions permanentes procureraient aux experts et aux étudiants en leurs fournissant un **modèle** rigoureux expliquant les solutions **techniques** dans leur **contexte**, les premières pistes évoquées lors de discussions animées que nous avons eu avec les conservateurs, intégrés à notre projet depuis ces trois ans, pourraient être de :

- S'arrêter à une **maquette numérique de référence** se déclinant en fonction des **publics** ou des **utilisateurs**.
- Mettre en exergue **l'environnement** des objets avec leurs atmosphères et leurs ambiances : sons, lumières, odeurs... jouer sur les sens pour toucher l'émotionnel. *L'immersion* susciterait connaissance, étonnement, plaisir.
- Découvrir **l'objet** en rentrant à l'intérieur, en se l'appropriant, en se perdant dedans.
- Et pourquoi ne pas envisager un **objet** de création artistique contemporaine ou un spectacle autour de **l'objet**...

Les potentialités d'expansions muséographiques du **DHRM** sont nombreuses. Daniel THOULOZE, Directeur du Musée des ARTS-ET-METIERS à PARIS, envisage que [THOULOZE 2005] :

Le Musée ne doit pas être qu'un rétroviseur vers le passé mais un tremplin pour l'avenir et l'innovation.

8.2.4 LA CULTURE TECHNIQUE, UN TREMLIN POUR L'INNOVATION

En effet, en considérant le bilan effectué ci-avant, on observe de plus, que dans les pratiques industrielles et les démarches d'innovation, les attitudes courantes consistent souvent à sous-estimer voire à ignorer les acquis du passé. L'image d'une entreprise vieillissante auprès de ses clients est particulièrement redoutée par le service commercial. Les relations entre les préoccupations du marché et les perspectives d'innovation avec le patrimoine industriel et la culture d'entreprise ne sont pas toujours évidentes à concilier. Tout se passe comme s'il y avait une coupure irrémédiable entre passé et présent ; le seul lien établi avec le présent s'effectuant avec le futur immédiat.

La démarche que nous proposons pourrait être une alternative au problème de conservation et de stockage des machines technologiques et industrielles. En effet, comme expliqué précédemment, ce problème a été rencontré non seulement par le Musée des ARTS-ET-METIERS mais également par des Musées similaires en ALLEMAGNE, en GRANDE-BRETAGNE ou aux ETATS-UNIS, environ à la même époque. Ce décrochage, essentiellement lié au développement exponentiel des technologies industrielles du 20^{ème} siècle rend particulièrement difficile l'accumulation de ces objets. Un thésaurus virtuel complétant les collections d'inventaires de machines pourrait s'avérer utile, non seulement pour les historiens des techniques mais également pour les industriels, afin d'identifier le contexte et les moteurs de l'innovation. L'approche patrimoniale peut alors compléter les actions classiques de capitalisation des connaissances et d'intelligence économique dans une branche professionnelle donnée. Cette consistance culturelle et historique améliore ainsi leurs compétitivités. Il s'agit dès lors d'une veille technologique d'un nouveau type prenant en compte la filière technologique sur la longue durée et permettant de comprendre certaines inflexions, évolutions ou tendances de l'innovation comme Michel COTTE le propose à travers la *sphère de l'innovation* [COTTE 2005b].

Que les connaissances soient explicites ou implicites, orientées produit ou processus, l'innovation actuelle *quasi* journalière des entreprises contemporaines n'en reste pas moins incrémentale. En effet, l'innovation de rupture est beaucoup plus difficile à mettre en œuvre et nécessite de nouveaux outils, de nouvelles méthodes et requiert avant tout des connaissances et des compétences diverses [SERRAFERO & al 2007]. Envisager le passé pour prévenir et créer l'avenir pourrait être une utilisation ultime de la capitalisation de ce patrimoine [MAKKUNI 2003]. La théorie TRIZ de Genrich Saoulovich ALTSHULLER proposant d'implémenter les connaissances technologiques passées afin de trouver de nouveaux concepts innovants, ne serait-il pas envisageable d'utiliser un des outils de cette théorie comme la matrice des neuf écrans pour innover à partir des connaissances patrimoniales ?

C'est dans cette vision de penser le futur que ces projets de recherche sont effectués par notre équipe O.S.TIC qui, depuis trois ans, s'est enrichie de scientifiques tentant de se faire reconnaître sur le plan national. Afin de mieux cerner et anticiper les évolutions socio-économico-techniques, au lieu de travailler sur des objets présents, la démarche consiste à prendre comme point de départ des objets techniques appartenant au passé.

8.3 SYNTHÈSE GÉNÉRALE

Comprendre un objet technique du passé : pour qui, pour quoi ?

Durant ces travaux de doctorat, il nous a été donné l'opportunité d'étudier comment deux disciplines, le GENIE INDUSTRIEL et l'HISTOIRE DES TECHNIQUES, peuvent cohabiter sur un domaine d'application transversal : le **patrimoine technique et industriel**.

Afin de conduire les *études de patrimonialisation*, nous nous sommes orientés selon une vision *produit-processus* :

- Le **DHRM**, **Digital Heritage Reference Model**, est un Système d'information permettant, en lui-même, l'encapsulation des différents **états** intermédiaires de l'**objet technique ancien** ainsi que la description des **outils** et l'identification des **hommes** nécessaire à ce nouveau type de *projet collaboratif*. De plus, le méta-modèle intègre une description aussi bien *internaliste* qu'*externaliste* de l'**objet** considéré.
- Le **processus** à mettre en œuvre est guidé par la sémantique du **DHRM**. Dans son état actuel, notre recherche s'est focalisée sur la première partie A1 comme définie par le SADT de la figure 218 : c'est la phase d'**archéologie industrielle avancée**.

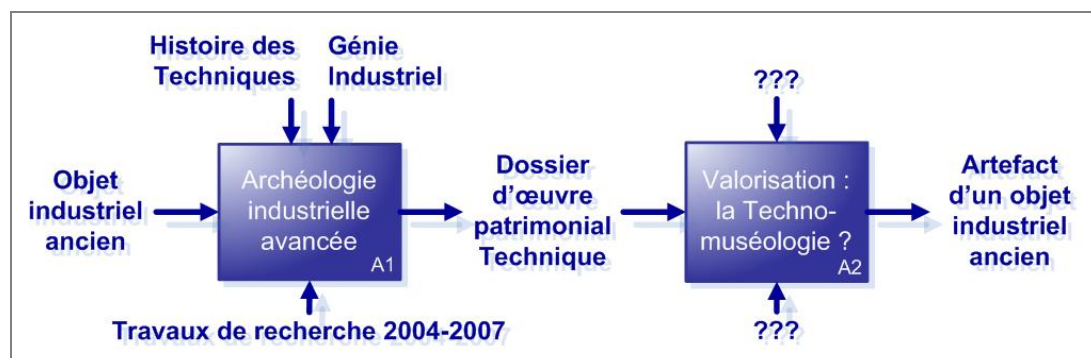


Figure 218 : SADT DÉCOMPOSÉ DE NOTRE PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

La partie A2 du SADT nous emmène vers la valorisation de l'**objet** en tant qu'**artefact patrimonial** ; il s'agit peut-être ici d'un nouvel axe de travail : la **Techno-muséologie**. En effet, comme Louis FIGUIER nous le rappelle : l'HISTOIRE et l'INDUSTRIE sont toutes deux considérées comme des sciences depuis plusieurs siècles. Vulgariser la science n'est pas une idée ni une possibilité mais une nécessité si l'humanité veut toujours aller de l'avant. Aussi :

Au regard de cette nouvelle problématique, le DHRM peut également servir de base de travail à cette nouvelle muséographie pour laquelle de nouveaux travaux de recherche sont à définir.

L'ouvrier des fabriques, le cultivateur des campagnes, l'employé, le commerçant, auront constamment à recourir à la machine à vapeur, à l'électricité, au gaz d'éclairage, etc., car aujourd'hui la science a partout pénétré dans la vie commune.
[...]

Depuis que la physique a porté ses clartés dans cet ordre étrange et mystérieux de phénomènes qui se passent dans l'intimité des molécules des corps, depuis que la féconde théorie de l'unité des forces et de leur transformation mutuelle, c'est-à-dire la transformation du mouvement en chaleur, de la chaleur en électricité, de l'électricité en lumière, de la lumière en sonorité, a pris pied dans la pratique ; enfin, depuis que l'art de l'ingénieur s'est enrichi, grâce à la machine à vapeur et à de nouveaux agencements mécaniques, de procédés rapides et précis, cette foule d'inventions et de travaux [...] doivent nécessairement offrir un vif attrait.

[...]

On ne peut trouver une matière plus intéressante que l'histoire et la description des grandes inventions scientifiques dans lesquelles éclate toute la grandeur du génie humain.

[...]

Lorsque l'utilité des travaux de ce genre sera mieux appréciée qu'elle ne l'est encore, d'autres écrivains compléteront cette tâche en embrassant l'ensemble tout entier des conquêtes scientifiques de notre époque, et ainsi seront sauvés de l'oubli des monuments précieux qui seront un jour les vrais titres de gloire de l'humanité.

Louis FIGUIER

[FIGUIER 1865] [FIGUIER 1884] [FIGUIER 1896]

9. SOURCES IMPRIMEES ET BIBLIOGRAPHIE GENERALE

9.1 VALORISATION DES TRAVAUX DE THESE

- [BERNARD & al 2007a] A. BERNARD, S. AMMAR-KHODJA, N. PERRY, F. LAROCHE (2007), *Virtual engineering based on knowledge integration*, Conférence ICMA, Singapour, 28 p.
- [BERNARD & al 2007b] A. BERNARD, F. LAROCHE, S. AMMAR-KHODJA, N. PERRY (2007), *Impact of new 3D numerical devices and environments on redesign and valorisation of mechanical systems*, CIRP General Assembly, CIRP Annals, Vol. 56-1, pp.143-148
- [BURON & al 2005] G. BURON, M. SIMONNIN, F. LAROCHE (2005), *Un objet industriel patrimonial voué à disparaître sauvé par le numérique : exemple de la machine à laver le sel de Batz-sur-Mer*, Journée d'étude O.S.TIC, Institut de l'Homme et de la Technologie, Nantes, septembre 2005
- [COTTE & al 2005b] M. COTTE, F. LAROCHE, A. BERNARD (2005), *Le patrimoine des machines anciennes et la Conception Assistée par Ordinateur*, 3^{ème} rencontre de l'Association Patrimoine et Mémoires d'entreprise, Musée des Arts-et-Métiers, Paris, ouvrage à paraître
- [COTTE & al 2007a] M. COTTE, F. LAROCHE, A. BERNARD (2007), *Les outils de réalité virtuelle sont-ils applicables au patrimoine technique et industriel ?*, Revue des professeurs d'histoire géographie, à paraître, 15 p.
- [COTTE & al 2007b] M. COTTE, F. LAROCHE (2007), *Le monumentalisme et la mise en scène des techniques à l'époque de Jules Verne*, Colloque Jules Verne ou la science en drame du 4 mars 2005, Museum d'histoires naturelles de Nantes, Revue Jules Verne n°25, ISBN 978-2-901811-34-3, 136 p.
- [COTTE & al 2007c] M. COTTE, J.-L. KEROUANTON, F. LAROCHE, A. BERNARD (2006), *Objet, société, technologies de l'information et de la communication : l'apport du patrimoine et de l'histoire des techniques dans la capitalisation des connaissances, la valorisation et les approches méthodologiques de l'ingénieur*, 131^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Grenoble, 10 p.
- [LAROCHE & al 2005a] F. LAROCHE, S. Le LOCH (2005), *Culture technique et CAO par les machines anciennes*, Colloque CETSIS'2005, Nancy, 6 p.
- [LAROCHE & al 2005b] F. LAROCHE, S. Le LOCH (2005), *Une démarche pédagogique pour l'apprentissage de la CAO par l'étude de machines anciennes : cas d'une presse à platine du Musée de l'imprimerie de Nantes*, Journée d'étude O.S.TIC, Institut de l'Homme et de la Technologie, Nantes, mars 2005
- [LAROCHE & al 2005c] F. LAROCHE, A. BERNARD, M. COTTE (2005), *Méthode de construction de situations d'usages virtuelles de systèmes techniques anciens*, 4^{ème} Conférence internationale CPI, Casablanca, Maroc, 19 p.
- [LAROCHE & al 2005d] F. LAROCHE, J.-L. KEROUANTON (2005), *Le patrimoine : quel domaine d'application pour quel champ d'application ?*, Journée d'étude O.S.TIC, Institut de l'Homme et de la Technologie, Nantes, mars 2005
- [LAROCHE & al 2006a] F. LAROCHE, A. BERNARD, M. COTTE (2006), *Methodology for simulating ancient technical systems*, Revue Internationale d'Ingénierie Numérique, Integrated Design and Production, Vol. 2 n°1-2/2006, Hermès-Science, Editions Lavoisier, ISBN 978-2-7462-1679-2, pp.9-28
- [LAROCHE & al 2006b] F. LAROCHE, A. BERNARD, M. COTTE (2006), *A new approach for preserving the technical heritage*, Colloque scientifique VRIC, Salon Laval Virtual, Laval, ISBN 2-9515730-5-7, 11 p.
- [LAROCHE & al 2006c] F. LAROCHE, A. BERNARD, M. COTTE (2006), *Between heritage and Industrial Engineering, a new life for old product: virtuality*, Conférence Virtual Concept, Cancun, Mexique, Revue *Research in Interactive Design*, Volume 2, Editions Springer, ISBN 2-287-48363-2, 7 p.

- [LAROUCHE & al 2006d] F. LAROUCHE, A. BERNARD, M. COTTE, S. DENIAUD (2006), *A new methodology for a new life of old technical machines*, CIRP Design Seminar, Alberta, Canada, 12 p.
- [LAROUCHE & al 2007a] F. LAROUCHE, A. BERNARD, M. COTTE (2007), *De l'objet à l'idée : entre reverse-engineering et archéologie industrielle ou comment refaire vivre le patrimoine industriel*, 10^{ème} colloque national AIP Primeca, La Plagne, ISBN 978-2-86272-451-5, 12 p.
- [LAROUCHE & al 2007b] F. LAROUCHE, A. BERNARD, M. COTTE (2007), *Alphonse Duvergier: its life, its company and its famous Steam Engine*, Conférence IFToMM, Besançon, 8 p.
- [LAROUCHE & al 2007c] F. LAROUCHE, A. BERNARD, M. COTTE (2007), *Une vision produit-process et sa méthodologie dédiée à la sauvegarde du patrimoine technique et industriel sous une forme virtuelle*, 5^{ème} Conférence internationale CPI, Rabat, Maroc, 19 p.
- [LAROUCHE & al 2007d] F. LAROUCHE, A. BERNARD, M. COTTE (2007), *Reverse engineering for industrial heritage: 3D digitalization*, Conférence ICMA, Singapour, 18 p.
- [LAROUCHE & al 2007e] F. LAROUCHE, A. BERNARD, M. COTTE (2007), *3D digitalization for patrimonial machines*, Conférence CIRP Design Seminar, Berlin, Editions Springer, ISBN 978-3-540-69819-7, pp.387-396
- [LAROUCHE & al 2007f] F. LAROUCHE, M. COTTE, J.-L. KEROUANTON, A. BERNARD (2007), *L'image virtuelle comme source de connaissance pour le patrimoine technique et industriel : Comment allier Histoire et Ingénierie ?*, 132^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Arles, 13 p.
- [LAROUCHE & al 2007g] F. LAROUCHE, S. Le LOCH, M. COTTE, J.-L. KEROUANTON, A. BERNARD (2007), *L'histoire, un medium de didactique aux Nouvelles Technologies*, 3^{ème} journées nationales inter-IUFM sur la Recherche et la Formation des enseignants en épistémologie et Histoire des Sciences et des Techniques, groupe de recherche ReForHST, Caen, 6 p.
- [LAROUCHE & al 2007h] F. LAROUCHE, A. BERNARD, M. COTTE (2007), *Un nouveau processus coopératif d'ingénierie et ses modes de représentations intermédiaires : les objets patrimoniaux à caractère industriel*, Workshop du GT C2EI, GDR-MACS du CNRS, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 9 p.
- [LAROUCHE 2007a] F. LAROUCHE (2007), *Vers une muséologie numérique : méthodologie générale pour conserver et valoriser le patrimoine technique et industriel*, Journée d'étude OSTIC, Institut de l'Homme et de la Technologie
- [LAROUCHE 2007b] F. LAROUCHE (2007), *Perspectives innovantes : l'archéologie industrielle avancée en collaboration inter-disciplinaire – Renaissance virtuelle d'un canot à vapeur de 1861*, Conférence publique organisée par DCNS, Direction des Chantiers Navals, 25 octobre 2007, Nantes
- [Le LOCH & al 2007] S. Le LOCH, F. LAROUCHE (2007), *Maquettes numériques de machines patrimoniales pour l'enseignement de la cao en projet tutoré*, 10^{ème} Colloque National AIP PRIMECA, La Plagne, 11 p.
- [ROCHARD & al 2005c] O. ROCHARD, F. LAROUCHE (2005), *Development of a Virtual Reality Interface coupled to a Knowledge database: An interactive application aimed to museum's public*, Colloque international ICHIM, Paris, 15 p.

9.2 SCIENCES POUR L'INGENIEUR

9.2.1 SOURCES ET OUVRAGES GENERAUX

- [AFNOR 1984] AFNOR (1984), *Guide pour l'élaboration d'un cahier des charges fonctionnel*, Norme NF X50-150
- [AFNOR 1991] AFNOR (1991), *Analyse de la Valeur*, Norme NF X50-151
- [AFNOR 2007] AFNOR (2007), *Management par la valeur - Caractéristiques fondamentales de l'analyse de la valeur*, Norme NF X50-152
- [ALTSCHULLER 1988] G. Altschuller (1988), *Creativity as an exact science*, Editions Gordon and Breach
- [ALTSCHULLER 1996] G. ALTSCHULLER (1996), *And Suddenly the Inventors appeared*, Technical Innovation Center, INC., 171 p.
- [ALTSCHULLER 1999] G. ALTSCHULLER (1999), *The Innovation Algorithm. TRIZ, systematic innovation and technical creativity*, Technical Innovation Center, Inc., 312 p.
- [AMIDON 2002] D. M. AMIDON (2002), *Innovation et management des connaissances*, Editions d'organisation, 226 p.
- [AOUSSAT & al 1998] A. AOUSSAT, M. Le COQ (1998), *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, sous la direction de M. Tollenaere, Editions Hermès, Paris, Chapitre 8
- [BALLAY 1997] J.-F. BALLAY (1997), *Capitaliser et transmettre les savoir-faire de l'entreprise*, Publications Eyrolles, ISBN 2-212-01653-0, 319 p.

- [BERIO & al 2007] G. BERIO, M. HARZALLAH (2007), *Towards an Integrating Architecture for Competence Management*, Journal Computers in Industry, Volume 58, ISSN 0166-3615, Editions Elsevier, pp. 199-209
- [BEZIER 1987] P. BEZIER (1987), *Courbes et surfaces*, Editions Hermès, Paris
- [BIGAND & al 2006] M. BIGAND, J.-P. BOUREY, H. CAMUS, D. CORBEEL (2006), *Conception des systèmes d'information : Modélisation des données, études de cas*, Editions Technip, ISBN 2-71080-8749, 165 p.
- [BOCQUET 1998] J.-C. BOCQUET (1998), *Ingénierie simultanée, conception intégrée*, Ouvrage collectif Conception de produits mécaniques, méthodes, modèles et outils, sous la direction de M. TOLLENAERE, Editions Hermès, p. 29-52
- [BRISAUD & al 1998] D. BRISAUD, O. GARRO (1998), *Conception distribuée, émergence*, Ouvrage collectif Conception de produits mécaniques, méthodes, modèles et outils, sous la direction de M. TOLLENAERE, Editions Hermès, pp. 105-114
- [CAVALLUCCI 2007] D. CAVALLUCCI (2007), *TRIZ : l'approche altshullerienne de la créativité*, Techniques de l'Ingénieur, A 5 211, 18 p.
- [COIFFET & al 1993] P. COIFFET, G. BURDEA (1993), *La réalité virtuelle*, Editions Hermès
- [de BOOR 1978] C. de BOOR (1978), *A practical guide to splines*, Applied Mathematical Sciences, Library of Congress Cataloging, 3^{ème} édition, ISBN 0-387-90356-9
- [de GAGET de CASTELJAU 1985] P. de GAGET de CASTELJAU (1985), *Mathématiques et CAO – formes à pôles*, Volume 2, Editions Hermès, ISBN 2-86601-044-2
- [DIENG-KUNTZ & al 2001] R. DIENG-KUNTZ, O. CORBY, F. GANDON, A. GIBOIN, J. GOLEBIOWSKA, N. MATTA, M. RIBIERE (2001), *Méthodes et outils pour la gestion des connaissances : Une approche pluridisciplinaire du KM*, Editions Dunod, 2^{ème} édition, ISBN 2-10-006300-6, 372 p.
- [ERMINE & al 1996] J.-L. ERMINE, M. CHAILLOT, P. BIGEON, B. CHARRETON, D. MALAVIEILLE (1996), *MKSM : Méthode pour la gestion des connaissances*, Ingénierie des systèmes d'information, AFCET, Editions Hermès, Vol. 4, 236 p.
- [FONDIN 1998] H. FONDIN (1998), *Le traitement numérique des documents*, Editions Hermès, ISBN 2-86601-689-0, 382 p.
- [FUCHS & al 2004] P. FUCHS, G. MOREAU (2004), *Traité de Réalité Virtuelle*, Les presses de l'école des Mines de Paris, 548 p.
- [GARDAN 2007a] Y. GARDAN (2007), *CAO : modélisation géométrique*, Techniques de l'Ingénieur, H 3 750-1, 24 p.
- [GARDAN 2007b] Y. GARDAN (2007), *CAO : vers la modélisation fonctionnelle*, Techniques de l'Ingénieur, H 3 752-1, 20 p.
- [GRUBER 1993] T. GRUBER (1993), *A translation approach to portable ontologies*, Knowledge Acquisition 5(2), pp. 199-220
- [HABRIAS 1988] H. Habrias (1988), *Le modèle relationnel binaire. Méthode I.A. (NIAM)*, Editions Eyrolles
- [HATON & al 2007] J.-P. HATON, M.-C. HATON (2007), *Systèmes à bases de connaissances*, Techniques de l'Ingénieur, H 3 740-1, 14 p.
- [ISO 2001] International Standard (2001), *Information and documentation – records management*, Norme ISO 15489-1, 19 p.
- [JAULENT 1993] P. JAULENT (1993), *SADT un langage pour communiquer*, Editions Eyrolles, 330 p.
- [JEANTET 1998] A. JEANTET (1998), *Les objets intermédiaires dans la conception. Eléments pour une sociologie des processus de conception*, Sociologie du Travail, pp 291-316
- [LOUBET & al 2003] J.-L. LOUBET, P. GRISSET, D. LARROQUE (2003), *Electricité, électronique : un siècle de développement automobile*, Editions PSA Peugeot Citroën, Editions du Palmier, Nîmes, 368 p.
- [MIDLER 1993] C. MIDLER (1993), *L'Auto qui n'existait pas. Management des projets et transformation de l'entreprise*, Editions Dunod, ISBN : 2-10-004228-9
- [PIEGL & al 1997] L. PIEGL, W. TILLER (1997), *the Nurbs book*, Editions Springer-Verlag, New York
- [POITOU 1989] J.-P. POITOU (1989), *30 ans de CAO en France ou les petits enfants de Gaspard Monge*, Editions Hermès, 1989, ISBN 2-86601-155-4, 160 p.
- [PRASAD 1996] B. PRASAD 1996, *Concurrent Engineering: Fundamentals*, Revue *Integrated Product Development*, volume 2, ISBN 0-13-396496-0, 500 p.
- [RUMBAUGH 1995] J. RUMBAUGH (1995), *Modélisation et conception orientées objet - Object Modeling Technique (OMT)*, Editions Masson, 1995
- [THEVENOT 1998] D. THEVENOT (1998), *Le partage des connaissances : une mémoire interactive pour la compétitivité de l'entreprise*, Editions Tec & Doc, Lavoisier, 136 p.
- [TOLLENAERE 1998] M. TOLLENAERE (1998), *Modélisation de Données. Gestion de Données techniques*, Ouvrage collectif Conception de produits mécaniques, méthodes, modèles et outils, sous la direction de M. Tollenare, Editions Hermès, pp. 413-434

9.2.2 TRAVAUX UNIVERSITAIRES, MASTER, THESES ET HABILITATIONS A DIRIGER LES RECHERCHES (HORS CAS D'ETUDE)

- [AMMAR-KHODJA 2007] S. AMMAR-KHODJA (2007), *Processus d'aide à la spécification et à la validation d'application d'ingénierie à base de connaissances expertes*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes
- [AOUSSAT 1990] A. AOUSSAT (1990), *La pertinence en innovation : nécessité d'une approche plurielle*, Thèse de doctorat, ENSAM Paris, 210 p.
- [BERNARD 1996] A. BERNARD (1996), *Contribution à la modélisation des produits et à l'intégration des technologies productrices dans un environnement multi-acteurs*, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Nancy 1, 109 p.
- [CANDLOT 2006] A. CANDLOT (2006), *Principes d'assistance à la maîtrise d'ouvrage pour la modélisation et l'intégration d'expertise*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 246 p.
- [CHAMPIN 2002] P.-A. CHAMPIN (2002), *Modéliser l'expérience pour en assister la réutilisation : de la Conception Assistée par Ordinateur au Web Sémantique*, Thèse de doctorat en informatique, Université Claude Bernard - Lyon 1
- [CLAIRAND & al 2002] J.-P. CLAIRAND, B. MORINEAU (2002), *Passage d'une maquette numérique à un modèle de réalité virtuelle manipulable sur internet*, Rapport final de projet, Formation DUTIL, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes
- [DELPLACE 2004] J.-C. DELPLACE (2004), *L'Ingénierie numérique pour l'amélioration des processus décisionnels et opérationnels en fonderie*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 169 p.
- [FERRAZZI & al 2003] E. FERRAZZI, C. NIGLIS, V. BICHERAY, F. LAROCHE (2003), *Maquettage de la presse Bliss de l'ancienne maison Japy de Feschés-le-Chatel*, Rapport de travaux de laboratoires TX5X, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 20 p.
- [FLYNN 1990] P.J. FLYNN (1990), *CAD based computer vision: modelling and recognition strategies*, Thèse de doctorat, Michigan State University, USA
- [GARDONI 1999] M. GARDONI (1999), *Maîtrise de l'information non structurée et capitalisation de savoir et savoir-faire en Ingénierie Intégrée. Cas d'étude Aérospatiale*, Thèse de doctorat, Université de Metz
- [GARRO 1997] O. GARRO (1997), *Contribution à la modélisation de la conception des systèmes mécaniques*, Habilitation à diriger des recherches, Grenoble I, Université Joseph Fourier, 82 p.
- [GIASSI 2004] A. GIASSI (2004), *Optimisation et conception collaborative dans le cadre de l'ingénierie simultanée*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2004
- [GUILLET 2006] F. GUILLET (2006), *Qualité, fouille et gestion des connaissances*, Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches, Ecole Polytechnique, Université de Nantes
- [HAIDAR 2002] K. HAIDAR (2002), *Modélisation de l'endommagement des structures en béton – approches numériques et effet de la microstructure sur les propriétés de rupture*, Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Civil de Nantes et St Nazaire, Ecole Centrale de Nantes, pp. 38-43
- [HASAN 2000] R. HASAN (2000), *Contribution à l'amélioration des performances des systèmes complexes par la prise en compte des aspects socio-techniques dès la conception : proposition d'un modèle original de situation de travail pour une nouvelle approche de conception*, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 200 p.
- [KERARON 2007] Y. KERARON (2007), *Couplages entre le système documentaire et les systèmes technique et humain : Les mutations numériques*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes
- [LABROUSSE 2004] M. LABROUSSE (2004), *Proposition d'un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprise*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 161 p.
- [LAROCHE 2003] F. LAROCHE (2003) *Réalisation d'un guide de conception mécanique des moteurs électriques de traction : redérouler le process mapping de la conception mécanique des moteurs de traction*, Rapport de projet de fin d'études ST50, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 322 p.
- [LAROCHE 2004] F. LAROCHE (2004), *La connaissance au service de l'innovation*, Rapport de DEA, ENSAM Paris, 65 p.
- [LAROCHE 2005] F. LAROCHE (2005), *Mémoire intermédiaire de thèse : état de l'art*, Rapport interne IRCCyN/IHT, 53 p.
- [LAROCHE 2006] F. LAROCHE (2006), *Mémoire intermédiaire de thèse : étude historique*, Rapport interne IRCCyN/IHT, 63 p.
- [LOMBARD 2006] M. LOMBARD (2006), *Contribution de la Modélisation Informationnelle aux Processus de Conception et Réalisation de Produits Manufacturiers : vers une Ontologie Métier*, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 166 p.
- [MARTIN 1999] C. MARTIN (1999), *Conception intégrée. Interopérativité des méthodes : AF, QFD, AMDEC dans le cadre du projet PIRAMID*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, 1999
- [MERLO 2003] C. MERLO (2003), *Modélisation des connaissances en conduite de l'ingénierie : mise en œuvre d'un environnement d'assistance aux acteurs*, Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 251 p.
- [MOUCHARD & al 2006] L. MOUCHARD, E. SALIN (2006), *La numérisation 3D du patrimoine technique et industriel*, rapport de Projet d'Etude Recherche, Ecole Centrale de Nantes, 12 p.

- [NEAU 2004] E. NEAU (2004) *Innovation et information stratégique*, DESS Information Stratégique et Innovation Technologique, ISTIA
- [POMIAN 1996] J. POMIAN, *Mémoire d'entreprise, techniques et outils de la gestion du savoir*, Editions Sapienta
- [POULIQUEN 2006] M. POULIQUEN (2006), *Proposition d'un modèle de main pour la simulation des interactions Homme-machine en environnement virtuel. Application à la prévention des risques d'accidents aux mains*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes
- [POVEDA 2001] O. POVEDA (2001), *Pilotage technique des projets d'ingénierie simultanée, modélisation des processus, analyse et instrumentation*, Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, 224 p.
- [REMY 2004] S. REMY (2004), *Contribution à l'automatisation du processus d'acquisition de formes complexes à l'aide d'un capteur laser plan en vue de leur contrôle géométrique*, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 176 p.
- [ROCHARD & al 2005a] O. ROCHARD, B. GAVALAND, P. BEAUCE (2005), *Réalisation d'une maquette numérique en vue d'une vulgarisation*, Rapport bibliographique de projet, Formation DUTIL, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 65 p.
- [ROCHARD & al 2005b] O. ROCHARD, B. GAVALAND, P. BEAUCE (2005), *Réalisation d'une maquette numérique en vue d'une vulgarisation*, Rapport final de projet, Formation DUTIL, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 142 p.
- [ROUCOULES 1999] L. ROUCOULES (1999), *Méthodes et connaissances : contribution au développement d'un environnement de conception intégrée*, Thèse de doctorat en Mécanique, INPG, septembre, Grenoble, 182 p.
- [ROUCOULES 1999] L. ROUCOULES (1999), *Méthodes et connaissances : contribution au développement d'un environnement de conception intégrée*, Thèse de doctorat, INPG, Grenoble
- [ROUSSEAU 2000] H. ROUSSEAU (2000), *Une approche par la théorie du chaos pour l'analyse des flux dans un système de production*, Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, 148 p.
- [SHAHROKHI 2006] M. SHAHROKHI (2006), *Intégration d'un modèle de situation de travail pour l'aide à la formation et à la simulation lors de la conception et l'industrialisation de systèmes*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes
- [TOPOL 2001] A. TOPOL (2001), *VRML : étude, mise en oeuvre et applications*, Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur en informatique, CNAM Paris, 161 p.
- [WEIL 1999] B. WEIL (1999), *Conception collective, coordination et savoirs ; les rationalisations dans la conception automobile*, Thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, Tome 1

9.2.3 SOURCES PERIODIQUES SCIENTIFIQUES

- [BASCOUL 2005] C. BASCOUL (2005), *L'esquisse virtuelle en conception mécanique*, 9^{ème} colloque national AIP Primeca, La Plagne, 12 p.
- [BELCHER & al 2003] D. BELCHER, M. BILLINGHURST, S.E. HAYES, R. STILES (2003), *Using Augmented Reality for Visualizing Complex Graphs in Three Dimensions*, IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 9 p.
- [BERMAN 2006] M. BERMAN (2006), *Merging the Physical and Virtual Through 3D Scanning and Printing*, NMC Summer Conference, Indianapolis
- [BERNARD & al 2002a] A. BERNARD, A. FISCHER (2002), *New trends in rapid product development*, CIRP anals, Vol. 51-2, pp.635-652
- [BERNARD & al 2002b] A. BERNARD, R. HASAN (2002), *Working situation model as the base of life-cycle modeling of socio-technical production systems*, CIRP Design Seminar, Hong-Kong
- [BERTHELOT 2003] N. BERTHELOT (2003), *Architectural 3D numerisation*, 8^{ème} Conférence internationale 3D Modelling, Paris, 8 p.
- [BILLINGHURST & al 2001] M. BILLINGHURST, H. KATO, I. POUPYREV (2001), *The MagicBook: A Transitional AR Interface*, Computers and Graphics, November 2001, pp. 745-753
- [BILLINGHURST & al 2002] M. BILLINGHURST, H. KATO (2002), *AR Toolkit Project : Collaborative Augmented Reality*, Communications of the ACM, Vol. 45, N°7, pp. 64-70
- [BILLINGHURST & al 2002a] M. BILLINGHURST, A. CHEOK, S. PRINCE, H. KATO (2002), *Real World Teleconferencing*, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol 22, No 6, pp. 11-13
- [BILLINGHURST & al 2002b] M. BILLINGHURST, H. KATO (2002), *Collaborative Augmented Reality*, Communications of the ACM, Vol. 45, No. 7, pp. 64-70
- [BOUGE & al 2002] P. BOUGE, P.-A. CHAMPIN (2002), *Une représentation épisodique des connaissances pour l'assistance à la réutilisation en CAO*, 13^{ème} Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances, Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, pp.175-183
- [BOUJUT & al 1998] J.-F. BOUJUT, A. JEANTET (1998), *Les entités de coopération dans les nouvelles organisations de la conception*, Revue Performances Humaines & Techniques, n° 96, pp. 38-44
- [BRIX & al 2007] T. BRIX, U. DÖRING, B. CORVES, K.-H. MODLER (2007), *DMG-Lib – the Digital Mechanism and Gear Library - Project*, Conférence IFToMM, Besançon, France, 6 p.

- [CONTRI & al 2002] A. CONTRI, P. BOURDET, C. LARTIGUE (2002), *Quality of 3D digitised points obtained with non-contact optical sensors*, CIRP Annals 51/1, 443 p.
- [CORVES & al 2006] B. CORVES, J. KLOPPENBURG, J. NIEMEYER (2006), *IGM-Mechanism Encyclopaedia and the Digital Mechanism Library as a Knowledge Base in Mechanism Theory*, Conférence internationale DETC, Philadelphia, 7 p.
- [CRUBLEAU & al 2003] P. CRUBLEAU, S. RICHIR, R. HAMBLI (2003), *La maîtrise des futures générations de produits & TRIZ*, 8^{ème} colloque national AIP Primeca, La Plagne, 10 p.
- [de BAILLENX 2003] H. de BAILLENX (2003), *Digitising and wax prototyping for dental applications*, 8^{ème} Conférence internationale 3D Modelling, Paris
- [de LUCA & al 2005] L. de LUCA, P. VERON, M. FLORENZANO (2005), *Rétro conception d'objets architecturaux basée sur une méthodologie de reconstruction hybride*, 9^{ème} colloque national AIP Primeca, La Plagne, 9 p.
- [DELOFFRE & al 2005] V. DELOFFRE, P. CHIWY (2005), *Retour à Bagacum*, Virtual Retrospect 2005, Biarritz, pp.66-67
- [DÖRING & al 2006] U. DÖRING, T. BRIX, M. REESSING (2006), *Application of computational kinematics in the digital mechanism and gear library DMG-Lib*, Revue Mechanism and Theory, Editions Elsevier, ISSN 0094-114X, pp.1003-1015
- [EL MHAMEDI & al 2005] A. EL MHAMEDI, E. DAFAOUI, K. KEMOUNE (2005), *Coordination et coopération des processus d'entreprise : étude de cas industriels*, 4^{ème} Conférence internationale CPI, Casablanca, Maroc, 15 p.
- [ERMINE & al 2004] J.-L. ERMINE, B. PAUGET, A. BERETTI, G. TORTORICI (2004), *Histoire et ingénierie des connaissances*, Colloque Sources et ressources pour les sciences sociales, Paris, 20 p.
- [EROGOVA & al 2006] O. EROGOVA, M. CECCARELLI, J. I. C. IGLESIAS, C. S. LOPEZ-CAJUN, V. E. PAVLOV (2006), *Agustin Betancourt: an early modern scientist and engineer in TMM*, Colloque international IDETC/CIE, Philadelphie, USA, 9 p.
- [EVERSHEIM & al 2000] W. EVERSHEIM, F.-B. SCHENKE, P. WEBER (2000), *Virtual engineering for an integrated product and process development*, CIRP Design Seminar, actes de la conférence, pp. 111-116
- [FISCHER 2007] A. FISCHER (2007), *Digital processing and fusion of 3D data from emerging non-contact 3D measurement technologies*, CIRP Design Seminar, Berlin, Editions Springer, ISBN 978-3-540-69819-7, pp.387-396
- [GABILLON & al 2002] B. GABILLON, M. LE COQ, C. COPPENS (2002), *Outil d'aide à l'innovation*, Colloque CONFERE, 12p.
- [GERO 1990] J.-S. GERO (1990), *Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design*, Revue AI Magazine, volume 11, n°4, pp. 26-36
- [GOMES & al 2000] S. GOMES, J.C. SAGOT (2000), *A concurrent engineering experience based on a cooperative and object oriented design methodology*, 3^{ème} Conférence Internationale Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Montréal, Canada
- [GOMES & al 2001] S. GOMES, J.C. SAGOT (2001), *Vers une chaîne XAO intégrée pour une conception centrée sur l'homme*, Lavoisier, Document numérique 2001/3-4, Volume 5, pp. 135-154
- [GORDAN & al 2002] G. GORDAN, M. BILLINGHURST, M. BELL, J. WOODFILL, B. KOWALIK, A. ERENDI, J. TILANDER (2002), *The Use of Dense Stereo Range Data in Augmented Reality*, IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Darmstadt, Germany, pp. 14-23
- [HASAN & al 2000] R. HASAN, J. CICCOTELLI, A. BERNARD, P. MARTIN (2000), *Representation and evaluation of risks during the design phase of a complex system*, Conférence ESREL, Rotterdam, Netherlands, volume 1, pp. 141-147, ISBN 90-5809-1414
- [HASAN & al 2002] R. HASAN, J. CICCOTELLI, A. BERNARD (2002), *Proposition d'une nouvelle approche de conception par l'intégration du concept de Situation de travail*, 4^{ème} Conférence internationale Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, AIP-PRIMECA, Clermont-Ferrand
- [HOWELL 2006] L. L. HOWELL (2006), *History of mechanisms: the odometer of the mormon trail*, Colloque international IDETC/CIE, Philadelphie, USA, 13 p.
- [Hu & al 2000] X. HU, J. PANG, Y. PANG, M. ATWOOD, W. SUN, W. C. REGLI (2000), *A survey on design rationale: representation, capture and retrieval*, Conférence DETC ASME Design Engineering Technical Conferences, Baltimore, Maryland
- [JAMET 2007] D. JAMET (2007), *The specificity of traction motors for railways application*, Conférence IFToMM, Besancon, France, 3 p. – www.iftomm2007.com
- [JEANTET & al 1996] A. JEANTET, H. TIGER, D. VINCK, S. TICHKIEWITCH (1996), *La coordination par les objets dans les équipes intégrées de conception de produit*, Ouvrage collectif Coopération et Conception, sous la direction de G. de Terssac et E. Friedberg, Editions Octarès, Toulouse, pp. 87-100
- [KATO & al 1999] H. KATO, M. BILLINGHURST (1999), *Marker Tracking and HMD Calibration for a video-based Augmented Reality Conferencing System*, 2nd International Workshop on Augmented Reality, San Francisco, USA, 10p.
- [KATO & al 2000] H. KATO, M. BILLINGHURST, I. POUPYREV, K. IMAMOTO, K. TACHIBANA (2000), *Virtual Object Manipulation on a Table-Top AR Environment*, International Symposium on Augmented Reality, Munich, Germany, pp.111-119
- [KATO & al 2001] H. KATO, M. BILLINGHURST, K. MORINAGA, K. TACHIBANA (2001), *The Effect of Spatial Cues in Augmented Reality Video Conferencing*, 9^{ème} Conférence internationale Human-Computer Interaction, New Orleans, USA, 4 p.

- [KERARON & al 2006] Y. KERARON, A. BERNARD, B. BACHIMONT (2006), *Annotation as a base to improve in-service feedback exchange during life cycle of complex systems*, 13^{ème} conférence internationale du CIRP sur le Life Cycle Engineering, LCE2006, Leuven
- [LABOURY & al 2005] D. LABOURY, V. MOREAU (2005), *Un nouvel outil de saisie 3D pour l'archéologie*, Virtual Retrospect 2005, Biarritz, pp 29-31
- [LOPES 2003] J. LOPES (2003), *Tridimensional virtual and physical reconstruction of Brazilian vertebrate fossils*, 8^{ème} Conférence internationale 3D modeling, Paris
- [MIKCHEVITCH & al 2005] A. MIKCHEVITCH, J.-C. LEON, A. GOUSKOV (2005), *Vers de nouvelles méthodes de simulation des opérations d'assemblage : évaluation d'assemblage de pièces flexibles dans un environnement de RV*, 9^{ème} colloque national AIP Primeca, La Plagne, 13 p.
- [NDIAYE & al 1999] D. NDIAYE, M. BIGAND, D. CORBEEL, J.-P. BOUREY (1999), *Information system for production engineering: contribution to maintaining consistency of composite data using object approach*, 9 p.
- [NIJSSSEN & al 1989] G.M. NIJSSSEN, T. HALPIN (1989), *Conceptual Schema and Relational Database Design*, Prentice Hall, Sydney
- [NOEL & al 2005] J. NOEL, G. SUBSOL, B. MAFART, G. GUIPERT, J.-D. GASCUEL (2005), *Les collections muséographiques en 3D par microtomographie rayons X*, Virtual Retrospect 2005, Biarritz, pp 44-48
- [NONAKA & al 1998] I. NONAKA, N. KONNO (1998), *The concept of "ba": Building a foundation for knowledge creation*, California Management Review, n°40-3, pp.40-54
- [OLIVE & al 2007] J. OLIVE, I. THOUVENIN, D. LOURDEAUX, M. SBAOUNI (2007), *Formation aux techniques industrielles à l'aide des environnements virtuels*, 10^{ème} colloque national AIP Primeca, La Plagne, 11 p.
- [OUAZZANI & al 1998] A. OUAZZANI, A. BERNARD, J.-C. BOCQUET (1998), *Process modelling: a design history capture perspective*, 2^{ème} Conférence internationale Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Compiègne
- [PANCHETTI & al 2007] M. PANCHETTI, J.-P. PERNOT, P. VERON (2007), *Remplissage de trous dans les maillages a l'aide de lignes de caractères extraites d'images*, 10^{ème} colloque national AIP Primeca, La Plagne, 12 p.
- [PERCOCO 2003] G. PERCOCO (2003), *DOE based evaluation of point cloud filtering on STL quality*, 8^{ème} Conférence internationale, 3D digitisation and modelling professionals, Paris, 11 p.
- [PEYRAUT & al 2007] F. PEYRAUT, J.-L. SEICHEPINE, H. I. FARAOUN, M. HERTTER, D. SPORER, N. HOPKINS et C. CODDET (2007), *Simulation multi-physique et multi-échelle du comportement des revêtements abrasables – application à l'industrie aéronautique*, 10^{ème} Colloque National AIP PRIMECA, La Plagne, 12 p.
- [POSEA & al 2004] V. POSEA, M. HARZALLAH (2004), *Ontologies : définition et applications*, IC'2004, 15^{ème} Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances, Lyon, 2 p.
- [RICHEY & al 2001] M. C. RICHEY, R. S. MCIVOR, S. C. SANDWICH (2001), *Computer Aided-Design-Manufacturing & Measurement Integration*, Conférence Coordinate Measurement System, Nouveau Mexique, 7 p.
- [ROSS 1977] D.-T. ROSS (1977), *Structured Analysis: a language for Communicating Ideas*, Conférence internationale IEEE Transaction on Software Engineering, pp. 15-34
- [SAITO & al 1991] K. SAITO, T. MIYOSHI, H. YOSHIKAWA (1991), *Non-contact 3D digitizing and machining system for free-form surfaces*, CIRP Annals 40/1, pp. 483
- [SERRAFERO & al 2007] P. SERRAFERO, S. GOMES, D. MONTICOLO (2007), *Ingénierie innovante, collaborative et apprenante : vers une CAO en 5D au service de la mobilité congruente*, Workshop C2EI Capitalisation et réutilisation des connaissances métier en conception de systèmes mécaniques, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 13 p.
- [SHIRKY 2005a] C. SHIRKY (2005), *Ontology Is Overrated*, Conférence O'Reilly ETech
- [SHIRKY 2005b] C. SHIRKY (2005), *Folksonomies & Tags: The rise of user-developed classification*, Conférence IMCExpo
- [SIEKIERSKI 2003] J. SIEKIERSKI (2003), *Reverse Engineering in jewellery applications*, 8^{ème} Conférence internationale 3D Modelling, Paris, 3 p.
- [SOUFFEZ & al 2005] J.-M. SOUFFEZ, G. DUMONT (2005), *Simplification sans perte de maquettes numériques en vue de leur exploitation en réalité virtuelle*, 9^{ème} colloque national AIP Primeca, La Plagne, 10 p.
- [TICHKIEWITCH & al 1995] S. TICHKIEWITCH, E. CHAPA KASUSKY, P. BELLOY (1995), *Un modèle produit multivues pour la conception intégrée*, Congrès international de Génie Industriel de Montréal – La productivité dans un monde sans frontières, vol. 3, pp. 1989-1998
- [TICHKIEWITCH 1995] S. TICHKIEWITCH (1995), *Ingénierie simultanée, ingénierie concurrente : le point de vue du chercheur*. Colloque L'ingénierie simultanée, Pôle Régional de Conception et d'Innovation, Belfort, vol. 2, pp. 1-6
- [VAN HOUTEN & al 2000] F.J.A.M. VAN HOUTEN, F. KIMURA (2000), *The virtual maintenance system: a computer-based support tool for robust design*, product monitoring, fault diagnosis and maintenance planning, Manufacturing Technology, Annals of the CIRP, 49/1, pp. 91-94
- [VANDENDRIESSCHE 2005] O. VANDENDRIESSCHE (2005), *Mise en œuvre d'une solution métier intégrée pour la filière électrique*, Société VOLVO IT, Conférence MICAD
- [VINCK & al 1995] D. VINCK, A. JEANTET (1995), *Commissioning or mediating objects in the sociotechnical process of product design : a conceptual approach*, COST Social Sciences Serie

- [WILLIAMS 2003] R. WILLIAMS (2003), *Reverse Engineering the greek comic mask*, 8^{ème} Conférence internationale 3D modeling, Paris, 8 p.
- [WOODS & al 2003] E. WOODS, P. MASON, M. BILLINGHURST (2003), *MagicMouse: an Inexpensive 6-Degree-of-Freedom Mouse*, Conférence Graphite, Melbourne

9.2.4 SOURCES DIVERSES

- [3DEXPLORER 2005] 3DEXPLORER (2005), *Création et visualisation de pages html en navigation 3D*, <http://www.3dexplorer.com/>, page consultée le 01/02/05
- [BERNARD 2003] A. BERNARD (2003), *Rétro-conception : outils et applications*, Cours de 3^{ème} année, ENSAM, Angers
- [CAD-MAGAZINE 2005] CAD-MAGAZINE (2005), *CAO AEC : l'architecte et le numérique*, Revue n°124, pp.24-32
- [CAD-MAGAZINE 2006] CAD-MAGAZINE (2006), *Archéologie industrielle : la 3D redonne vie à une locomotive à vapeur de 1879*, Newsletter n°21, juin 2006
- [COLLADA 2005] Collada public forum, <http://collada.org>, site consulté le 01/03/05
- [CPNI 2004] CPNI (2004), *Rapport d'activité sur les thématiques du laboratoire Conception de Produit et Innovation*, ENSAM Paris, 2004
- [ERMINE & al 2003] J.-L. ERMINE, N. MATTA (2003), *Initiation à la méthode MASK*, CD-ROM édité par l'Université de Technologie de Troyes, version 1.1
- [GOMES 2002] S. GOMES (2002), *Les systèmes de gestion technique : SGDT, SGBD et PLM*, Cours de Conception de Produits, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, semestre de printemps 2002
- [GRAZ 2005] UNIVERSITE de TECHNOLOGIE de GRAZ (2005), *Source pour la création d'applications en réalité augmentée*, http://studierstube.org/invisible_train, site consulté le 01/03/05
- [GUERIN 2007] G. GUERIN (2007), *Au fil de l'eau... au fil du temps*, Hippocampe – Le journal des diplômés de Centrale Nantes, n°54, pp. 8-22
- [HARVEST 2005] MICAD 2005 : *la visualisation immersive*, Revue Harvest, n°88, pp.8
- [HOUDIN 2005] J.-P. HOUDIN (2005), *La reconstitution du chantier de la Grande Pyramide de Kheops*, Conférence de l'Ecole Centrale de Nantes, 12 janvier 2005
- [HOUDIN 2007] J.-P. HOUDIN (2007), *3D Unveils the Mystery of the Great Pyramid*, <http://www.3ds.com/introduction>, site web consulté le 30/03/2007
- [HURIET 1997] C. HURIET (1997), *Images de synthèse et monde virtuel techniques et enjeux de société*, Rapport n°168, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Sénat, Paris
- [IEEE 2004a] Institute of Electrical and Electronics Engineers, <http://www.ieee.org>, site consulté le 01/11/04
- [IEEE 2004b] IEEE P1600.1 (2004), *Standard Upper Ontology Working Group (SUO WG)*, <http://suo.ieee.org>
- [MICAD 2005] MICAD, *Tools and methodologies for product design, manufacture and lifecycle management*, 24^{ème} Conférence internationale, Paris
- [MICADO 2002] MICADO (2002), *Compte rendu de la commission gestion des connaissances du 7 novembre 2002*, Etats généraux de la CFAO, 8 p.
- [MILLET 2003] S. MILLET (2003), *Le SADT*, Cours de DEA, ENSAM Paris
- [MILLET 2004] D. MILLET (2004), *Un guide pour l'élaboration d'une thèse en Génie Industriel*, Laboratoire Conception de Produit et Innovation, ENSAM Paris, 20 p.
- [MORAND 2007] B. MORAND (2007), *Diagramme de structure statique (UML) - Classe : définition et notation*, <http://www.iut3.unicaen.fr/~moranb/cours/acsi/static2/stat3.htm>, site web consulté le 26/08/2007
- [NOY & al 2004] N.L. NOY, D.L. MCGUINNESS (2004), *Ontology Development*, http://protege.stanford.edu/publications/ontology_development/ontology101-noy-mcguinness.html
- [OSAKA 2005] UNIVERSITE d'OSAKA (2005), *Source pour la création d'applications en réalité augmentée*, <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit>, site consulté le 01/05/05
- [PARALLELGRAPHICS 2005] Parallelgraphics, *Le format VRML*, <http://www.parallelgraphics.com>, site consulté le 01/02/05
- [PERF-RV 2004] PERF-RV (2004), *Rapport de synthèse finale*, Projet PERF-RV, réseau RNTL, 64 p. 132
- [PIECHOCKI 2007] L. PIECHOCKI (2007), *l'UML en français*, <http://uml.free.fr>, site web consulté le 26/08/2007
- [PSA 2005] Réseau gestion des connaissances PSA (2005), http://www.dpta.inetpsa.com/reseau_gestion_connaissances, consulté le 01/09/05
- [RNTL 2000] Réseau National des Technologies Logicielles (2000), *Le projet Dynamicité*, <http://www.telecom.gouv.fr/rntl/FichesA/Dynamicite.htm>, page consultée le 13/10/04
- [RNTL 2004] Réseau National en Technologies Logicielles (2004), *Libre blanc*, 34 p.
- [ROCHE 2004] C. ROCHE (2004), *L'ontologie chez Condillac Group*, <http://ontology.univsavoie.fr/activites/recherche/ontologie/notreDefinitionEng.asp>

- [ROSS & al 2004] S. ROSS, M. DONNELLY, M. DOBREVA, D. ABBOTT, A. MCHUGH, A. RUSBRIDGE (2004), *DigiCULT Technology Watch Report 3*, 297 p.
- [SMITH & al 2004] M.K. SMITH, C. WELTY, D.L. MCGUINNESS (2004), *OWL Web Ontology Language Guide – Introduction*, <http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-guide-20040210>
- [SOWA 2004] J.F. SOWA (2004), *KR Ontology*, <http://www.jfsowa.com/ontology>
- [SPACEMANTIX 2002] Projet Européen SPACEMANTIX (2002), *State of the Art Report in Science and Technology*, Délivrable 3.1, 107 p.
- [SPACEMANTIX 2005] Projet Européen SPACEMANTIX (2005), <http://www.spacemantix.org>, site consulté le 05/05/05
- [TOURTIER 1995] P.-A. TOURTIER (1995), *Analyse préliminaire des métiers et de leurs interactions*, Rapport intermédiaire du projet GENIE, INRIA-Dassault-Aviation
- [UML 2007] UML (2007), *UML® Resource Page*, <http://www.uml.org>
- [USINE NOUVELLE 2006] USINE NOUVELLE (2006), *Le journal des régions – le patrimoine industriel à l'honneur*, L'usine nouvelle n°3022, 14 septembre 2006, pp. 74-82
- [VINCK 2004] D. VINCK (2004), *Production d'objets intermédiaires*, Etat de la réflexion, Département STIC CNRS, RTP 37
- [WAKITA & al 1999] A. WAKITA, M. YAJIMA, T. HARADA, H. TORIYA, H. CHIYOKURA (1999), *XVL Technology - A compact and qualified 3D representation with lattice mesh hand surface for the internet*, White paper, <http://www.xvl3d.com/en/technology/wp.pdf>, page consultée le 03/12/04, 7 p.
- [X3D 2005] Web3D Consortium (2005), <http://www.web3d.org>, site consulté le 01/03/05
- [ZDNET 2007] ZDNET (2007), *UML aide à formaliser précisément les fonctionnalités et le comportement d'une application Java - concepts de base*, http://www.zdnet.fr/builder/architecture/conception_integration_si/0_39021041_39115501-2_00.htm, site web consulté le 26/08/2007

9.3 SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES

9.3.1 SOURCES ET OUVRAGES GENERAUX

- [ARENDRT 2002] A. ARENDRT (2002), *La condition de l'homme moderne*, Collection Agora Paris, ISBN 2-266-12649-0, 406 p.
- [ARISTOTE rééd.1992] ARISTOTE (rééd.1992), *Ethique à Nicomaque*, Réédition, Librairie Générale Française, Paris, 447 p.
- [BARTHES 1974] R. BARTHES (1974), *Roland Barthes*, Editions d'Aix-en-Provence, 95 p.
- [BELOT & al 2007] R. BELOT, P. LAMARD (2007), *Peugeot à Sochaux, des hommes, une usine, un territoire*, Panazol, La Vauzelle
- [BONNOT 2002] T. BONNOT (2002), *La vie des objets – d'ustensiles banals à objets de collection*, Editions MSH, 244 p., ISBN 2735109348
- [BROCHU & al 1999] D. BROCHU, J. DAVALLON, C. CAMIRAND, H. GOTTESDIENER, J. LE MAREC, A. LEMIEUX, M.-S. POLI, K. TARI (1999), *Les musées face à l'édition multimédia*, ouvrage publié dans le cadre de l'Accord France-Canada pour la coopération et les échanges dans le domaine de la muséologie, Dijon, ISBN 2-11-091676-1, 150 p.
- [COTTE 2003] M. COTTE (2003), *Le canal du Midi*, Editions Belin, 2^{ème} Ré-édition, ISBN 2-7011-2933-8, 191 p.
- [COTTE 2005b] M. COTTE (2005), *De l'espionnage à la veille...*, ISBN 2-84867-090-8, 294 p.
- [COTTE 2007b] M. COTTE (2007), *Le choix de la révolution industrielle. Les entreprises de Marc Seguin et ses frères (1815-1835)*, Collection Carnot, Presses Universitaires de Rennes, ISBN 978-2-7535-0476-9, 573 p.
- [CUENCA & al 2005] C. CUENCA, Y. THOMAS, C. BALLE, A. BALLE, P. BRENNI, V. GRATAS, R. HALLEUX, B. JACOMY, J. LENGEL, L. PASCAIL, G. RAMUNI, D. THOULOZE (2005), *Le Patrimoine scientifique et technique contemporain*, Editions L'Harmattan, ISBN 2-7475-9675-5, 267 p.
- [DARWIN 1969] C. DARWIN (1969), *la théorie de l'évolution*, réédition, Collection les Grands textes, Paris, ISSN 1141-8826, 237 p.
- [DAVAL 1950] R. DAVAL (1950), *La métaphysique de Kant*, Presses Universitaires de France, pp.20
- [de BARY & al 1998] M.-O. de BARY, J.-M. TOBELEM (1998), *Manuel de muséographie : Petit guide à l'usage des responsables de musée*, ouvrage publié avec le concours du CG de la Haute-loire et de la DRAC Auvergne, ISBN 2-84049-128-1, 350 p.
- [de VIRVILLE & al 1977] M. de VIRVILLE, D. GLUCK, M. HAMON, J. NICOURT, S. TARDIEU (1977), *Système descriptif des objets domestiques français*, ISBN 2-7118-0063-6, 291 p.

- [DELEUZE & al 1980] G. DELEUZE, F. GUATTARI (1980), *Mille plateaux. Capitalisme et schizophrénie*, Collection Critique, Editions de Minuit, Paris, ISBN 2-7073-0307-0, pp. 14-15
- [DENOYEL 2000] N. DENOYEL (2000), *Le biais du gars, la métis des grecs et la raison expérimentelle. Contribution à l'étude de la culture artisanale et de l'éc(h)oformation*, Villeneuve d'Ascq, Presses Universitaires du Septentrion, 720 p.
- [DETIENNE & al 1974] M. DETIENNE, J.-P. VERNANT (1974), *Les ruses de l'intelligence, la métis des grecs*, Paris, Champs Flammarion, 309 p.
- [EIFFEL 1909] G. EIFFEL (1909), *Recherches expérimentales sur la résistance de l'air exécutée à la Tour Eiffel*, 98 p.
- [FIGUIER 1865] L. FIGUIER (1865), *Les grandes inventions – anciennes et modernes – dans les sciences, l'industrie et l'art - Préface*, 3^{ème} édition, Librairie Hachette, Paris, pp. 1-2
- [FIGUIER 1876] L. FIGUIER (1876), *Le savant du foyer ou notions scientifiques sur les objets de la vie - Préface*, 7ème édition, Librairie Hachette, Paris, pp. 1-4
- [FIGUIER 1884] L. FIGUIER (1884), *Les nouvelles conquêtes de la science – l'électricité - Préface*, Librairie Furne, Paris, pp. 1-3
- [FIGUIER 1896] L. FIGUIER (1896), *Les merveilles de la science - Préface*, Tome 1, Librairie Furne, Paris, pp. 1
- [GORDON & al 1994] R.B. GORDON, P.M. MALONE (1994), *The texture of Industry, An archaeological view of the industrialization of North America*, Presses universitaires d'Oxford, ISBN 0-1951-11-419
- [GINGRAS 1997] F.-P. GINGRAS (1997), *La théorie et le sens de la recherche*, 3^{ème} édition, Sainte-Foy, Presses de l'Université du Québec Beaufils, pp. 104
- [HEREDUC 2005] HEREDUC (2005), *Le patrimoine dans la salle de classe – un manuel à l'usage des enseignants*, Projet Européen Hereduc, Editions Garant, ISBN 90-441-1802-1, 153 p.
- [HUXLEY 1970] Sir J. HUXLEY (1970 et 1973), *Memories*, mémoires en 2 volumes, Editions G. Allen & Unwin, Londres, 296 p. + 269 p.
- [KANT rééd.1984] I. KANT (reéd.1984), *Critique de la raison pure*, Réédition, traduction TREMESAYGUES et PACAUD, Presses Universitaires de France, pp.151
- [KUHN 1970] T. Kuhn (1970), *La structure des révolutions scientifiques*, 284 p.
- [LAMARD & al 2005] P. LAMARD, Y.-C. LEQUIN (2005), *La technologie entre à l'université*, Imprimerie Metthez, ISBN 2-914279-24-8, 387 p.
- [LEROI-GOURHAN 1943] A. LEROI-GOURHAN (1943), *Evolution et techniques - L'homme et la matière*, Ré-édition de 1971, ISBN 2-226-06213-0, 348 p.
- [MANIGAND-CHAPLAIN 1999] C. MANIGAND-CHAPLAIN (1999), *Les sources du patrimoine industriel*, par l'Inventaire Général et le CILAC, Editions du patrimoine, ISBN 2-9513157-0-8, 96 p.
- [MERCIER 1989] A. MERCIER (1989), 1794, *l'Abbé Grégoire et la création du Conservatoire national des arts et métiers*, Musée national des techniques, CNAM, Paris, 51 p.
- [MONOD 1970] J. MONOD (1970), *Le Hasard et la nécessité*, Éditions du Seuil, Paris, 259 p.
- [MORRIS 1938] C. MORRIS (1938), *Foundation of the theory of signs*, Encyclopédie Internationale des Sciences Unifiées, vol. 1, n°2, Presses Universitaires de Chicago
- [MOSCHEROSCH 1656] J.-M. MOSCHEROSCH (1656), *Technologie allemande et française*, dans *Trésor de la langue française*, Edition Gallimard, Paris
- [OTT 1993] E. OTT (1993), *Chaos in dynamical systems*, Presses universitaires de Cambridge
- [PAINLEVE & al 1913] P. PAINLEVE, G. BONNIER, R. BERTIN, F. BLOCH, A. FERNBACH, M. LABBE, E. LEROY, L. MARCHIS, A. NAQUET, P. STRAUSS, E.-L. TROUËSSART, *Le monde et la science - préface*, encyclopédie collective, Volume 1, librairie Schwarz & Cie, Paris, n.d., ~1913, pp. 3-4
- [PRESSOUYRE 1993] L. PRESSOUYRE (1993), *La convention du patrimoine mondial 20 ans après*, Editions UNESCO, 66 p.
- [RASSE 1997] P. RASSE (1997), *Techniques et Cultures au Musée*, Presses universitaires de Lyon, ISBN 2-7297-0577-5, 229 p.
- [RIVIERE 1989] G. H. RIVIERE (1989), *La muséologie selon Georges Henri Rivière*, Editions de l'ICOM, pp. 82-83
- [SAUZEREAU 2002] M. SAUZEREAU (2002), *L'usine : des machines et des hommes*, 3^{ème} cahier de l'Association Une tour une histoire, Couëron, ISBN 2-9512155-0-9, 95 p.
- [SHANNON 1948] C. E. Shannon (1948), *A Mathematical Theory of Communication*, Journal Bell System Technical Journal, volume 27, ISBN 0252725484
- [SIMONDON 1989] G. SIMONDON (1989), *Du mode d'existence des objets techniques*, Editions Aubier, ISBN 2-7007-3414-9, 333 p.
- [WORONOFF 1994] D. WORONOFF (1994), *Histoire de l'industrie en France*, Editions du seuil
- [WORONOFF 2003] D. WORONOFF (2003), *La France industrielle*, Paris, Editions du Chêne

9.3.2 TRAVAUX UNIVERSITAIRES, MASTER, THESES ET HABILITATIONS A DIRIGER LES RECHERCHES (HORS CAS D'ETUDE)

- [BOY 1993] D. BOY (1993), *Les français et les techniques*, Actes du colloque REMUS, 12 et 13 décembre 1991, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532
- [CAMACHO 2004] V. CAMACHO (2004), *Les images de synthèses tridimensionnelles animées : entre tradition et innovation artistique*, Thèse de doctorat, INA
- [COTTE 1995] M. COTTE (1995), *Le fonds d'archives Seguin : aux origines de la révolution industrielle en France*, Thèse de doctorat, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales
- [FLON 2005] E. FLON (2005), *Musée archéologique, paysage et contextualisation : la mise en scène des sites archéologiques*, Mémoire de doctorat, Université d'Avignon
- [LAMARD 1988] P. LAMARD (1988), *Histoire d'un capitalisme familial au 19^{ème} siècle : le capital Japy (1777-1910), Belfort, Société Belfortaine d'émulation*, Thèse de doctorat, soutenue en 1984 à l'UFC Besançon
- [LAVOISY 2000] O. LAVOISY (2000), *La matière et l'action – le graphisme technique comme instrument de la coordination industrielle dans le domaine de la mécanique depuis trois siècles*, Thèse de doctorat, Laboratoire CRISTO, INPG, Grenoble, 293 p.
- [LECAILLE 2003] P. LECAILLE (2003), *La trace habilitée - Une ethnographie des espaces de conception dans un bureau d'études de mécanique : l'échange et l'équipement des objets grapho-numériques entre outils et acteurs de la conception*, Thèse de doctorat, laboratoire CRISTO, INPG, Grenoble

9.3.3 SOURCES PERIODIQUES SCIENTIFIQUES

- [AIT KACI & al 2003] Y. AIT KACI, N. MESTAOUI (2003), *La réalité hybride : installation interactive [v-med 2.0] et architecture du centre culturel français de Palerme et de Sicile*, Colloque international ICHIM, 26 p.
- [ANDRE 2006] B. ANDRE (2006), *Entre réaffectation économique et sens des lieux : retour sur des expériences passées et en cours*, Journée d'étude sur le Patrimoine industriel comme vecteur de reconquête économique, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 9 juin 2006
- [AVILES COLLAO & al 2003] J. AVILES COLLAO, L. DIAZ-KOMMONEN, M. KAIPAINEN, J. PIETARILA (2003), *Soft ontologies and similarity cluster tools to facilitate exploration and discovery of cultural heritage resources*, Colloque international ICHIM, 11 p.
- [AYRAULT 2002] J.-M. AYRAULT (2002), *Nantes, d'isles en île*, revue *Archéologie industrielle en France*, n°41, Paris, pp. 78-83
- [BACHIMONT 2001] B. BACHIMONT (2001), *L'archive numérique : entre authenticité et interprétabilité*, *Revue Archives*, Volume 32, n°1, 13 p.
- [BEAUNE 1993] J.-C. BEAUNE (1993), *Histoire épistémologique – le temps des sciences et le temps du musée*, Colloque REMUS, 12 et 13 décembre 1991, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532, p. 168
- [BELAËN 2003] F. BELAËN (2003), *L'immersion au service des musées de sciences*, Colloque international ICHIM, 17 p.
- [BELOT 2006] R. BELOT (2006), *Le patrimoine industriel comme vecteur de reconquête économique*, Journée d'étude sur le Patrimoine industriel comme vecteur de reconquête économique, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 9 juin 2006
- [BERGERON 2006] L. BERGERON (2006), *Conclusion du colloque*, Journée d'étude sur le Patrimoine industriel comme vecteur de reconquête économique, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 9 juin 2006
- [BONNEUIL 2004] C. BONNEUIL (2004), *Les transformations des rapports entre sciences et société en France depuis la Seconde Guerre mondiale : un essai de synthèse*, Colloque Sciences, Médias et Société, Lyon, 26 p.
- [BORGATTI & al 2005] C. BORGATTI, M. FELICORI, M. CHIARA LIGUORI, A. GUIDAZZOLI, S. PESCARIN (2005), *Integration and communication of cultural contents: the experience of the certosa virtual museum*, Colloque international ICHIM, 16 p.
- [BOROWCZYK 2007] J. BOROWCZYK (2007), *Louis Gaultier, professeur de géométrie descriptive à l'école de dessin du Conservatoire des Arts et Métiers de 1807 à 1848*, 132^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Arles
- [CAUJET & al 2007] B. CAUJET, A. CONSTANS (2007), *Restitution par l'image des dynamiques d'exploitation minière de la protohistoire et de l'Antiquité*, 132^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Arles

- [COTTE & al 2005a] M. COTTE, S. DENIAUD (2005), *CAO et patrimoine : perspectives innovantes*, revue Archéologie industrielle en France, n°46, Paris, pp. 32-38
- [COTTE 2004a] M. COTTE (2004), *Réalisation de maquettes numériques de machines anciennes par des outils de la CAO*, Congrès du CILAC 2004, Le Creusot, 23-26 septembre 2004
- [COTTE 2004b] M. COTTE (2004), *L'objet et ses phases de vie*, Congrès d'histoire des sciences et des techniques, Poitiers
- [COTTE 2004c] M. COTTE (2004), *Les maquettes numériques appliquées au patrimoine technique et industriel : un enjeu de recherche universitaire qui concerne les collectivités*, Recherche et développement local, Rencontres Université & Cité, Université de Nantes, actes des rencontres des 9-11 décembre 2004, p. 179-182
- [COTTE 2005a] M. COTTE (2005), *Une vision épistémologique des objets : de la technologie à l'histoire*, Introduction à la 3^{ème} Journée d'étude O.S.TIC, Institut de l'Homme et de la Technologie, Nantes, septembre 2005, 9 p.
- [COTTE 2007a] M. COTTE (2007), *La génétique technique a-t-elle un avenir comme méthode de l'histoire des techniques ?*, Colloque SFHST, Lille
- [CRISTINA & al 2004] H. CRISTINA, G. LEITÃO, J. STOLFI (2004), *Digital reconstruction of fragmented artifacts*, Colloque international ICHIM, 16 p.
- [CUENCA 2000] C. CUENCA (2000), *Patrimoine scientifique et technique de la recherche. Projet régional de sauvegarde du patrimoine du 20^{ème} siècle*, Actes des journées d'études de l'Office de Coopération et d'Information Muséographiques, Dijon, ISBN 2-11-092787-9, 140 p.
- [DACOS 1999] M. DACOS (1999), *Le numérique au secours du papier*, Revue Cahiers d'histoire, numéro 1999-1, 27 p.
- [DAEFFLER 2007] M. DAEFFLER (2007), *De l'épave à l'image de synthèse. Reconstitution et analyse de navires anciens par la conception assistée par ordinateur*, 132^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Arles
- [DALBERA & al 2003] J.-P. DALBERA, M. FOULONNEAU (2003), *Recherche et numérisation du patrimoine culturel*, Colloque international ICHIM, 23 p.
- [DAVALLON & al 1993] J. DAVALLON, H. GOTTESDIENER, E. TRIQUET (1993), *Du média exposition à la muséologie*, Colloque REMUS, 12 et 13 décembre 1991, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532, pp. 82-94
- [de NOBLET 2005] J. de NOBLET (2005), *Patrimoine et avant-garde scientifique et technique au 21^{ème} siècle : Quel passé pour quel avenir du système des objets ?*, Journée d'étude O.S.TIC, Institut de l'Homme et de la Technologie, Nantes, mars 2005
- [DIEZMANN 2004] Tanja DIEZMANN (2004), *Real virtuality*, Colloque international ICHIM, 7 p.
- [DOREL-FERRE 2006] G. DOREL-FERRE (2006), *Logiques spatiales, logiques sociales : quel impact patrimonial ?*, Journée d'étude *Quelle place pour le travail dans le patrimoine industriel ?*, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, Laboratoire LAMOP
- [DUVAL 1993] J.-P. DUVAL (1993), *Outils de conception et scénographie*, Colloque REMUS, 12 et 13 décembre 1991, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532, pp. 16-17
- [FIOREZZOLI 2004] G. FIOREZZOLI (2004), *La 3D révèle le fonctionnement de l'automobile de Léonard de Vinci*, Revue La Forge, n°18, pp.44-45
- [FREETH & al 2006] T. FREETH, Y. BITSAKIS, X. MOUSSAS, J. H. SEIRADAKIS, A. TSELIKAS, H. MANGOU, M. ZAFEIROPOULOU, R. HADLAND, D. BATE, A. RAMSEY, M. ALLEN, A. CRAWLEY, P. HOCKLEY, T. MALZBENDER, D. GELB, W. AMBRISCO, M. G. EDMUNDS (2006), *Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera Mechanism*, Revue nature n° 444, pp.587-591
- [GELIN & al 2003] R. GELIN, J.-P. MARTINS (2003), *Interaction physique avec le monde virtuel*, Colloque international ICHIM, 16 p.
- [GENIE CIVIL 1883] Revue du Génie Civil (1883), *Montage de la statue de la Liberté dans les ateliers de MM Gaget, Gautier et Cie*, Tome 3, n°19, 1^{er} août 1883, pp. 466
- [GENIN 2004] C. GENIN (2004), *Culture numérique : une contradiction dans les termes ?*, Colloque international ICHIM, 18 p.
- [HALLEUX 2005] R. HALLEUX (2005), *Le patrimoine des sciences physiques en Belgique*, Colloque La physique dans la société contemporaine, Conservatoire National des ARTS-ET-METIERS, Paris
- [HALLEUX 2006] R. HALLEUX (2006), *Patrimoine de la recherche et patrimoine industriel. Un chantier européen*, Journée d'étude, Musée des ARTS-ET-METIERS, Paris, avril 2006
- [HERREMAN 2004] Y. HERREMAN (2004), *Réflexions sur le patrimoine immatériel*, Revue Les nouvelles de l'ICOM, n°2, pp. 10-11
- [JACOMY 1993] B. JACOMY (1993), *Musée des ARTS-ET-METIERS : entre émotion et pédagogie*, Colloque REMUS, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532, pp. 47
- [JACOMY 1994] B. JACOMY (1994), *L'homme-machine*, Revue des Arts-et-Métiers n°8, septembre 1994
- [KEROUANTON 2005] J.-L. KEROUANTON (2005), *Comment appréhender les territoires et les enjeux du patrimoine technique et industriel ?*, Journée d'étude O.S.TIC, Institut de l'Homme et de la Technologie, Nantes, mars 2005
- [LAMARD 2005] P. LAMARD (2005), *Une expérience de numérisation du patrimoine matériel : l'équatorial coudé*, Colloque Mémoire et culture matérielle de l'université, Université Nancy 2, 8 mai 2005
- [LANE & al 2003] C. LANE, N. PARRY (2003), *The memory machine: sound and memory at the british museum*, Colloque international ICHIM, 8-12 septembre 2003, 25 p.

- [Le COADIC 1993] Y. F. Le COADIC (1993), *La muséologie des sciences et des techniques en 1991*, Colloque REMUS, 12 et 13 décembre 1991, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532, pp. 230-233
- [LEE 2005] J.L. LEE (2005), *Little did he know : Gustave Eiffel's unknowing contribution to supersonic aeronautics*, Colloque international à l'occasion du Centenaire de l'expérience de Gustave Eiffel sur la résistance de l'air à la Tour, ASME, Paris
- [LOOMIS 1991] R. J. LOOMIS (1991), *Publics - Planification pour le visiteur*, Colloque REMUS, 12 et 13 décembre 1991, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532, pp. 110-112
- [MAKKUNI 2003] R. MAKKUNI (2003), *Culture as a driver of innovation*, Colloque international ICHIM, 8-12 septembre 2003, 14 p.
- [MARIOT 2006] S. MARIOT (2006), *Okhra : une coopérative multi-partenaire à vocation culturelle*, Journée d'étude sur le Patrimoine industriel comme vecteur de reconquête économique, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 9 juin 2006
- [MATHIEU 2005] H. MATHIEU (2005), *Les grandes dates des politiques culturelles françaises*, Rencontres nationales des Chantiers thématiques Animafac, Université Paris 8, 15 p.
- [MICHEL 2007] A.-P. MICHEL (2007), *Du document visuel à la reconstitution virtuelle : l'image de synthèse des usines Renault de Billancourt pendant l'entre-deux-guerres*, 132^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Arles
- [MONTPETIT 1996] R. MONTPETIT (1996), *Une logique d'exposition populaire*, *Revue Publics & Musées*, n°9, pp. 55-100
- [MORELLI 2003] P. MORELLI (2003), *Entre texte et contexte : de la conservation de l'oeuvre d'art par le numérique*, Colloque international ICHIM, 31 p.
- [PIGEAUD & al 2007] R. PIGEAUD, M. DEVEAU, N. PAPANODITIS (2007), *Réalité virtuelle, réalité souterraine : les fac-similés numériques en trois dimensions des grottes ornées paléolithiques. Intérêt et méthodes*, 132^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Arles
- [PILLON 2005] D. PILLON (2005), *Des hypothèses archéologiques, au travail d'archives et à la mise en scène virtuelle : la ville de Laval au Moyen-Age*, Journée d'étude OSTIC, Institut de l'Homme et de la Technologie
- [QUERE 2005] B. QUERE (2005), *L'évolution du graphisme technique de 1750 à 1850*, Journée d'étude O.S.TIC, Institut de l'Homme et de la Technologie, Nantes
- [RASSE 1993] P. RASSE (1993), *Communication et muséologie des techniques*, Colloque REMUS, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532, pp. 18-23
- [REEDIJK 1999] Hein REEDIJK (1999), *Quel musée pour les sociétés du 21^{ème} siècle ?*, La lettre de l'OCIM n°63, 1999, pp. 30-34
- [REMUS 1993] REMUS (1993), *La muséologie des sciences et des techniques*, Colloque REMUS des 12 et 13 décembre 1991, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532, 235 p.
- [RENIMEL 1985] S. RENIMEL (1985), *Nouvelles muséologies - Musée présent, techniques actuelles*, ouvrage collectif *Muséologie nouvelle et expérimentation sociale*, direction A. NICOLAS, ISBN 2-906045-00-4, pp. 115-134
- [ROLLAND-VILLEMOT 2001] B. ROLLAND-VILLEMOT (2001), *Le traitement des collections industrielles et techniques, de la connaissance à la diffusion*, La lettre de l'OCIM n°73, pp. 13-18
- [SAINT-AUBIN 2007] J.-P. SAINT-AUBIN (2007), *Les nouveaux outils du dessin archéologique face à l'urgence*, 132^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Arles
- [SHINBROT & al 1992] T. SHINBROT, W. DITTO, C. GREBOGI, E. OTT, M.L. SPANO, J.A. YORKE (1992), *Using the Sensitive Dependence of Chaos to Direct Orbits to Targets in an Experimental Chaotic Systems*, *Physical Review Letter* n°68
- [SHINBROT & al 1993] T. SHINBROT, C. GREBOGI, E. OTT, J.A. YORKE (1993), *Using Small Perturbations to Control Chaos*, *Revue Nature* n°363
- [SMITH 2006] P. SMITH (2006), *Manufactures de l'Etat (tabacs et allumettes) : devenirs divers...*, Journée d'étude sur le Patrimoine industriel comme vecteur de reconquête économique, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 9 juin 2006
- [SOUBIRAN 2007] S. SOUBIRAN (2007), *Patrimoine des universités et médiation scientifique*, La lettre de l'OCIM n°109, janvier-février 2007, pp. 33-41
- [SUBSOL 2007] G. SUBSOL (2007), *Traitement automatique d'images scanographiques tridimensionnelles pour l'étude de fossiles paléo-anthropologiques*, 132^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Arles
- [SUNER 2005a] B. SUNER (2005), *De la modélisation à la restitution dynamique des ambiances en architecture*, Journée d'étude OSTIC, Institut de l'Homme et de la Technologie
- [SUNER 2005b] B. SUNER (2005), *Les outils et les méthodes pour la restitution des ambiances dans les lieux de spectacle*, Journée d'étude OSTIC, Institut de l'Homme et de la Technologie
- [THOULOZE 2005] D. THOULOZE (2005), *Le patrimoine scientifique et technique contemporain*, journée d'étude, Musée des ARTS-ET-METIERS, Paris
- [THOULOZE 2006] D. THOULOZE (2006), *Recherche et développement dans l'entreprise : conserver l'instrumentation, pourquoi, comment ?*, Journée d'étude, Musée des ARTS-ET-METIERS, Paris
- [WELGER-BARBOZA 2003] C. WELGER-BARBOZA (2003), *Le musée virtuel à l'épreuve de l'enseignement et la recherche en histoire de l'art*, Colloque international ICHIM, 17 p.

9.3.4 SOURCES DIVERSES

- [BERKHEIM 1809] K.G. de BERKHEIM (1809), *Lettres sur Paris*, ou correspondance de M. XXX dans les années 1806 et 1807, HEIDELBERG, MOHR et ZIMMER
- [CHABANAUD 1997] I. CHABANAUD (1997), *Le Vol d'Icare*, <http://icare.cicv.fr>, site consultée le 13/01/04
- [CHEVALIER 2006] S. CHEVALIER (2006), *L'interactivité avec Subdo*, société VB2S, Les rencontres industrielles de l'Ingenierium de Laval, 9 novembre 2006
- [COTTE & al 2000] M. COTTE & al (2000), *Le Train Jaune des Pyrénées Orientales*, Dossier de candidature au patrimoine mondial de l'UNESCO, 152 p.
- [COTTE & al 2004] M. COTTE, A. BERNARD, S. DENIAUD (2004), *Compte-rendu de la Journée d'étude en vue de la mise en place d'un Groupe d'intérêt sur les maquettes numériques et la réalité virtuelle pour le patrimoine*, organisée par le Centre François Viète de l'Université de Nantes et l'IRCCyN de l'Ecole centrale de Nantes, 5 mars 2004
- [CRYSTAL PALACE 2005] Le CRYSTAL PALACE (2005), Reconstitution en VRML, <http://www.iath.virginia.edu/london/model/>, site consulté le 01/02/05
- [d'AUBERT 2006] F. d'AUBERT (2006), Laval virtuelle et... historique, Edito de Laval Infos, n°112, avril 2006, pp.3
- [KEROUANTON 2004] J.-L. KEROUANTON (2004), *Pour la grue Titan 01 du quai Wilson, Nantes*, Dossier de candidature à la liste nationale des monuments historiques, DRAC Pays de la Loire, 17 p.
- [LEGIFRANCE 2006] LEGIFRANCE (2006), *Code pénal*, www.legifrance.gouv.fr, Site web consulté le 29/12/06
- [LEGIFRANCE 2007] LEGIFRANCE (2007), *Code du patrimoine*, www.legifrance.gouv.fr, Site web consulté le 12/07/07
- [STEWART 1997] T. STEWART (1997), *Intellectual Capital: The New Wealth of Organizations*, Journal Fortune
- [TICCIH 2003] TICCIH (2003), *Charte pour le patrimoine industriel*, Moscou, 4 p.
- [UNESCO 1972] UNESCO (1972), *Convention concernant la protection du patrimoine mondial culturel et naturel*, 17^{ème} Conférence générale, Paris, 17 p.
- [UNESCO 2003] UNESCO (2003), *Convention pour la sauvegarde du patrimoine culturel immatériel*, Paris, 14 p.
- [UNESCO 2004] UNESCO (2004), *Biens inscrits sur la liste du patrimoine mondial*, annexe à convention, 19 p.
- [UNESCO 2004] UNESCO (2004), *Biens inscrits sur la liste du patrimoine mondial*, Annexe à la convention, 19 p.
- [UNESCO 2005] UNESCO (2005), *Orientations devant guider la mise en oeuvre de la Convention du patrimoine mondial*, 163 p.
- [VPAH 2007] Les Villes et Pays d'art et d'histoire (2007), <http://www.vpah.culture.fr>, réseau national regroupant 124 villes de France animé par le ministère de la Culture et de la Communication

10. SOURCES DU CAS D'ETUDE PIGUET

10.1 CRITIQUE DES SOURCES

L'ensemble des sources utilisées pour cette étude historique provient des archives de l'ECOMUSEE du CREUSOT-MONTCEAU. Ces informations ont été recueillies en 1977 par M. BADET qui était technicien de l'ECOMUSEE lors de sa première visite à la scierie BRUNEL de La ROCHE-EN-BRENIL.

Pour sa première phase de vie à MONACO, aucun document n'a été retrouvé. Ayant eu quelques échanges avec PIGUET & Cie, M. BONNICHON à MOULINS, confia les documents en sa possession à M. BRUNEL à La ROCHE-EN-BRENIL lors de la vente de la machine. Enfin, l'ensemble des archives fut donné à l'ECOMUSEE après l'acquisition de la Machine à Vapeur.

L'analyse mécanique approfondie de la technologie PIGUET a pu être réalisée grâce à des ouvrages généraux provenant de la BIBLIOTHEQUE NATIONALE FRANÇOIS MITTERAND ou du CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS-ET-METIERS comme les CAHIERS DES EXPOSITIONS UNIVERSELLES. Elle démontre que le constructeur de la machine la vendait comme un objet robuste et fiable. Cependant, l'étude des nombreuses correspondances de M. BRUNEL nous permet de déduire que la machine a été mal entretenue soit à MONACO, soit à MOULINS.

Les nombreux rapports de l'APAVE ont également été d'un bien précieux car l'association missionnée pour garantir le bon fonctionnement des appareils électriques et à vapeur se devait d'établir régulièrement des contrôles sur l'installation de la scierie BRUNEL. Ainsi, nous avons pu en déduire les infrastructures techniques mises en place dans la scierie.

On notera également l'intérêt des plans d'implantation et des plans de la machine qui ont permis d'être corrélés avec les rapports des monteurs PIGUET.

Enfin, l'ensemble de la documentation iconographique issue d'une série de clichés photographiques réalisés par l'ECOMUSEE du CREUSOT-MONTCEAU en 1977 nous a permis d'avoir une dernière représentation de la machine assemblée et en fonctionnement. Comme l'atteste la figure 219, il est possible de voir certains composants légèrement floutés : le temps de pause relativement long de la photographie ne fait apparaître aucun rayon sur le volant. Ceci nous prouve que la machine fonctionnait encore lorsqu'il fut décidé de l'arrêter définitivement en 1977.

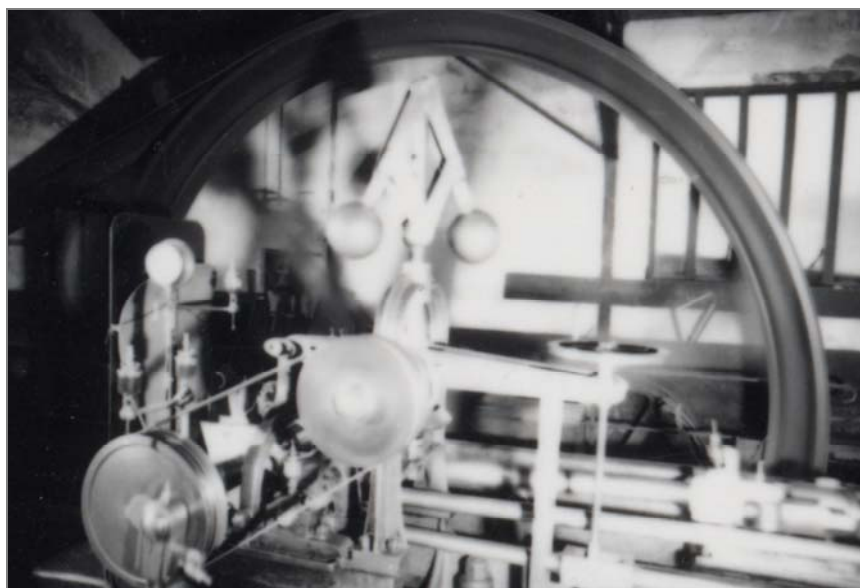


Figure 219 : 1977 – LA MACHINE PIGUET N°135 EN FONCTIONNEMENT

10.2 BIBLIOGRAPHIE DE LA MACHINE A VAPEUR

10.2.1 SUIVI DES CORRESPONDANCES

- PIGUET & CIE à M. BONNICHON, MOULINS, 5 juin 1917
- DUJARDIN & CIE à M. BONNICHON, MOULINS, 8 mars 1929
- TOSI DUJARDIN à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 29 septembre 1930
- TOSI DUJARDIN à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 28 novembre 1930
- Etablissements DUJARDIN & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 3 décembre 1930
- Etablissements DUJARDIN & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 6 décembre 1930
- BARTHEZ & CIE à Paul HEUMEZ, 5 septembre 1946
- Paul HEUMEZ, à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 12 septembre 1946
- Paul HEUMEZ à BARTHEZ & CIE, 12 septembre 1946
- Etablissements DUJARDIN & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 15 octobre 1946
- Etablissements DUJARDIN & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 26 février 1954
- Etablissements DUJARDIN & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 12 mai 1954
- Etablissements DUJARDIN & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 17 mai 1954
- Etablissements DUJARDIN & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 26 mai 1954
- Etablissements DUJARDIN & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 28 juin 1954
- Etablissements DUJARDIN & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 6 juillet 1954
- Etablissements DUJARDIN à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 8 juillet 1954
- Etablissements DUJARDIN LILLE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 10 décembre 1957
- Etablissements DUJARDIN & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 23 novembre 1961
- S.A. des Etablissements DUJARDIN & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 11 janvier 1963

- Etablissements DUJARDIN-MONTBARD-SOMENOR à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 24 novembre 1972
- Facture de *Cession d'une machine à vapeur Piguët en l'état*, BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, à Musée de l'Homme et de l'industrie, Le CREUSOT, 30 juin 1977

10.2.2 RAPPORTS DE CONTROLES

- Etablissements DUJARDIN & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 6 juillet 1954

10.2.3 DOCUMENTS TECHNIQUES

- Plan d'implantation : *Ste Anonyme de Distribution d'Eau, de Force et de Lumière - Usine de Monaco / Massif en béton de ciment portant les paliers extérieurs - Installation de 4 machines de 0.40*, copie du plan original du 5 décembre 1898, MOULINS, 12 février 1917
- Plan d'ensemble *Installation d'une machine à vapeur de 0.40 à droite*, copie du plan original du 8 octobre 1898, MOULINS, 5 juin 1917
- Plan d'architecture *Projet d'installation d'une machine à vapeur et d'une chaudière*, BRUNEL, la ROCHE-EN-BRENIL, n.d.⁵²⁴ (~1930)
- Notes personnelles + croquis de l'installation lors du démontage, M. BADET, Ecomusée du CREUSOT-MONTCEAU, 1977

10.3 BIBLIOGRAPHIE DE LA CHAUDIERE ET DU SYSTEME VAPEUR

10.3.1 SUIVI DES CORRESPONDANCES

- ALPAV⁵²⁵ à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 8 décembre 1930
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 15 avril 1946
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 1 février 1945
- PROGIL à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 18 janvier 1952
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 31 janvier 1952
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 28 juillet 1954
- BARBOTTE & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 8 novembre 1965
- BARBOTTE & CIE à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 7 décembre 1965

10.3.2 PIECES COMPTABLES

- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 1 octobre 1930
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 1 octobre 1932
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 10 novembre 1937

⁵²⁴ n.d. = non daté

⁵²⁵ ALPAV = Association Lyonnaise des Propriétaires d'Appareils à Vapeur

- ALPAV, Réglementation des installations électriques par le ministère du travail, n.d. (~1937)
- ALPAV, Nouveaux tarifs en vigueur en 1945, 1 février 1945
- ALPAV, *Rapport de l'exercice de 1947*, AG du 27 février 1948
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, exercice de 1948
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, exercice de 1949

10.3.3 RAPPORTS DE CONTROLES - CHAUDIERE

- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 24 novembre 1930
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 27 avril 1932
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 6 octobre 1932
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 5 octobre 1933
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 4 juin 1935
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 6 décembre 1935
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 29 décembre 1937
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 4 janvier 1938
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 26 juin 1939
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 22 mai 1939
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 17-26 février 1943
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 26 février 1945
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 15 avril 1946

10.3.4 RAPPORTS DE CONTROLES – ANALYSE D'EAU

- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 28 octobre 1943
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 19 juillet 1950
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 3 novembre 1953
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 28 octobre 1953
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 28 juillet 1954
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 13 novembre 1956

10.3.5 DOCUMENTS TECHNIQUES

- Plan n°2931 de la chaudière n°50 : *Chaudière pratique inexplosible à circulation d'eau – système Roser*, n.d. (~1917)
- Plan d'ensemble chaudière, *n°15 eco boiler - new style 1913 - Erie City Iron Works / Erie PA*, BONNICHON, MOULINS, copie du plan original du 16 avril 1913, 10 mars 1923
- Plan *Cuvelage de la chaudière Babcock - Etablissement Brunel La Roche-en-Brénil*, n.d. (~1930)
- Louis GERMAIN, *Epuration par le phosphate trisodique de l'eau d'alimentation des chaudières*, ingénieur chimiste E.C.I.L., 3^{ème} édition, n.d. (~1930)

- Plan du Foyer de la *chaudière américaine de 125 m² - timbre 8 kg* BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, n.d. (~1930)
- Plan d'ensemble chaudière : *chaudière tubulaire de type américaine*, n.d. (~1930)
- Plan de détail de chaudière : *plaque de rivetage*, n.d.

10.4 BIBLIOGRAPHIE SUR LES INSTALLATIONS GENERALES

10.4.1 RAPPORTS DE CONTROLES – INSTALLATION ELECTRIQUE

- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 20 octobre 1931
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 18 septembre 1934
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 17 septembre 1935
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 7 septembre 1937
- ALPAV à M. BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 13 septembre 1938

10.4.2 DOCUMENTS TECHNIQUES – INSTALLATIONS ARCHITECTURALES

- Plan : *Dessin n°2451 de la commande n°809Z : Implantation de hangar*, LA CONSTRUCTION METALLIQUE HAUT-MARNAISE à BRUNEL, La ROCHE-EN-BRENIL, 30 septembre 1930

10.5 ICONOGRAPHIE – SCIERIE BRUNEL

- 5 photographies d'ensemble, vue extérieure, scierie BRUNEL, 1975
- 27 photographies d'ensemble et de détails de la machine à vapeur PIGUET n°135, scierie BRUNEL, 1975
- 12 photographies d'ensemble et de détails de la chaudière, scierie BRUNEL, 1975

10.6 SOURCES IMPRIMEES ET BIBLIOGRAPHIE GENERALE

10.6.1 SOURCES ET OUVRAGES GENERAUX

- [BORGNI 1821] J. A. BORGNI (1821), *Traité complet de mécanique appliquée aux arts*, 360 p.
- [BURAT 1856a] BURAT (1856), *Matériel des houillères*
- [BURAT 1856b] BURAT (1856), *Géologie appliquée*
- [DAUMAS 1964] M. DAUMAS (1964), *Histoire générale des techniques*, 5 tomes, presses universitaires de France, Quadrige
- [ECOMUSEE DU CREUSOT 1992] ECOMUSEE de la communauté du CREUSOT-MONTCEAU (1992), *Au siècle de la vapeur*, Guide, ISBN 2-902535-06-6, 60 p.
- [FIGUIER 1896] L. FIGUIER (1896), *La Vapeur*, Les merveilles de la science - Description populaire des inventions modernes, 743 p.
- [FRANCOEUR & AL 1829] L.-B. FRANCOEUR, L.-S. LENORMAND (1829), *Dictionnaire technologique universel des Arts-et-Métiers*, Tome 15, Paris, pp.393
- [HUGHES 1983] T. P. HUGHES (1983), *Networks of power: electrification in Western society (1880-1930)*, ISBN 0-8018-2873-2
- [JURY 1906] Exposition Universelle de 1900, *Rapports du jury international*, groupe IV – première partie – classe 19, Imprimerie Nationale, Paris

- [SME 1990] Société Monégasque d'Electricité et du Gaz (1990), *1890-1990 : cent ans d'électricité et de gaz en Principauté de Monaco*, 42 p.
- [TURGAN 1885] J. TURGAN (1885), *Les grandes usines de France : PIGUET et Cie – les successeurs d'Alphonse DUVERGIER*, Revue périodique des arts industriels, Paris, pp.1-16

10.6.2 SOURCES IMPRIMEES PERIODIQUES

- [BIEN PUBLIC 1994] LE BIEN PUBLIC (1994), *La machine quitte la scierie – La Roche tourne une page de son histoire*, Journal local en COTE D'OR, 2 et 3 mai 1994, 1 p.
- [GUILLEMIN 1890] A. GUILLEMIN (1890), *La Vapeur*, Revue *La Nature* pour les sciences et de leurs applications aux arts et à l'industrie, Hachette Paris, pp. 303
- [ICF 1893] Société des Ingénieurs Civils de FRANCE (1893), *Liste des machines à vapeur horizontales à haute pression et à détente variable par le régulateur et à condensation - Système PIGUET livrées à l'industrie*, 1890-1893, Archive F13-3-22 Ecomusée du Creusot-Montceau
- [ICF 1896] Société des Ingénieurs Civils de FRANCE (1896), *Machine à T.P., à un seul cylindre construite par PIGUET & Cie*, Recueil de Construction des machines, section Appareils à vapeur – Moteurs types divers (1890-1896), 4 p.
- [ICF 1902a] Société des Ingénieurs Civils de FRANCE (1902), *La mécanique à l'exposition de 1900 – détermination des besoins de vapeur*, tome 1, chapitre 1, pp. 84-85
- [ICF 1902b] Société des Ingénieurs Civils de FRANCE (1902), *La mécanique à l'exposition de 1900 – les machines à vapeur – PIGUET & Cie*, tome 1, chapitre 3, 1902, pp. 233-234
- [JANET 1930] P. JANET (1930), *La grande industrie électrique*, Revue le Génie Civil, numéro spécial publié à l'occasion du Cinquantenaire de la Fondation du Génie Civil, Paris, Novembre 1930, pp.108-116
- [JOUVET 1937] L. JOUVET (1937), *L'apport de l'électricité dans la mise en scène au théâtre et au music-hall*, Revue des Arts et Métiers Graphiques, numéro spécial *L'homme, l'électricité, la vie*
- [LAURAIN 1930] H. LAURAIN (1930), *Les progrès de l'éclairage*, Revue le Génie Civil, numéro spécial publié à l'occasion du Cinquantenaire de la Fondation du Génie Civil, Paris, Novembre 1930, pp.96-100
- [MONTEIL 1930] C. MONTEIL (1930), *L'évolution des machines thermiques*, Revue le Génie Civil, numéro spécial publié à l'occasion du Cinquantenaire de la Fondation du Génie Civil, Paris, Novembre 1930, pp.175-183
- [ROSER 1886] Journal des usines à gaz (1886), *Matériel d'usines à gaz – Chaudière inexplosible, système Roser*, 10^{ème} année - n° 18 du 20 septembre 1886, pp.297-298
- [TISSANDIER 1870] G. TISSANDIER (1896), *La Nature*, Revue des sciences et de leurs applications aux arts et à l'industrie, n.d. ~1870, pp.196-198

10.6.3 SOURCES DIVERSES

- [BRUNEL 1972] BRUNEL (1972), *Historique de la scierie à 2 dates différentes*, 3 p.
- [COTTE 1999] M. COTTE (1999), *Etude pour un Musée de la vapeur industrielle au Creusot*, document manuscrit consulté grâce à l'amabilité de l'auteur
- [DMS 2006] La société DMS, <http://www.dms.fr>, site web consulté le 10/07/2006
- [DUJARDIN & CIE 1929] Dujardin & Cie (1929), *Les produits PIGUET à force motrice thermique et air comprimé*, publicité, mars 1929, 1 p.
- [FIVES-LILLE 2006] Le groupe FIVES-LILLE (2006), <http://www.fiveslille.com>, site web consulté le 10/07/2006
- [MARTIN 2002a] J.-B. MARTIN (2002), *Réalisation d'une maquette numérique de la Machine à Vapeur Piguët de l'Ecomusée du Creusot*, Rapport de travaux de laboratoire, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 39 p.
- [PAYEN 1985] J. PAYEN (1985), *Technologie de l'énergie vapeur en France dans la première moitié du 19^{ème} siècle. La machine à vapeur fixe*, thèse de Doctorat d'Etat soutenue à l'Université de Paris le 18 février 1978, édité par le Comité des Travaux Historiques et Scientifiques
- [VASCONCELOS & al 2005] D. Da Silva VASCONCELOS, O. ZAMPETTI (2005), *Mémoire professionnel*, pp.31-32

11. SOURCES DU CAS D'ÉTUDE DE BATZ-SUR-MER

11.1 CRITIQUE DES SOURCES

Le chapitre 6 ayant pour raison d'être la validation du *DHRM* et du *rétro-processus de conception contextualisé*, de nombreuses études, effectuées par des experts contemporains ou ayant vécu il y a fort longtemps, alimentent nos propos. L'essentiel des analyses ont été réalisées par les auteurs suivants que nous tenons à remercier pour la contribution apportée par leurs travaux :

- 1546, Georgius AGRICOLA, archéologue et minéralogiste,
- 1880, Louis FIGUIER, médecin et vulgarisateur scientifique,
- 1999, Philippe LHERITEAU, élève architecte,
- 2002, Gildas BURON, conservateur et historien,
- 2005, Laurent DEROUENE, élève ingénieur.

Pour la majorité, il s'agit d'études de terrains. Les enquêtes contemporaines ont été effectuées auprès des rares personnes pouvant encore témoigner du fonctionnement de la machine à laver le sel et de l'entreprise BERTRAND. Parmi eux, on peut citer André LACROIX, Pierre NICOL, Marc NICOL, Joseph PEDRON...

A ces enquêtes ethnologiques s'ajoutent également des études complémentaires comme celles de J.-L. TESSON, M. A. AUDIGANNE...

Les connaissances produites ont été recoupées et validées avec les sources originelles afin de créer un ensemble intelligible et cohérent au regard de ces travaux de doctorat.

De plus, le travail archéologique mené sur le site de BATZ-SUR-MER permet d'apporter cette vision supplémentaire du technologue soucieux de l'exhaustivité de l'histoire contextualisante d'un objet industriel intégré dans son système socio-économico-technique complexe.

11.2 DOCUMENTATION LOCALE

11.2.1 ARCHIVES CLASSEES DU MUSEE DES MARAIS SALANTS DE BATZ-SUR-MER

- 1885 : *liste des dépenses occasionnées par la construction du magasin de sel de la Croix de Paix*, rue du Four, à BATZ-SUR-MER, du 1^{er} mars au 15 septembre 1885,
- 10 mars 1905, archive I 1 : courrier de M. Le Maire de BATZ à Jean-Baptiste BERTRAND,
- 1941, archive F 8 : *notes personnelles* de M. André BERTRAND,
- 25 novembre 1966 : *lettre de licenciement* de M. Alexandre LECALLO adressée par la société BERTRAND.

11.2.2 ACTES DE PROPRIETES (ACQUISITIONS, VENTES, MISES EN DEMEURE) - ARCHIVES NON CLASSEES DU MUSEE DES MARAIS SALANTS DE BATZ-SUR-MER

- 5 juillet 1879, accusé de réception de fonds, Canton de GUERANDE, F80RCC : *rapport et certificat de la mise aux enchères de la propriété communale de la Croix de Paix* à BATZ-SUR-MER acquise par M. DENIEL le 29 juin 1878,
- 23 novembre 1884, Canton de GUERANDE, F115V-116R : *acte de concession de terrain communal* à M. DENIEL à BATZ-SUR-MER,
- 30 avril 1894, Mairie de BATZ-SUR-MER : achat par M. DENIEL d'une parcelle de terrain vague près du lieu dit la Croix de Paix appartenant à M. LEHUEDE,
- 28 avril 1898, actes n°77-78, Mairie de BATZ-SUR-MER : mise en vente des biens non vendus de M. DENIEL présenté par l'avocat M. TILLY devant le notaire M. GRANIER,
- 11 mai 1898, acte n°87, Mairie de BATZ-SUR-MER : mise en vente des biens non vendus de M. DENIEL présenté par l'avocat M. TILLY devant le notaire M. GRANIER,
- 10 juillet 1898, Communes de BATZ et MESQUER : étude des biens par M. GUILLET suite à la mise en liquidation judiciaire de M. DENIEL par l'avocat M. TILLY,
- 10 juillet 1898, acte n°115, Mairie de BATZ-SUR-MER : mise en vente des biens non vendus de M. DENIEL présenté par l'avocat M. TILLY devant le notaire M. GRANIER,
- 9 janvier 1914, acte n°3, Mairie de BATZ-SUR-MER : achat par M. BERTRAND d'une parcelle de 401.20 m² appartenant à M. PICHON devant le notaire M. GRANIER + annexe *dessin cadastral*,
- Mars 1946, Commune de BATZ : *Plan cadastral* du terrain de la propriété de M. André BERTRAND.

11.2.3 ACTES DE NAISSANCE ET DE DECES - ARCHIVES NON CLASSEES DU MUSEE DES MARAIS SALANTS DE BATZ-SUR-MER

- Acte n°13 du 22 février 1888, Mairie de BATZ-SUR-MER : naissance de Jean-Baptiste René Marie BERTRAND, fils de Jean-Baptiste BERTRAND, né le 22 février 1888 à BATZ-SUR-MER,
- Acte n°56 du 14 décembre 1889, Mairie de BATZ-SUR-MER : naissance de Marie Madeleine BERTRAND, fille de Jean-Baptiste BERTRAND, né le 31 octobre 1889 à BATZ-SUR-MER et décédé le 1 novembre 1974 à VERSAILLES,
- Acte n°56 du 1 novembre 1896, Mairie de BATZ-SUR-MER : naissance d'André Marcel BERTRAND, fils de Jean-Baptiste BERTRAND, né le 30 octobre 1896 à BATZ-SUR-MER,
- Acte n°7 du 18 février 1963, Mairie de BATZ-SUR-MER : décès d'André Marcel BERTRAND le 16 février 1963 à BATZ-SUR-MER,
- Acte du 5 janvier 1891, Mairie de BATZ-SUR-MER : naissance de Marie Claire Camille BERTRAND, fille de Jean-Baptiste BERTRAND, né le 4 janvier 1896 à BATZ-SUR-MER et décédé le 29 septembre 1972 à ST-NAZAIRE.

11.2.4 ICONOGRAPHIES : CARTES POSTALES - ARCHIVES DU MUSEE DES MARAIS SALANTS DE BATZ-SUR-MER

- *Le Bourg de Batz - panorama du Bourg, de sa Gare et des marais salants qui se suivent à pertes de vue* (n.d.),
- *Le Bourg de Batz – Rue de la Gare* (n.d.),
- *Guérande (Loire-Inf.) : Environs – Carrière de Granit à Clis – Le Chantier* (n.d.),
- *Le Pouliguen (L.-I.) – Société Salinière de l'Ouest : raffinerie et laverie* (n.d.),
- *Déraillement du rapide de nuit du CROISIC à PARIS (1912),*
- *Batz – Costumes d'enfants – LL.* (n.d.),
- *Batz (. Inf.) – La rue de la Gare* (n.d.),
- *Batz (Loire-Inf.) – L'hôtel-café du Commerce (à droite en sortant de la gare)* (n.d.).

11.3 SOURCES IMPRIMEES ET BIBLIOGRAPHIE GENERALE

11.3.1 SOURCES ET OUVRAGES GENERAUX

- [AGRICOLA 1546] G. AGRICOLA (1546), *De re metallica*, 1^{ère} publication à Leipzig
- [AUDIGANNE 1869] A. AUDIGANNE (1869), *La région du bas de la Loire*, Extrait de la Revue Des deux mondes, Imprimerie Fronteau, St Nazaire, pp. 8-9
- [BURON 1999] G. BURON (1999), *Bretagne des marais salants : 2000 ans d'histoire*, Tome 1, Skol Vreizh Editeur, ISBN 2-911-447-37-9, 176 p.
- [BURON 2000] G. BURON (2000), *Bretagne des marais salants : Hommes du sel*, Tome 2, Skol Vreizh Editeur, ISBN 2-911-447-42-5, 176 p.
- [BURON 2002] G. BURON (2002), *Regards sur les marais salants du Sud Bretagne (19^{ème} – 20^{ème} siècles)*, Aux rives de l'incertain. Histoire et représentation des marais occidentaux du Moyen Age à nos jours, Editions d'Art Somogy, pp. 210-218
- [COLAS 1985] A. COLAS (1985), *Le Sel*, Collection Que sais-je, Presses Universitaires de France, Paris

- [FERY d'ESCLANDS 1891] P. FERY d'ESCLANDS (1891), *Morbihan, baie de Quiberon, Trinité-Carnac. Aquiculture de Kercado-Kerdrowas, fondée par MM. De Wolbock, appartenant au Vte de Wolbock, 1865-1891, ostréiculture, pisciculture, homarderies, produits de la mer*, Paris et Limoges, 163 p.
- [FIGUIER 1880] L. FIGUIER (1880), *Science et industrie : Soudes et potasses*, Bibliothèque scientifique, Combet & C^{ie} Editeurs, Paris, n.d. ~1880, pp. 533-601
- [PLINE 1850] PLINE (1850), *Histoire naturelle*, Traduction de Littré, publiée dans la collection des auteurs latins de Dubochet, Paris, tome 2, pp. 360-362

11.3.2 SOURCES IMPRIMEES PERIODIQUES

- [BURTON 1893] BURTON FILS (1893), *Catalogue général des éleveurs, transporteurs et transmissions*, Burton Fils – ingénieur-constructeur, 68 rue des Marais, Paris, 31 p.
- [CLEMENT 1987] O. CLEMENT (1987), *Les marais de Bourgneuf et des Moutiers-en-Retz : l'évolution d'une zone humide littorale*, Norois, Revue géographique de l'Ouest et des pays de l'Atlantique nord, tome 34, pp. 27-42
- [ENQUETE 1851] Enquête (1851), *Enquête législative sur la production, la consommation et la vente de sels ordonnées par la loi du 13 janvier 1849. Enquête orale et documents recueillis par la commission*, Paris, Imprimerie de l'Assemblée Nationale, 528 p.
- [ENQUETE 1868] Enquête (1868-1869), *Enquête sur les sels*, Paris, Imprimerie Impériale, 1868-1869, 3 volumes
- [FIGUIER & al 1848] L. FIGUIER, L. MIALHE (1848), *Examen comparatif des principales eaux minérales salines : rapport chimique et thérapeutique*, Mémoire lu à l'Académie de médecine, séance du 23 mai 1848
- [GODIN 2006] M. GODIN (2006), *Musée des Marais : une dimension nationale*, Journal Ouest France, 25 avril 2006, 1 p.
- [GUERANDE 2002] *Traits d'Union... Le bulletin de la filière Sel de Guérande*, Guérande, Salines de Guérande, n°213, avril 2002, p. 7
- [LANORVILLE 1928] G. LANORVILLE (1928), *Les marais salants de Bretagne*, La Nature, revue des sciences et de leurs applications à l'art et à l'industrie, n°2791, 15 août 1928
- [Le HESRAN 1938] L. Le HESRAN (1938), *Notice sur les marais salants du Bassin de Guérande*, supplément à la Revue Les travaux Publics, n°903, Paris, p. 2
- [LOIRE-INFÉRIEURE 1900] Auteur inconnu, *Le département de la Loire-Inférieure : le sel*, document probablement issu de la revue La Nature, n.d., ~1900, pp.141
- [SAINT-NAZAIRE 1898] *Le Courrier de Saint-Nazaire*, 32^{ème} année, n°24, 11 juin 1898

11.3.3 SOURCES DIVERSES

- [BURON 2004] G. BURON (2004), *Petite histoire des magasins de la Croix de Paix et de l'entreprise Bertrand de négoce de sel*, document manuscrit consulté grâce à l'amabilité de l'auteur, 19 p.
- [DEROUENE 2005a] L. DEROUENE (2005), *Réalisation d'une maquette CAO et de la cinématique associée : machine à laver le sel de Guérande*, Rapport de stage de fin d'études, UTBM, Belfort, 45 p.
- [DEROUENE 2005b] L. DEROUENE (2005), *Les processus de production du sel*, Rapport intermédiaire de stage de fin d'études, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 16 p.
- [LHERITEAU 1999] P. LHERITEAU (1999), *Architecture et territoires : approches pour une extension du Musée des Marais Salants de Batz-sur-Mer*, Rapport de projet de fin d'études, Ecole d'Architecture de Nantes, 105 p.
- [MUSEE 2002] Musée des marais Salants, *Projet Scientifique et Culturel*, 2002-2004
- [MUSEE 2004] Musée des marais Salants, *Etude de programmation*, 2004
- [SALINES 2007] <http://www.salines.com/>, Comité des Salines de France, Paris
- [SALT 2007a] <http://www.saltinstitute.org/>, Salt Institute, Alexandria, Virginia, USA
- [SALT 2007b] <http://www.saltsense.co.uk/>, Salt Manufacturers' Association, USA
- [SSM 2007] <http://www.serraprocess.com/>, fabricant Serra Salt Machinery, Barcelone, Espagne
- [TESSON & al 1975] J.-L. TESSON, M. GUELLEC (1975), *Les marais salants de la presqu'île guérandaise : situation présente et perspective d'avenir*, étude, 89 p.

12. SOURCES DU CAS D'ÉTUDE

DES PRESSES D'IMPRIMERIE

- [ALBUM 1862] *Album de l'exposition universelle de 1862*, 405 p.
- [BARGILLIAT 1968] A. BARGILLIAT (1968), *Typographie, Impression, Cours de perfectionnement à l'usage des candidats au certificat d'aptitude professionnelle*, 5^{ème} édition, Institut National des Industries et Arts Graphique, 189 p.
- [BERTHIER & al 1910] Société BERTHIER & DUREY (1910), *La Minerve*, Affiche publicitaire, n.d., ~1910
- [GUILLE & al 2005] F. GUILLE, C. LEDUC, S. MOUSSEAU, N. ROUSSET (2005), *Projet Presse a cylindre*, Rapport de projet, IUT de Nantes, 16 p.
- [GUILLERME 2004] A. GUILLERME (2004), *Il faut sauver l'imprimerie nationale*, le Monde, 1^{er} juin 2004, pp.16
- [MARTIN 2002b] P.-R. MARTIN (2002), *De prelis inventoribusque*, 2^{ème} édition, Angers, 222 p.
- [MUSEE 1998] Musée de l'Imprimerie de Nantes (1998), *Si le Musée de l'imprimerie de Nantes m'était conté*, Editions Pro Arte Graphica, XXX p.
- [RAMIER & al 2005] A. RAMIER, E. RAINTEAU, A. THEBAUD (2005), *Projet Presse à platine : La Minerve*, Rapport de projet, IUT de Nantes, 40 p.

13. SOURCES DU CAS D'ÉTUDE DU CANOT A VAPEUR DE 1861

- [BABIN & al 2007] T. Babin, W. DESNOE, L. GAILLARD (2007), *Modélisation du premier canot à vapeur de la DCN Indret*, Rapport de projet, IUT de Nantes, 26 p.
- [BONTEMPS & al 2007] André BONTEMPS, Alain GARRIGUE, Charles GOUBIER, Jacques HUETZ, Christophe MARVILLET, Pierre MERCIER, Roland VIDIL (2007), *Echangeurs de chaleur – généralités – dimensionnement thermique – problèmes de fonctionnement*, Techniques de l'Ingénieur B2340, B2342 et B2344
- [DEJUST 1919] J. DEJUST (1919), *Les chaudières à vapeurs*, Bibliothèque de l'ingénieur de travaux publics, archives du PHI-DNCS
- [EM 1860] ETABLISSEMENT de la MARINE (1860), *Plan du canot à vapeur construit à Indret*, échelle 1/10, dessinateur inconnu, n.d., ~1860, archives du PHI-DNCS
- [EM 1862] ETABLISSEMENT de la MARINE (1862), *Correspondance*, l'Etablissement de la Marine à la direction du matériel du Ministère de la marine, 28 août 1862, archives du PHI-DNCS
- [INCROPERA & al 1996] F. P. INCROPERA, D. P. DEWITT (1996), *Introduction to heat transfert*
- [JOËSSEL 1862] J. JOËSSEL (1862), *Essais d'un canot à hélice*, Mémorial du Génie maritime, septembre 1862, archives du PHI-DNCS
- [JOËSSEL 1867] J. JOËSSEL (1867), Notice sur les canots à vapeur, Mémorial du Génie maritime, volume 1 de 1867, archives du PHI-DNCS
- [JOLLY & al 2007] A. JOLLY, E. SOULEMAN (2007), *Modélisation thermique du canot à vapeur de 1861*, Rapport de projet de fin d'études, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 47 p.
- [LEDIEU 1862] A. LEDIEU (1862-1863), *Traité élémentaire des appareils à vapeur de navigation*, Tome 2, archives du PHI-DNCS
- [LEDIEU 1876a] A. LEDIEU (1876-1880), *Appareils de Navigation*, Tome 1, archives du PHI-DNCS
- [LEDIEU 1876b] A. LEDIEU (1876-1880), *Les nouvelles machines marines*, archives du PHI-DNCS
- [MB 1862] MINES DE BLANZY (1862), *Correspondance de confirmation de commande*, Les Mines de Blanzay à l'Etablissement de la Marine à la direction du matériel du Ministère de la marine, 17 octobre 1861, archives du PHI-DNCS
- [MM 1860] MINISTERE de la MARINE FRANÇAISE (1860), *Dépêche ministérielle*, la direction du matériel du Ministère de la marine Française à M. le Directeur de l'Etablissement de la Marine, 9 décembre 1860, archives du PHI-DNCS
- [MONDIEZ 1954] A. MONDIEZ (1954), *Cours Physique Industrielle - Production et utilisation de la chaleur*, Tome 1 & 2
- [ÖZİŞİK 1985] M. N. ÖZİŞİK (1985), *Heat Transfert A Basic Approach*
- [ROUL 2006] A. ROUL (2006), *Canot a vapeur de 1861 : historique*, Document interne au PHI, 9 p.

14. SOURCES ET BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

(CLASSEMENT ALPHABÉTIQUE)

- [3DEXPLORER 2005] 3DEXplorer (2005), Création et visualisation de pages html en navigation 3D, <http://www.3dexplorer.com/>, page consultée le 01/02/05
- [AFNOR 1984] AFNOR (1984), *Guide pour l'élaboration d'un cahier des charges fonctionnel*, Norme NF X50-150
- [AFNOR 1991] AFNOR (1991), *Analyse de la Valeur*, Norme NF X50-151
- [AFNOR 2007] AFNOR (2007), *Management par la valeur - Caractéristiques fondamentales de l'analyse de la valeur*, Norme NF X50-152
- [AGRICOLA 1546] G. Agricola (1546), *De re metallica*, 1^{ère} publication à Leipzig
- [AIT KACI & al 2003] Y. Ait Kaci, N. Mestaoui (2003), *La réalité hybride : installation interactive [v-med 2.0] et architecture du centre culturel français de Palerme et de Sicile*, Colloque international ICHIM, 26 p.
- [ALBUM 1862] *Album de l'exposition universelle de 1862*, 405 p.
- [ALTSCHULLER 1988] G. Altschuller (1988), *Creativity as an exact science*, Editions Gordon and Breach
- [ALTSCHULLER 1996] G. Altschuller (1996), *And Suddenly the Inventors appeared*, Technical Innovation Center, INC., 171 p.
- [ALTSCHULLER 1999] G. Altschuller (1999), *The Innovation Algorithm. TRIZ, systematic innovation and technical creativity*, Technical Innovation Center, Inc., 312 p.
- [AMIDON 2002] D. M. Amidon (2002), *Innovation et management des connaissances*, Editions d'organisation, 226 p.
- [AMMAR-KHODJA 2007] S. Ammar-Khodja (2007), *Processus d'aide à la spécification et à la validation d'application d'ingénierie à base de connaissances expertes*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes
- [ANDRE 2006] B. André (2006), *Entre réaffectation économique et sens des lieux : retour sur des expériences passées et en cours*, Journée d'étude sur le Patrimoine industriel comme vecteur de reconquête économique, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 9 juin 2006
- [AOUSSAT & al 1998] A. Aoussat, M. Le Coq (1998), *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, sous la direction de M. Tollenaere, Editions Hermès, Paris, Chapitre 8
- [AOUSSAT 1990] A. Aoussat (1990), *La pertinence en innovation : nécessité d'une approche plurielle*, Thèse de doctorat, ENSAM Paris, 210 p.
- [ARENDRT 2002] A. Arendt (2002), *La condition de l'homme moderne*, Collection Agora Paris, ISBN 2-266-12649-0, 406 p.
- [ARISTOTE rééd.1992] Aristote (rééd.1992), *Ethique à Nicomaque*, Réédition, Librairie Générale Française, Paris, 447 p.
- [AUDIGANNE 1869] A. Audiganne (1869), *La région du bas de la Loire*, Extrait de la Revue Des deux mondes, Imprimerie Fronteau, St Nazaire, pp. 8-9
- [AVILES COLLAO & al 2003] J. Aviles Collao, L. Diaz-Kommonen, M. Kaipainen, J. Pietarila (2003), *Soft ontologies and similarity cluster tools to facilitate exploration and discovery of cultural heritage resources*, Colloque international ICHIM, 11 p.
- [AYRAULT 2002] J.-M. Ayrault (2002), *Nantes, d'isles en île*, revue *Archéologie industrielle en France*, n°41, Paris, pp. 78-83
- [BABIN & al 2007] T. Babin, W. Desnoe, L. Gaillard (2007), *Modélisation du premier canot à vapeur de la DCN Indret*, Rapport de projet, IUT de Nantes, 26 p.
- [BACHIMONT 2001] B. Bachimont (2001), *L'archive numérique : entre authenticité et interprétabilité*, Revue Archives, Volume 32, n°1, 13 p.

- [BALLAY 1997] J.-F. Ballay (1997), *Capitaliser et transmettre les savoir-faire de l'entreprise*, Publications Eyrolles, ISBN 2-212-01653-0, 319 p.
- [BARGILLIAT 1968] A. Bargilliat (1968), *Typographie, Impression, Cours de perfectionnement à l'usage des candidats au certificat d'aptitude professionnelle*, 5^{ème} édition, Institut National des Industries et Arts Graphique, 189 p.
- [BARTHES 1974] R. Barthes (1974), *Roland Barthes*, Editions d'Aix-en-Provence, 95 p.
- [BASCOUL 2005] C. Bascou (2005), *L'esquisse virtuelle en conception mécanique*, 9^{ème} colloque national AIP Primeca, La Plagne, 12 p.
- [BEAUNE 1993] J.-C. Beaune (1993), *Histoire épistémologique – le temps des sciences et le temps du musée*, Colloque REMUS, 12 et 13 décembre 1991, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532, p. 168
- [BELAËN 2003] F. Belaën (2003), *L'immersion au service des musées de sciences*, Colloque international ICHIM, 17 p.
- [BELCHER & al 2003] D. Belcher, M. Billinghurst, S.E. Hayes, R. Stiles (2003), *Using Augmented Reality for Visualizing Complex Graphs in Three Dimensions*, IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 9 p.
- [BELOT & al 2007] R. Belot, P. Lamard (2007), *Peugeot à Sochaux, des hommes, une usine, un territoire*, Panazol, La Vauzelle
- [BELOT 2006] R. Belot (2006), *Le patrimoine industriel comme vecteur de reconquête économique*, Journée d'étude sur le Patrimoine industriel comme vecteur de reconquête économique, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 9 juin 2006
- [BERGERON 2006] L. Bergeron (2006), *Conclusion du colloque*, Journée d'étude sur le Patrimoine industriel comme vecteur de reconquête économique, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 9 juin 2006
- [BERIO & al 2007] G. Berio, M. Harzallah (2007), *Towards an Integrating Architecture for Competence Management*, Journal Computers in Industry, Volume 58, ISSN 0166-3615, Editions Elsevier, pp. 199-209
- [BERKHEIM 1809] K.G. de Berkheim (1809), *Lettres sur Paris*, ou correspondance de M. XXX dans les années 1806 et 1807, Heidelberg, Mohr et Zimmer
- [BERMAN 2006] M. Berman (2006), *Merging the Physical and Virtual Through 3D Scanning and Printing*, NMC Summer Conference, Indianapolis
- [BERNARD & al 2002a] A. Bernard, A. Fischer (2002), *New trends in rapid product development*, CIRP annals, Vol. 51-2, pp.635-652
- [BERNARD & al 2002b] A. Bernard, R. Hasan (2002), *Working situation model as the base of life-cycle modeling of socio-technical production systems*, CIRP Design Seminar, Hong-Kong
- [BERNARD & al 2007a] A. Bernard, S. Ammar-Khodja, N. Perry, F. Laroche (2007), *Virtual engineering based on knowledge integration*, Conférence ICMA, Singapour, 28 p.
- [BERNARD & al 2007b] A. Bernard, F. Laroche, S. Ammar-Khodja, N. Perry (2007), *Impact of new 3D numerical devices and environments on redesign and valorisation of mechanical systems*, CIRP General Assembly, CIRP Annals, Vol. 56-1, pp.143-148
- [BERNARD 1996] A. Bernard (1996), *Contribution à la modélisation des produits et à l'intégration des technologies productrices dans un environnement multi-acteurs*, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Nancy 1, 109 p.
- [BERNARD 2003] A. Bernard (2003), *Rétro-conception : outils et applications*, Cours de 3^{ème} année, ENSAM, Angers
- [BERTHELOT 2003] N. Berthelot (2003), *Architectural 3D numerisation*, 8^{ème} Conférence internationale 3D Modelling, Paris, 8 p.
- [BERTHIER & al 1910] Société Berthier & Durey (1910), *La Minerve*, Affiche publicitaire, n.d., ~1910
- [BEZIER 1987] P. Bézier (1987), *Courbes et surfaces*, Editions Hermès, Paris
- [BIEN PUBLIC 1994] Le Bien Public (1994), *La machine quitte la scierie – La Roche tourne une page de son histoire*, Journal local en Côte d'Or, 2 et 3 mai 1994, 1 p.
- [BIGAND & al 2006] M. Bigand, J.-P. Bourey, H. Camus, D. Corbeel (2006), *Conception des systèmes d'information : Modélisation des données, études de cas*, Editions Technip, ISBN 2-71080-8749, 165 p.
- [BILLINGHURST & al 2001] M. Billinghurst, H. Kato, I. Poupyrev (2001), *The MagicBook: A Transitional AR Interface*, Computers and Graphics, November 2001, pp. 745-753
- [BILLINGHURST & al 2002] M. Billinghurst, H. Kato (2002), *AR Toolkit Project : Collaborative Augmented Reality*, Communications of the ACM, Vol. 45, N°7, pp. 64-70
- [BILLINGHURST & al 2002a] M. Billinghurst, A. Cheok, S. Prince, H. Kato (2002), *Real World Teleconferencing*, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol 22, No 6, pp. 11-13
- [BILLINGHURST & al 2002b] M. Billinghurst, H. Kato (2002), *Collaborative Augmented Reality*, Communications of the ACM, Vol. 45, No. 7, pp. 64-70
- [BOCQUET 1998] J.-C. Bocquet (1998), *Ingénierie simultanée, conception intégrée*, Ouvrage collectif Conception de produits mécaniques, méthodes, modèles et outils, sous la direction de M. Tollenaere, Editions Hermès, p. 29-52
- [BONNEUIL 2004] C. Bonneuil (2004), *Les transformations des rapports entre sciences et société en France depuis la Seconde Guerre mondiale : un essai de synthèse*, Colloque Sciences, Médias et Société, Lyon, 26 p.

- [BONNOT 2002] T. Bonnot (2002), *La vie des objets – d'ustensiles banals à objets de collection*, Editions MSH, 244 p., ISBN 2735109348
- [BONTEMPS & al 2007] André Bontemps, Alain Garrigue, Charles Goubier, Jacques Huetz, Christophe Marvillet, Pierre Mercier, Roland Vidil (2007), *Echangeurs de chaleur – généralités – dimensionnement thermique – problèmes de fonctionnement*, Techniques de l'Ingénieur B2340, B2342 et B2344
- [BORGATTI & al 2005] C. Borgatti, M. Felicori, M. Chiara Liguori, A. Guidazzoli, S. Pescarin (2005), *Integration and communication of cultural contents: the experience of the certosa virtual museum*, Colloque international ICHIM, 16 p.
- [BORGNIS 1821] J. A. Borgnis (1821), *Traité complet de mécanique appliquée aux arts*, 360 p.
- [BOROWCZYK 2007] J. Borowczyk (2007), *Louis Gaultier, professeur de géométrie descriptive à l'école de dessin du Conservatoire des Arts et Métiers de 1807 à 1848*, 132^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Arles
- [BOUGE & al 2002] P. Bouge, P.-A. Champin (2002), *Une représentation épisodique des connaissances pour l'assistance à la réutilisation en CAO*, 13^{ème} Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances, Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, pp.175-183
- [BOUJUT & al 1998] J.-F. Boujut, A. Jeantet (1998), *Les entités de coopération dans les nouvelles organisations de la conception*, Revue Performances Humaines & Techniques, n° 96, pp. 38-44
- [BOY 1993] D. Boy (1993), *Les français et les techniques*, Actes du colloque REMUS, 12 et 13 décembre 1991, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532
- [BRISAUD & al 1998] D. Brissaud, O. Garro (1998), *Conception distribuée, émergence*, Ouvrage collectif Conception de produits mécaniques, méthodes, modèles et outils, sous la direction de M. Tollenaere, Editions Hermès, pp. 105-114
- [BRIX & al 2007] T. Brix, U. Döring, B. Corves, K.-H. Modler (2007), *DMG-Lib – the Digital Mechanism and Gear Library - Project*, Conférence IFToMM, Besançon, France, 6 p.
- [BROCHU & al 1999] D. Brochu, J. Davallon, C. Camirand, H. Gottesdiener, J. Le Marec, A. Lemieux, M.-S. Poli, K. Tari (1999), *Les musées face à l'édition multimédia*, ouvrage publié dans le cadre de l'Accord France-Canada pour la coopération et les échanges dans le domaine de la muséologie, Dijon, ISBN 2-11-091676-1, 150 p.
- [BRUNEL 1972] Brunel (1972), *Historique de la scierie à 2 dates différentes*, 3 p.
- [BURAT 1856a] Burat (1856), *Matériel des houillères*
- [BURAT 1856b] Burat (1856), *Géologie appliquée*
- [BURON & al 2005] G. Buron, M. Simonnin, F. Laroche (2005), *Un objet industriel patrimonial voué à disparaître sauvé par le numérique : exemple de la machine à laver le sel de Batz-sur-Mer*, Journée d'étude O.S.TIC, Institut de l'Homme et de la Technologie, Nantes, septembre 2005
- [BURON 1999] G. Buron (1999), *Bretagne des marais salants : 2000 ans d'histoire*, Tome 1, Skol Vreizh Editeur, ISBN 2-911-447-37-9, 176 p.
- [BURON 2000] G. Buron (2000), *Bretagne des marais salants : Hommes du sel*, Tome 2, Skol Vreizh Editeur, ISBN 2-911-447-42-5, 176 p.
- [BURON 2002] G. Buron (2002), *Regards sur les marais salants du Sud Bretagne (19^{ème} – 20^{ème} siècles)*, Aux rives de l'incertain. Histoire et représentation des marais occidentaux du Moyen Age à nos jours, Editions d'Art Somogy, pp. 210-218
- [BURON 2004] G. Buron (2004), *Petite histoire des magasins de la Croix de Paix et de l'entreprise Bertrand de négociants de sel*, document manuscrit consulté grâce à l'amabilité de l'auteur, 19 p.
- [BURTON 1893] Burton Fils (1893), *Catalogue général des élévateurs, transporteurs et transmissions*, Burton Fils – ingénieur-constructeur, 68 rue des Marais, Paris, 31 p.
- [CAD-MAGAZINE 2005] CAD-Magazine (2005), *CAO AEC : l'architecte et le numérique*, Revue n°124, pp.24-32
- [CAD-MAGAZINE 2006] CAD-Magazine (2006), *Archéologie industrielle : la 3D redonne vie à une locomotive à vapeur de 1879*, Newsletter n°21, juin 2006
- [CAMACHO 2004] V. Camacho (2004), *Les images de synthèses tridimensionnelles animées : entre tradition et innovation artistique*, Thèse de doctorat, INA
- [CANDLOT 2006] A. Candlot (2006), *Principes d'assistance à la maîtrise d'ouvrage pour la modélisation et l'intégration d'expertise*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 246 p.
- [CAUJET & al 2007] B. Cauuet, A. Constans (2007), *Restitution par l'image des dynamiques d'exploitation minière de la protohistoire et de l'Antiquité*, 132^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Arles
- [CAVALLUCCI 2007] D. Cavallucci (2007), *TRIZ : l'approche altshullerienne de la créativité*, Techniques de l'Ingénieur, A 5 211, 18 p.
- [CHABANAUD 1997] I. Chabanaud (1997), *Le Vol d'Icare*, <http://icare.cicv.fr>, site consultée le 13/01/04
- [CHAMPIN 2002] P.-A. Champin (2002), *Modéliser l'expérience pour en assister la réutilisation : de la Conception Assistée par Ordinateur au Web Sémantique*, Thèse de doctorat en informatique, Université Claude Bernard - Lyon 1
- [CHEVALIER 2006] S. Chevalier (2006), *L'interactivité avec Subdo*, société VB2S, Les rencontres industrielles de l'Ingenierium de Laval, 9 novembre 2006
- [CLAIRAND & al 2002] J.-P. Clairand, B. Morineau (2002), *Passage d'une maquette numérique à un modèle de réalité virtuelle manipulable sur internet*, Rapport final de projet, Formation DUTIL, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes

- [CLEMENT 1987] O. Clement (1987), *Les marais de Bourgneuf et des Moutiers-en-Retz : l'évolution d'une zone humide littorale*, Norois, Revue géographique de l'Ouest et des pays de l'Atlantique nord, tome 34, pp. 27-42
- [COIFFET & al 1993] P. Coiffet, G. Burdea (1993), *La réalité virtuelle*, Editions Hermès
- [COLAS 1985] A. Colas (1985), *Le Sel*, Collection Que sais-je, Presses Universitaires de France, Paris
- [COLLADA 2005] Collada public forum, <http://collada.org>, site consulté le 01/03/05
- [CONTRI & al 2002] A. Contri, P. Bourdet, C. Lartigue (2002), *Quality of 3D digitised points obtained with non-contact optical sensors*, CIRP Annals 51/1, 443 p.
- [CORVES & al 2006] B. Corves, J. Kloppenburg, J. Niemeyer (2006), *IGM-Mechanism Encyclopaedia and the Digital Mechanism Library as a Knowledge Base in Mechanism Theory*, Conférence internationale DETC, Philadelphia, 7 p.
- [COTTE & al 2000] M. Cotte & al (2000), *Le Train Jaune des Pyrénées Orientales*, Dossier de candidature au patrimoine mondial de l'Unesco, 152 p.
- [COTTE & al 2004] M. Cotte, A. Bernard, S. Deniaud (2004), *Compte-rendu de la Journée d'étude en vue de la mise en place d'un Groupe d'intérêt sur les maquettes numériques et la réalité virtuelle pour le patrimoine*, organisée par le Centre François Viète de l'Université de Nantes et l'IRCCyN de l'Ecole centrale de Nantes, 5 mars 2004
- [COTTE & al 2005a] M. Cotte, S. Deniaud (2005), *CAO et patrimoine : perspectives innovantes*, revue Archéologie industrielle en France, n°46, Paris, pp. 32-38
- [COTTE & al 2005b] M. Cotte, F. Laroche, A. Bernard (2005), *Le patrimoine des machines anciennes et la Conception Assistée par Ordinateur*, 3^{ème} rencontre de l'Association Patrimoine et Mémoires d'entreprise, Musée des Arts-et-Métiers, Paris, ouvrage à paraître
- [COTTE & al 2007a] M. Cotte, F. Laroche, A. Bernard (2007), *Les outils de réalité virtuelle sont-ils applicables au patrimoine technique et industriel ?*, Revue des professeurs d'histoire géographique, à paraître, 15 p.
- [COTTE & al 2007b] M. Cotte, F. Laroche (2007), *Le monumentalisme et la mise en scène des techniques à l'époque de Jules Verne*, Colloque Jules Verne ou la science en drame du 4 mars 2005, Museum d'histoires naturelles de Nantes, Revue Jules Verne n°25, ISBN 978-2-901811-34-3, 136 p.
- [COTTE & al 2007c] M. Cotte, J.-L. Kerouanton, F. Laroche, A. Bernard (2006), *Objet, société, technologies de l'information et de la communication : l'apport du patrimoine et de l'histoire des techniques dans la capitalisation des connaissances, la valorisation et les approches méthodologiques de l'ingénieur*, 131^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Grenoble, 10 p.
- [COTTE 1995] M. Cotte (1995), *Le fonds d'archives Seguin : aux origines de la révolution industrielle en France*, Thèse de doctorat, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales
- [COTTE 1999] M. Cotte (1999), *Etude pour un Musée de la vapeur industrielle au Creusot*, document manuscrit consulté grâce à l'amabilité de l'auteur
- [COTTE 2003] M. Cotte (2003), *Le canal du Midi*, Editions Belin, 2^{ème} Ré-édition, ISBN 2-7011-2933-8, 191 p.
- [COTTE 2004a] M. Cotte (2004), *Réalisation de maquettes numériques de machines anciennes par des outils de la CAO*, Congrès du CILAC 2004, Le Creusot, 23-26 septembre 2004
- [COTTE 2004b] M. Cotte (2004), *L'objet et ses phases de vie*, Congrès d'histoire des sciences et des techniques, Poitiers
- [COTTE 2004c] M. Cotte (2004), *Les maquettes numériques appliquées au patrimoine technique et industriel : un enjeu de recherche universitaire qui concerne les collectivités*, Recherche et développement local, Rencontres Université & Cité, Université de Nantes, actes des rencontres des 9-11 décembre 2004, p. 179-182
- [COTTE 2005a] M. Cotte (2005), *Une vision épistémologique des objets : de la technologie à l'histoire*, Introduction à la 3^{ème} Journée d'étude O.S.TIC, Institut de l'Homme et de la Technologie, Nantes, septembre 2005, 9 p.
- [COTTE 2005b] M. Cotte (2005), *De l'espionnage à la veille...*, ISBN 2-84867-090-8, 294 p.
- [COTTE 2007a] M. Cotte (2007), *La génétique technique a-t-elle un avenir comme méthode de l'histoire des techniques ?*, Colloque SFHST, Lille
- [COTTE 2007b] M. Cotte (2007), *Le choix de la révolution industrielle. Les entreprises de Marc Seguin et ses frères (1815-1835)*, Collection Carnot, Presses Universitaires de Rennes, ISBN 978-2-7535-0476-9, 573 p.
- [CPNI 2004] CPNI (2004), *Rapport d'activité sur les thématiques du laboratoire Conception de Produit et Innovation*, ENSAM Paris, 2004
- [CRISTINA & al 2004] H. Cristina, G. Leitão, J. Stolfi (2004), *Digital reconstruction of fragmented artifacts*, Colloque international ICHIM, 16 p.
- [CRUBLEAU & al 2003] P. Crubleau, S. Richir, R. Hambli (2003), *La maîtrise des futures générations de produits & TRIZ*, 8^{ème} colloque national AIP Primeca, La Plagne, 10 p.
- [CRYSTAL PALACE 2005] Le Crystal Palace (2005), Reconstitution en VRML, <http://www.iath.virginia.edu/london/model/>, site consulté le 01/02/05
- [CUENCA & al 2005] C. Cuenca, Y. Thomas, C. Ballé, A. Ballé, P. Brenni, V. Gratas, R. Halleux, B. Jacomy, J. Lengel, L. Pascaill, G. Ramuni, D. Thoulouze (2005), *Le Patrimoine scientifique et technique contemporain*, Editions L'Harmattan, ISBN 2-7475-9675-5, 267 p.

- [CUENCA 2000] C. Cuenca (2000), *Patrimoine scientifique et technique de la recherche. Projet régional de sauvegarde du patrimoine du 20^{ème} siècle*, Actes des journées d'études de l'Office de Coopération et d'Information Muséographiques, Dijon, ISBN 2-11-092787-9, 140 p.
- [DACOS 1999] M. Dacos (1999), *Le numérique au secours du papier*, Revue Cahiers d'histoire, numéro 1999-1, 27 p.
- [DAEFFLER 2007] M. Daeffler (2007), *De l'épave à l'image de synthèse. Reconstitution et analyse de navires anciens par la conception assistée par ordinateur*, 132^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Arles
- [DALBERA & al 2003] J.-P. Dalbéra, M. Foulonneau (2003), *Recherche et numérisation du patrimoine culturel*, Colloque international ICHIM, 23 p.
- [DARWIN 1969] C. Darwin (1969), *la théorie de l'évolution*, réédition, Collection les Grands textes, Paris, ISSN 1141-8826, 237 p.
- [d'AUBERT 2006] F. d'Aubert (2006), Laval virtuelle et... historique, Edito de Laval Infos, n°112, avril 2006, pp.3
- [DAUMAS 1964] M. Dumas (1964), *Histoire générale des techniques*, 5 tomes, presses universitaires de France, Quadrige
- [DAVAL 1950] R. Daval (1950), *La métaphysique de Kant*, Presses Universitaires de France, pp.20
- [DAVALLON & al 1993] J. Davallon, H. Gottesdiener, E. Triquet (1993), *Du média exposition à la muséologie*, Colloque REMUS, 12 et 13 décembre 1991, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532, pp. 82-94
- [de BAILLENX 2003] H. de Baillenx (2003), *Digitising and wax prototyping for dental applications*, 8^{ième} Conférence internationale 3D Modelling, Paris
- [de BARY & al 1998] M.-O. de Bary, J.-M. Tobelem (1998), *Manuel de muséographie : Petit guide à l'usage des responsables de musée*, ouvrage publié avec le concours du CG de la Haute-loire et de la DRAC Auvergne, ISBN 2-84049-128-1, 350 p.
- [de BOOR 1978] C. de Boor (1978), *A practical guide to splines*, Applied Mathematical Sciences, Library of Congress Cataloging, 3^{ème} édition, ISBN 0-387-90356-9
- [de LUCA & al 2005] L. de Luca, P. Véron, M. Florenzano (2005), *Rétro conception d'objets architecturaux basée sur une méthodologie de reconstruction hybride*, 9^{ème} colloque national AIP Primeca, La Plagne, 9 p.
- [de NOBLET 2005] J. de Noblet (2005), *Patrimoine et avant-garde scientifique et technique au 21^{ème} siècle : Quel passé pour quel avenir du système des objets ?*, Journée d'étude O.S.TIC, Institut de l'Homme et de la Technologie, Nantes, mars 2005
- [de VIRVILLE & al 1977] M. de Virville, D. Gluck, M. Hamon, J. Nicourt, S. Tardieu (1977), *Système descriptif des objets domestiques français*, ISBN 2-7118-0063-6, 291 p.
- [de GAGET de CASTELJAU 1985] P. de Gaget de Casteljaou (1985), *Mathématiques et CAO – formes à pôles*, Volume 2, Editions Hermès, ISBN 2-86601-044-2
- [DEJUST 1919] J. Dejust (1919), *Les chaudières à vapeurs*, Bibliothèque de l'ingénieur de travaux publics, archives du PHI-DNCS
- [DELEUZE & al 1980] G. Deleuze, F. Guattari (1980), *Mille plateaux. Capitalisme et schizophrénie*, Collection Critique, Editions de Minuit, Paris, ISBN 2-7073-0307-0, pp. 14-15
- [DELOFFRE & al 2005] V. Deloffre, P. Chiwy (2005), *Retour à Bagacum*, Virtual Retrospect 2005, Biarritz, pp.66-67
- [DELPLACE 2004] J.-C. Delplace (2004), *L'Ingénierie numérique pour l'amélioration des processus décisionnels et opérationnels en fonderie*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 169 p.
- [DENOYEL 2000] N. Denoyel (2000), *Le biais du gars, la métis des grecs et la raison expérientielle. Contribution à l'étude de la culture artisanale et de l'éc(h)oformation*, Villeneuve d'Ascq, Presses Universitaires du Septentrion, 720 p.
- [DEROUENE 2005a] L. Derouene (2005), *Réalisation d'une maquette CAO et de la cinématique associée : machine à laver le sel de Guérande*, Rapport de stage de fin d'études, UTBM, Belfort, 45 p.
- [DEROUENE 2005b] L. Derouene (2005), *Les processus de production du sel*, Rapport intermédiaire de stage de fin d'études, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 16 p.
- [DETIENNE & al 1974] M. Detienne, J.-P. Vernant (1974), *Les ruses de l'intelligence, la métis des grecs*, Paris, Champs Flammarion, 309 p.
- [DIENG-KUNTZ & al 2001] R. Dieng-Kuntz, O. Corby, F. Gandon, A. Giboin, J. Golebiowska, N. Matta, M. Ribière (2001), *Méthodes et outils pour la gestion des connaissances : Une approche pluridisciplinaire du KM*, Editions Dunod, 2^{ème} édition, ISBN 2-10-006300-6, 372 p.
- [DIEZMANN 2004] Tanja Diezmann (2004), *Real virtuality*, Colloque international ICHIM, 7 p.
- [DMS 2006] La société DMS, <http://www.dms.fr>, site web consulté le 10/07/2006
- [DOREL-FERRE 2006] G. Dorel-Ferré (2006), *Logiques spatiales, logiques sociales : quel impact patrimonial ?*, Journée d'étude *Quelle place pour le travail dans le patrimoine industriel ?*, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, Laboratoire LAMOP
- [DÖRING & al 2006] U. Döring, T. Brix, M. Reessing (2006), *Application of computational kinematics in the digital mechanism and gear library DMG-Lib*, Revue Mechanism and Theory, Editions Elsevier, ISSN 0094-114X, pp.1003-1015
- [DUJARDIN & Cie 1929] Dujardin & Cie (1929), *Les produits Piguet à force motrice thermique et air comprimé*, publicité, mars 1929, 1 p.

- [DUVAL 1993] J.-P. Duval (1993), *Outils de conception et scénographie*, Colloque REMUS, 12 et 13 décembre 1991, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532, pp. 16-17
- [ECOMUSEE DU CREUSOT 1992] Ecomusée de la communauté du Creusot-Montceau (1992), *Au siècle de la vapeur*, Guide, ISBN 2-902535-06-6, 60 p.
- [EIFFEL 1909] G. Eiffel (1909), *Recherches expérimentales sur la résistance de l'air exécutée à la Tour Eiffel*, 98 p.
- [EI MHAMEDI & al 2005] A. El Mhamedi, E. Dafaoui, K. Kemoune (2005), *Coordination et coopération des processus d'entreprise : étude de cas industriels*, 4^{ème} Conférence internationale CPI, Casablanca, Maroc, 15 p.
- [EM 1860] Etablissement de la Marine (1860), *Plan du canot à vapeur construit à Indret*, échelle 1/10, dessinateur inconnu, n.d., ~1860, archives du PHI-DNCS
- [EM 1862] Etablissement de la Marine (1862), *Correspondance*, l'Etablissement de la Marine à la direction du matériel du Ministère de la marine, 28 août 1862, archives du PHI-DNCS
- [ENQUETE 1851] Enquête (1851), *Enquête législative sur la production, la consommation et la vente de sels ordonnées par la loi du 13 janvier 1849. Enquête orale et documents recueillis par la commission*, Paris, Imprimerie de l'Assemblée Nationale, 528 p.
- [ENQUETE 1868] Enquête (1868-1869), *Enquête sur les sels*, Paris, Imprimerie Impériale, 1868-1869, 3 volumes
- [ERMINE & al 1996] J.-L. Ermine, M. Chaillot, P. Bigeon, B. Charreton, D. Malavieille (1996), *MKSM : Méthode pour la gestion des connaissances*, Ingénierie des systèmes d'information, AFCET, Editions Hermès, Vol. 4, 236 p.
- [ERMINE & al 2003] J.-L. Ermine, N. Matta (2003), *Initiation à la méthode MASK*, CD-ROM édité par l'Université de Technologie de Troyes, version 1.1
- [ERMINE & al 2004] J.-L. Ermine, B. Pauget, A. Beretti, G. Tortorici (2004), *Histoire et ingénierie des connaissances*, Colloque *Sources et ressources pour les sciences sociales*, Paris, 20 p.
- [EROGOVA & al 2006] O. Erogova, M. Ceccarelli, J. I. C. Iglesias, C. S. Lopez-Cajun, V. E. Pavlov (2006), *Agustin Betancourt: an early modern scientist and engineer in TMM*, Colloque international IDETC/CIE, Philadelphie, USA, 9 p.
- [EVERSHEIM & al 2000] W. Eversheim, F.-B. Schenke, P. Weber (2000), *Virtual engineering for an integrated product and process development*, CIRP Design Seminar, actes de la conférence, pp. 111-116
- [FERRAZZI & al 2003] E. Ferrazzi, C. Niglis, V. Bicheray, F. Laroche (2003), *Maquettage de la presse Bliss de l'ancienne maison Japy de Fesches-le-Chatel*, Rapport de travaux de laboratoires TX5X, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 20 p.
- [FERY d'ESCLANDS 1891] P. Fery d'Esclands (1891), *Morbihan, baie de Quiberon, Trinité-Carnac. Aquiculture de Kercado-Kerdrowas, fondée par MM. De Wolbock, appartenant au Vte de Wolbock, 1865-1891, ostréiculture, pisciculture, homarderies, produits de la mer*, Paris et Limoges, 163 p.
- [FIGUIER & al 1848] L. Figuiet, L. Mialhe (1848), *Examen comparatif des principales eaux minérales salines : rapport chimique et thérapeutique*, Mémoire lu à l'Académie de médecine, séance du 23 mai 1848
- [FIGUIER 1865] L. Figuiet (1865), *Les grandes inventions – anciennes et modernes – dans les sciences, l'industrie et l'art - Préface*, 3^{ème} édition, Librairie Hachette, Paris, pp. 1-2
- [FIGUIER 1876] L. Figuiet (1876), *Le savant du foyer ou notions scientifiques sur les objets de la vie - Préface*, 7^{ème} édition, Librairie Hachette, Paris, pp. 1-4
- [FIGUIER 1880] L. Figuiet (1880), *Science et industrie : Soudes et potasses*, Bibliothèque scientifique, Combet & C^{ie} Editeurs, Paris, n.d. ~1880, pp. 533-601
- [FIGUIER 1884] L. Figuiet (1884), *Les nouvelles conquêtes de la science – l'électricité - Préface*, Librairie Furne, Paris, pp. 1-3
- [FIGUIER 1896] L. Figuiet (1896), *La Vapeur*, Les merveilles de la science - Description populaire des inventions modernes, 743 p.
- [FIGUIER 1896] L. Figuiet (1896), *Les merveilles de la science - Préface*, Tome 1, Librairie Furne, Paris, pp. 1
- [FIORENZOLI 2004] G. Fiorenzoli (2004), *La 3D révèle le fonctionnement de l'automobile de Léonard de Vinci*, Revue La Forge, n°18, pp.44-45
- [FISCHER 2007] A. Fischer (2007), *Digital processing and fusion of 3D data from emerging non-contact 3D measurement technologies*, CIRP Design Seminar, Berlin, Editions Springer, ISBN 978-3-540-69819-7, pp.387-396
- [FIVES-LILLE 2006] Le groupe Fives-Lille (2006), <http://www.fiveslille.com>, site web consulté le 10/07/2006
- [FLON 2005] E. Flon (2005), *Musée archéologique, paysage et contextualisation : la mise en scène des sites archéologiques*, Mémoire de doctorat, Université d'Avignon
- [FLYNN 1990] P.J. Flynn (1990), *CAD based computer vision: modelling and recognition strategies*, Thèse de doctorat, Michigan State University, USA
- [FONDIN 1998] H. Fondin (1998), *Le traitement numérique des documents*, Editions Hermès, ISBN 2-86601-689-0, 382 p.
- [FRANCOEUR & al 1829] L.-B. Francoeur, L.-S. Lenormand (1829), *Dictionnaire technologique universel des Arts-et-Métiers*, Tome 15, Paris, pp.393

- [FREETH & al 2006] T. Freeth, Y. Bitsakis, X. Moussas, J. H. Seiradakis, A. Tselikas, H. Mangou, M. Zafeiropoulou, R. Hadland, D. Bate, A. Ramsey, M. Allen, A. Crawley, P. Hockley, T. Malzbender, D. Gelb, W. Ambrisco, M. G. Edmunds (2006), *Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera Mechanism*, *Revue nature* n° 444, pp.587-591
- [FUCHS & al 2004] P. Fuchs, G. Moreau (2004), *Traité de Réalité Virtuelle*, Les presses de l'école des Mines de Paris, 548 p.
- [GABILLON & al 2002] B. Gabillon, M. Le Coq, C. Coppens (2002), *Outil d'aide à l'innovation*, Colloque CONFERE, 12p.
- [GARDAN 2007a] Y. Gardan (2007), *CAO : modélisation géométrique*, Techniques de l'Ingénieur, H 3 750-1, 24 p.
- [GARDAN 2007b] Y. Gardan (2007), *CAO : vers la modélisation fonctionnelle*, Techniques de l'Ingénieur, H 3 752-1, 20 p.
- [GARDONI 1999] M. Gardoni (1999), *Maîtrise de l'information non structurée et capitalisation de savoir et savoir-faire en Ingénierie Intégrée. Cas d'étude Aérospatiale*, Thèse de doctorat, Université de Metz
- [GARRO 1997] O. Garro (1997), *Contribution à la modélisation de la conception des systèmes mécaniques*, Habilitation à diriger des recherches, Grenoble I, Université Joseph Fourier, 82 p.
- [GELIN & al 2003] R. Gelin, J.-P. Martins (2003), *Interaction physique avec le monde virtuel*, Colloque international ICHIM, 16 p.
- [GENIE CIVIL 1883] *Revue du Génie Civil* (1883), *Montage de la statue de la Liberté dans les ateliers de MM Gaget, Gautier et Cie*, Tome 3, n°19, 1^{er} août 1883, pp. 466
- [GENIN 2004] C. Genin (2004), *Culture numérique : une contradiction dans les termes ?*, Colloque international ICHIM, 18 p.
- [GERO 1990] J.-S. Gero (1990), *Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design*, *Revue AI Magazine*, volume 11, n°4, pp. 26-36
- [GIASSI 2004] A. Giassi (2004), *Optimisation et conception collaborative dans le cadre de l'ingénierie simultanée*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2004
- [GINGRAS 1997] F.-P. Gingras (1997), *La théorie et le sens de la recherche*, 3^{ème} édition, Sainte-Foy, Presses de l'Université du Québec Beaufils, pp. 104
- [GODIN 2006] M. Godin (2006), *Musée des Marais : une dimension nationale*, *Journal Ouest France*, 25 avril 2006, 1 p.
- [GOMES & al 2000] S. Gomes, J.C. Sagot (2000), *A concurrent engineering experience based on a cooperative and object oriented design methodology*, 3^{ème} Conférence Internationale Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Montréal, Canada
- [GOMES & al 2001] S. Gomes, J.C. Sagot (2001), *Vers une chaîne XAO intégrée pour une conception centrée sur l'homme*, Lavoisier, Document numérique 2001/3-4, Volume 5, pp. 135-154
- [GOMES 2002] S. Gomes (2002), *Les systèmes de gestion technique : SGDT, SGBD et PLM*, Cours de Conception de Produits, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, semestre de printemps 2002
- [GORDAN & al 2002] G. Gordan, M. Billinghamurst, M. Bell, J. Woodfill, B. Kowalik, A. Erendi, J. Tilander (2002), *The Use of Dense Stereo Range Data in Augmented Reality*, IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Darmstadt, Germany, pp. 14-23
- [GORDON & al 1994] R.B. Gordon, P.M. Malone (1994), *The texture of Industry, An archaeological view of the industrialization of North America*, Presses universitaires d'Oxford, ISBN 0-1951-11-419
- [GRAZ 2005] Université de Technologie de Graz (2005), Source pour la création d'applications en réalité augmentée, http://studierstube.org/invisible_train, site consulté le 01/03/05
- [GRUBER 1993] T. Gruber (1993), *A translation approach to portable ontologies*, *Knowledge Acquisition* 5(2), pp. 199-220
- [GUERANDE 2002] *Traits d'Union... Le bulletin de la filière Sel de Guérande*, Guérande, Salines de Guérande, n°213, avril 2002, p. 7
- [GUERIN 2007] G. Guérin (2007), *Au fil de l'eau... au fil du temps*, Hippocampe – Le journal des diplômés de Centrale Nantes, n°54, pp. 8-22
- [GUILLE & al 2005] F. Guillé, C. Leduc, S. Mousseau, N. Rousset (2005), *Projet Presse a cylindre*, Rapport de projet, IUT de Nantes, 16 p.
- [GUILLEMIN 1890] A. Guillemin (1890), *La Vapeur*, *Revue La Nature pour les sciences et de leurs applications aux arts et à l'industrie*, Hachette Paris, pp. 303
- [GUILLERME 2004] A. Guillerme (2004), *Il faut sauver l'imprimerie nationale*, *le Monde*, 1^{er} juin 2004, pp.16
- [GUILLET 2006] F. Guillet (2006), *Qualité, fouille et gestion des connaissances*, Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches, Ecole Polytechnique, Université de Nantes
- [HABRIAS 1988] H. Habrias (1988), *Le modèle relationnel binaire. Méthode I.A. (NIAM)*, Editions Eyrolles
- [HAIDAR 2002] K. Haidar (2002), *Modélisation de l'endommagement des structures en béton – approches numériques et effet de la microstructure sur les propriétés de rupture*, Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Civil de Nantes et St Nazaire, Ecole Centrale de Nantes, pp. 38-43
- [HALLEUX 2005] R. Halleux (2005), *Le patrimoine des sciences physiques en Belgique*, Colloque La physique dans la société contemporaine, Conservatoire National des Arts-et-Métiers, Paris

- [HALLEUX 2006] R. Halleux (2006), *Patrimoine de la recherche et patrimoine industriel. Un chantier européen*, Journée d'étude, Musée des Arts-et-Métiers, Paris, avril 2006
- [HARVEST 2005] *MICAD 2005 : la visualisation immersive*, Revue Harvest, n°88, pp.8
- [HASAN & al 2000] R. Hasan, J. Ciccotelli, A. Bernard, P. Martin (2000), *Representation and evaluation of risks during the design phase of a complex system*, Conférence ESREL, Rotterdam, Netherlands, volume 1, pp. 141-147, ISBN 90-5809-1414
- [HASAN & al 2002] R. Hasan, J. Ciccotelli, A. Bernard (2002), *Proposition d'une nouvelle approche de conception par l'intégration du concept de Situation de travail*, 4^{ème} Conférence internationale Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, AIP-PRIMECA, Clermont-Ferrand
- [HASAN 2000] R. Hasan (2000), *Contribution à l'amélioration des performances des systèmes complexes par la prise en compte des aspects socio-techniques dès la conception : proposition d'un modèle original de situation de travail pour une nouvelle approche de conception*, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 200 p.
- [HATON & al 2007] J.-P. Haton, M.-C. Haton (2007), *Systèmes à bases de connaissances*, Techniques de l'Ingénieur, H 3 740-1, 14 p.
- [HEREDUC 2005] Hereduc (2005), *Le patrimoine dans la salle de classe – un manuel à l'usage des enseignants*, Projet Européen Hereduc, Editions Garant, ISBN 90-441-1802-1, 153 p.
- [HERREMAN 2004] Y. Herremans (2004), *Réflexions sur le patrimoine immatériel*, Revue Les nouvelles de l'ICOM, n°2, pp. 10-11
- [HOUDIN 2005] J.-P. Houdin (2005), *La reconstitution du chantier de la Grande Pyramide de Kheops*, Conférence de l'Ecole Centrale de Nantes, 12 janvier 2005
- [HOUDIN 2007] J.-P. Houdin (2007), 3D Unveils the Mystery of the Great Pyramid, <http://www.3ds.com/introduction>, site web consulté le 30/03/2007
- [HOWELL 2006] L. L. Howell (2006), *History of mechanisms: the odometer of the mormon trail*, Colloque international IDETC/CIE, Philadelphie, USA, 13 p.
- [HU & al 2000] X. Hu, J. Pang, Y. Pang, M. Atwood, W. Sun, W. C. Regli (2000), *A survey on design rationale: representation, capture and retrieval*, Conférence DETC ASME Design Engineering Technical Conferences, Baltimore, Maryland
- [HUGHES 1983] T. P. Hughes (1983), *Networks of power: electrification in Western society (1880-1930)*, ISBN 0-8018-2873-2
- [HURIET 1997] C. Huriet (1997), *Images de synthèse et monde virtuel techniques et enjeux de société*, Rapport n°168, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Sénat, Paris
- [HUXLEY 1970] Sir J. Huxley (1970 et 1973), *Memories*, mémoires en 2 volumes, Editions G. Allen & Unwin, Londres, 296 p. + 269 p.
- [ICF 1893] Société des Ingénieurs Civils de France (1893), *Liste des machines à vapeur horizontales à haute pression et à détente variable par le régulateur et à condensation - Système Piguet livrées à l'industrie*, 1890-1893, Archive F13-3-22 Ecomusée du Creusot-Montceau
- [ICF 1896] Société des Ingénieurs Civils de France (1896), *Machine à T.P., à un seul cylindre construite par Piguet & Cie*, Recueil de Construction des machines, section Appareils à vapeur – Moteurs types divers (1890-1896), 4 p.
- [ICF 1902a] Société des Ingénieurs Civils de France (1902), *La mécanique à l'exposition de 1900 – détermination des besoins de vapeur*, tome 1, chapitre 1, pp. 84-85
- [ICF 1902b] Société des Ingénieurs Civils de France (1902), *La mécanique à l'exposition de 1900 – les machines à vapeur – Piguet & Cie*, tome 1, chapitre 3, 1902, pp. 233-234
- [IEEE 2004a] Institute of Electrical and Electronics Engineers, <http://www.ieee.org>, site consulté le 01/11/04
- [IEEE 2004b] IEEE P1600.1 (2004), Standard Upper Ontology Working Group (SUO WG), <http://suo.ieee.org>
- [INCROPERA & al 1996] F. P. Incropera, D. P. DeWitt (1996), *Introduction to heat transfert*
- [ISO 2001] International Standard (2001), *Information and documentation – records management*, Norme ISO 15489-1, 19 p.
- [JACOMY 1993] B. Jacomy (1993), *Musée des Arts-et-Métiers : entre émotion et pédagogie*, Colloque REMUS, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532, pp. 47
- [JACOMY 1994] B. Jacomy (1994), *L'homme-machine*, Revue des Arts-et-Métiers n°8, septembre 1994
- [JAMET 2007] D. Jamet (2007), *The specificity of traction motors for railways application*, Conférence IFToMM, Besançon, France, 3 p. – www.iftomm2007.com
- [JANET 1930] P. Janet (1930), *La grande industrie électrique*, Revue le Génie Civil, numéro spécial publié à l'occasion du Cinquantenaire de la Fondation du Génie Civil, Paris, Novembre 1930, pp.108-116
- [JAULENT 1993] P. Jaulent (1993), *SADT un langage pour communiquer*, Editions Eyrolles, 330 p.
- [JEANTET & al 1996] A. Jeantet, H. Tiger, D. Vinck, S. Tichkiewitch (1996), *La coordination par les objets dans les équipes intégrées de conception de produit*, Ouvrage collectif Coopération et Conception, sous la direction de G. de Terssac et E. Friedberg, Editions Octarès, Toulouse, pp. 87-100
- [JEANTET 1998] A. Jeantet (1998), *Les objets intermédiaires dans la conception. Eléments pour une sociologie des processus de conception*, Sociologie du Travail, pp 291-316

- [JOËSSEL 1862] J. Joëssel (1862), *Essais d'un canot à hélice*, Mémorial du Génie maritime, septembre 1862, archives du PHI-DNCS
- [JOËSSEL 1867] J. Joëssel (1867), Notice sur les canots à vapeur, Mémorial du Génie maritime, volume 1 de 1867, archives du PHI-DNCS
- [JOLLY & al 2007] A. Jolly, E. Souleman (2007), *Modélisation thermique du canot à vapeur de 1861*, Rapport de projet de fin d'études, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 47 p.
- [JOUVET 1937] L. Jouvét (1937), *L'apport de l'électricité dans la mise en scène au théâtre et au music-hall*, Revue des Arts et Métiers Graphiques, numéro spécial *L'homme, l'électricité, la vie*
- [JURY 1906] Exposition Universelle de 1900, *Rapports du jury international*, groupe IV – première partie – classe 19, Imprimerie Nationale, Paris
- [KANT rééd.1984] I. Kant (rééd.1984), *Critique de la raison pure*, Réédition, traduction Trémésaygues et Pacaud, Presses Universitaires de France, pp.151
- [KATO & al 1999] H. Kato, M. Billinghurst (1999), *Marker Tracking and HMD Calibration for a video-based Augmented Reality Conferencing System*, 2nd International Workshop on Augmented Reality, San Francisco, USA, 10p.
- [KATO & al 2000] H. Kato, M. Billinghurst, I. Poupyrev, K. Imamoto, K. Tachibana (2000), *Virtual Object Manipulation on a Table-Top AR Environment*, International Symposium on Augmented Reality, Munich, Germany, pp.111-119
- [KATO & al 2001] H. Kato, M. Billinghurst, K. Morinaga, K. Tachibana (2001), *The Effect of Spatial Cues in Augmented Reality Video Conferencing*, 9^{ème} Conférence internationale Human-Computer Interaction, New Orleans, USA, 4 p.
- [KERARON & al 2006] Y. Keraron, A. Bernard, B. Bachimont (2006), *Annotation as a base to improve in-service feedback exchange during life cycle of complex systems*, 13^{ème} conférence internationale du CIRP sur le Life Cycle Engineering, LCE2006, Leuven
- [KERARON 2007] Y. Keraron (2007), *Couplages entre le système documentaire et les systèmes technique et humain : Les mutations numériques*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes
- [KEROUANTON 2004] J.-L. Kerouanton (2004), *Pour la grue Titan 01 du quai Wilson, Nantes*, Dossier de candidature à la liste nationale des monuments historiques, DRAC Pays de la Loire, 17 p.
- [KEROUANTON 2005] J.-L. Kérouanton (2005), *Comment appréhender les territoires et les enjeux du patrimoine technique et industriel ?*, Journée d'étude O.S.TIC, Institut de l'Homme et de la Technologie, Nantes, mars 2005
- [KUHN 1970] T. Kuhn (1970), *La structure des révolutions scientifiques*, 284 p.
- [LABOURY & al 2005] D. Laboury, V. Moreau (2005), *Un nouvel outil de saisie 3D pour l'archéologie*, Virtual Retrospect 2005, Biarritz, pp 29-31
- [LABROUSSE 2004] M. Labrousse (2004), *Proposition d'un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprise*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 161 p.
- [LAMARD & al 2005] P. Lamard, Y.-C. Lequin (2005), *La technologie entre à l'université*, Imprimerie Metthez, ISBN 2-914279-24-8, 387 p.
- [LAMARD 1988] P. Lamard (1988), *Histoire d'un capitalisme familial au 19^{ème} siècle : le capital Japy (1777-1910), Belfort, Société Belfortaine d'émulation*, Thèse de doctorat, soutenue en 1984 à l'UFC Besançon
- [LAMARD 2005] P. Lamard (2005), *Une expérience de numérisation du patrimoine matériel : l'équatorial coudé*, Colloque Mémoire et culture matérielle de l'université, Université Nancy 2, 8 mai 2005
- [LANE & al 2003] C. Lane, N. Parry (2003), *The memory machine: sound and memory at the british museum*, Colloque international ICHIM, 8-12 septembre 2003, 25 p.
- [LANORVILLE 1928] G. Lanorville (1928), *Les marais salants de Bretagne*, La Nature, revue des sciences et de leurs applications à l'art et à l'industrie, n°2791, 15 août 1928
- [LAROUCHE & al 2005a] F. Laroche, S. Le Loch (2005), *Culture technique et CAO par les machines anciennes*, Colloque CETSIS'2005, Nancy, 6 p.
- [LAROUCHE & al 2005b] F. Laroche, S. Le Loch (2005), *Une démarche pédagogique pour l'apprentissage de la CAO par l'étude de machines anciennes : cas d'une presse à platine du Musée de l'imprimerie de Nantes*, Journée d'étude O.S.TIC, Institut de l'Homme et de la Technologie, Nantes, mars 2005
- [LAROUCHE & al 2005c] F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte (2005), *Méthode de construction de situations d'usages virtuelles de systèmes techniques anciens*, 4^{ème} Conférence internationale CPI, Casablanca, Maroc, 19 p.
- [LAROUCHE & al 2005d] F. Laroche, J.-L. Kérouanton (2005), *Le patrimoine : quel domaine d'application pour quel champ d'application ?*, Journée d'étude O.S.TIC, Institut de l'Homme et de la Technologie, Nantes, mars 2005
- [LAROUCHE & al 2006a] F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte (2006), *Methodology for simulating ancient technical systems*, Revue Internationale d'Ingénierie Numérique, Integrated Design and Production, Vol. 2 n°1-2/2006, Hermès-Science, Editions Lavoisier, ISBN 978-2-7462-1679-2, pp.9-28
- [LAROUCHE & al 2006b] F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte (2006), *A new approach for preserving the technical heritage*, Colloque scientifique VRIC, Salon Laval Virtual, Laval, ISBN 2-9515730-5-7, 11 p.

- [LAROUCHE & al 2006c] F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte (2006), *Between heritage and Industrial Engineering, a new life for old product: virtuality*, Conférence Virtual Concept, Cancun, Mexique, Revue *Research in Interactive Design*, Volume 2, Editions Springer, ISBN 2-287-48363-2, 7 p.
- [LAROUCHE & al 2006d] F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte, S. Deniaud (2006), *A new methodology for a new life of old technical machines*, CIRP Design Seminar, Alberta, Canada, 12 p.
- [LAROUCHE & al 2007a] F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte (2007), *De l'objet à l'idée : entre reverse-engineering et archéologie industrielle ou comment refaire vivre le patrimoine industriel*, 10^{ème} colloque national AIP Primeca, La Plagne, ISBN 978-2-86272-451-5, 12 p.
- [LAROUCHE & al 2007b] F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte (2007), *Alphonse Duvergier: its life, its company and its famous Steam Engine*, Conférence IFToMM, Besançon, 8 p.
- [LAROUCHE & al 2007c] F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte (2007), *Une vision produit-process et sa méthodologie dédiée à la sauvegarde du patrimoine technique et industriel sous une forme virtuelle*, 5^{ème} Conférence internationale CPI, Rabat, Maroc, 19 p.
- [LAROUCHE & al 2007d] F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte (2007), *Reverse engineering for industrial heritage: 3D digitalization*, Conférence ICMA, Singapour, 18 p.
- [LAROUCHE & al 2007e] F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte (2007), *3D digitalization for patrimonial machines*, Conférence CIRP Design Seminar, Berlin, Editions Springer, ISBN 978-3-540-69819-7, pp.387-396
- [LAROUCHE & al 2007f] F. Laroche, M. Cotte, J.-L. Kerouanton, A. Bernard (2007), *L'image virtuelle comme source de connaissance pour le patrimoine technique et industriel : Comment allier Histoire et Ingénierie ?*, 132^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Arles, 13 p.
- [LAROUCHE & al 2007g] F. Laroche, S. Le Loch, M. Cotte, J.-L. Kerouanton, A. Bernard (2007), *L'histoire, un médium de didactique aux Nouvelles Technologies*, 3^{ème} journées nationales inter-IUFM sur la Recherche et la Formation des enseignants en épistémologie et Histoire des Sciences et des Techniques, groupe de recherche ReForHST, Caen, 6 p.
- [LAROUCHE & al 2007h] F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte (2007), *Un nouveau processus coopératif d'ingénierie et ses modes de représentations intermédiaires : les objets patrimoniaux à caractère industriel*, Workshop du GT C2EI, GDR-MACS du CNRS, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 9 p.
- [LAROUCHE 2003] F. Laroche (2003) *Réalisation d'un guide de conception mécanique des moteurs électriques de traction : redérouler le process mapping de la conception mécanique des moteurs de traction*, Rapport de projet de fin d'études ST50, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 322 p.
- [LAROUCHE 2004] F. Laroche (2004), *La connaissance au service de l'innovation*, Rapport de DEA, ENSAM Paris, 65 p.
- [LAROUCHE 2005] F. Laroche (2005), *Mémoire intermédiaire de thèse : état de l'art*, Rapport interne IRCCyN/IHT, 53 p.
- [LAROUCHE 2006] F. Laroche (2006), *Mémoire intermédiaire de thèse : étude historique*, Rapport interne IRCCyN/IHT, 63 p.
- [LAROUCHE 2007a] F. Laroche (2007), *Vers une muséologie numérique : méthodologie générale pour conserver et valoriser le patrimoine technique et industriel*, Journée d'étude OSTIC, Institut de l'Homme et de la Technologie
- [LAROUCHE 2007b] F. Laroche (2007), *Perspectives innovantes : l'archéologie industrielle avancée en collaboration inter-disciplinaire – Renaissance virtuelle d'un canot à vapeur de 1861*, Conférence publique organisée par DCNS, Direction des Chantiers Navals, 25 octobre 2007, Nantes
- [LAURAIN 1930] H. Laurain (1930), *Les progrès de l'éclairage*, Revue le Génie Civil, numéro spécial publié à l'occasion du Cinquantenaire de la Fondation du Génie Civil, Paris, Novembre 1930, pp.96-100
- [LAVOISY 2000] O. Lavoisy (2000), *La matière et l'action – le graphisme technique comme instrument de la coordination industrielle dans le domaine de la mécanique depuis trois siècles*, Thèse de doctorat, Laboratoire CRISTO, INPG, Grenoble, 293 p.
- [Le COADIC 1993] Y. F. Le Coadic (1993), *La muséologie des sciences et des techniques en 1991*, Colloque REMUS, 12 et 13 décembre 1991, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532, pp. 230-233
- [Le HESRAN 1938] L. Le Hesran (1938), *Notice sur les marais salants du Bassin de Guérande*, supplément à la Revue Les travaux Publics, n°903, Paris, p. 2
- [Le LOCH & al 2007] S. Le Loch, F. Laroche (2007), *Maquettes numériques de machines patrimoniales pour l'enseignement de la CAO en projet tutoré*, 10^{ème} Colloque National AIP PRIMECA, La Plagne, 11 p.
- [LECAILLE 2003] P. Lécaille (2003), *La trace habilitée - Une ethnographie des espaces de conception dans un bureau d'études de mécanique : l'échange et l'équipement des objets grapho-numériques entre outils et acteurs de la conception*, Thèse de doctorat, laboratoire CRISTO, INPG, Grenoble
- [LEDIEU 1862] A. Ledieu (1862-1863), *Traité élémentaire des appareils à vapeur de navigation*, Tome 2, archives du PHI-DNCS
- [LEDIEU 1876a] A. Ledieu (1876-1880), *Appareils de Navigation*, Tome 1, archives du PHI-DNCS
- [LEDIEU 1876b] A. Ledieu (1876-1880), *Les nouvelles machines marines*, archives du PHI-DNCS

- [LEE 2005] J.L. Lee (2005), *Little did he know : Gustave Eiffel's unknowing contribution to supersonic aeronautics*, Colloque international à l'occasion du Centenaire de l'expérience de Gustave Eiffel sur la résistance de l'air à la Tour, ASME, Paris
- [LEGIFRANCE 2006] Legifrance (2006), Code pénal, www.legifrance.gouv.fr, Site web consulté le 29/12/06
- [LEGIFRANCE 2007] Legifrance (2007), Code du patrimoine, www.legifrance.gouv.fr, Site web consulté le 12/07/07
- [LEROI-GOURHAN 1943] A. Leroi-Gourhan (1943), *Evolution et techniques - L'homme et la matière*, Ré-édition de 1971, ISBN 2-226-06213-0, 348 p.
- [LHERITEAU 1999] P. Lheriteau (1999), *Architecture et territoires : approches pour une extension du Musée des Marais Salants de Batz-sur-Mer*, Rapport de projet de fin d'études, Ecole d'Architecture de Nantes, 105 p.
- [LOIRE-INFÉRIEURE 1900] Auteur inconnu, *Le département de la Loire-Inférieure : le sel*, document probablement issu de la revue La Nature, n.d., ~1900, pp.141
- [LOMBARD 2006] M. Lombard (2006), *Contribution de la Modélisation Informationnelle aux Processus de Conception et Réalisation de Produits Manufacturiers : vers une Ontologie Métier*, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 166 p.
- [LOOMIS 1991] R. J. Loomis (1991), *Publics - Planification pour le visiteur*, Colloque REMUS, 12 et 13 décembre 1991, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532, pp. 110-112
- [LOPES 2003] J. Lopes (2003), *Tridimensional virtual and physical reconstruction of Brazilian vertebrate fossils*, 8^{ème} Conférence internationale 3D modeling, Paris
- [LOUBET & al 2003] J.-L. Loubet, P. Griset, D. Larroque (2003), *Électricité, électronique : un siècle de développement automobile*, Editions PSA Peugeot Citroën, Editions du Palmier, Nîmes, 368 p.
- [MAKKUNI 2003] R. Makkuni (2003), *Culture as a driver of innovation*, Colloque international ICHIM, 8-12 septembre 2003, 14 p.
- [MANIGAND-CHAPLAIN 1999] C. Manigand-Chaplain (1999), *Les sources du patrimoine industriel*, par l'Inventaire Général et le CILAC, Editions du patrimoine, ISBN 2-9513157-0-8, 96 p.
- [MARIOT 2006] S. Mariot (2006), *Okhra : une coopérative multi-partenariale à vocation culturelle*, Journée d'étude sur le Patrimoine industriel comme vecteur de reconquête économique, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 9 juin 2006
- [MARTIN 1999] C. Martin (1999), *Conception intégrée. Interopérativité des méthodes : AF, QFD, AMDEC dans le cadre du projet PIRAMID*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, 1999
- [MARTIN 2002a] J.-B. Martin (2002), *Réalisation d'une maquette numérique de la Machine à Vapeur Pignet de l'Ecomusée du Creusot*, Rapport de travaux de laboratoire, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 39 p.
- [MARTIN 2002b] P.-R. Martin (2002), *De prelis inventoribusque*, 2^{ème} édition, Angers, 222 p.
- [MATHIEU 2005] H. Mathieu (2005), *Les grandes dates des politiques culturelles françaises*, Rencontres nationales des Chantiers thématiques Animafac, Université Paris 8, 15 p.
- [MB 1862] Mines de Blanzay (1862), *Correspondance de confirmation de commande*, Les Mines de Blanzay à l'Etablissement de la Marine à la direction du matériel du Ministère de la marine, 17 octobre 1861, archives du PHI-DNCS
- [MERCIER 1989] A. Mercier (1989), 1794, *l'Abbé Grégoire et la création du Conservatoire national des arts et métiers*, Musée national des techniques, CNAM, Paris, 51 p.
- [MERLO 2003] C. Merlo (2003), *Modélisation des connaissances en conduite de l'ingénierie : mise en œuvre d'un environnement d'assistance aux acteurs*, Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 251 p.
- [MICAD 2005] MICAD, *Tools and methodologies for product design, manufacture and lifecycle management*, 24^{ème} Conférence internationale, Paris
- [MICADO 2002] Micado (2002), *Compte rendu de la commission gestion des connaissances du 7 novembre 2002*, Etats généraux de la CFAO, 8 p.
- [MICHEL 2007] A.-P. Michel (2007), *Du document visuel à la reconstitution virtuelle : l'image de synthèse des usines Renault de Billancourt pendant l'entre-deux-guerres*, 132^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Arles
- [MIDLER 1993] C. Midler (1993), *L'Auto qui n'existait pas. Management des projets et transformation de l'entreprise*, Editions Dunod, ISBN : 2-10-004228-9
- [MIKCHEVITCH & al 2005] A. Mikchevitch, J.-C. Léon, A. Gousskov (2005), *Vers de nouvelles méthodes de simulation des opérations d'assemblage : évaluation d'assemblage de pièces flexibles dans un environnement de RV*, 9^{ème} colloque national AIP Primeca, La Plagne, 13 p.
- [MILLET 2004] D. Millet (2004), *Un guide pour l'élaboration d'une thèse en Génie Industriel*, Laboratoire Conception de Produit et Innovation, ENSAM Paris, 20 p.
- [MILLET 2003] S. Millet (2003), *Le SADT*, Cours de DEA, ENSAM Paris
- [MM 1860] Ministère de la marine Française (1860), *Dépêche ministérielle*, la direction du matériel du Ministère de la marine Française à M. le Directeur de l'Etablissement de la Marine, 9 décembre 1860, archives du PHI-DNCS
- [MONDIEZ 1954] A. Mondiez (1954), *Cours Physique Industrielle - Production et utilisation de la chaleur*, Tome 1 & 2
- [MONOD 1970] J. Monod (1970), *Le Hasard et la nécessité*, Éditions du Seuil, Paris, 259 p.

- [MONTEIL 1930] C. Monteil (1930), *L'évolution des machines thermiques*, Revue le Génie Civil, numéro spécial publié à l'occasion du Cinquantenaire de la Fondation du Génie Civil, Paris, Novembre 1930, pp.175-183
- [MONTPETIT 1996] R. Montpetit (1996), *Une logique d'exposition populaire*, Revue *Publics & Musées*, n°9, pp. 55-100
- [MORAND 2007] B. Morand (2007), Diagramme de structure statique (UML) - Classe : définition et notation, <http://www.iut3.unicaen.fr/~moranb/cours/acsi/static2/stat3.htm>, site web consulté le 26/08/2007
- [MORELLI 2003] P. Morelli (2003), *Entre texte et contexte : de la conservation de l'oeuvre d'art par le numérique*, Colloque international ICHIM, 31 p.
- [MORRIS 1938] C. Morris (1938), *Foundation of the theory of signs*, Encyclopédie Internationale des Sciences Unifiées, vol. 1, n°2, Presses Universitaires de Chicago
- [MOSCHEROSCH 1656] J.-M. Moscherosch (1656), *Technologie allemande et française*, dans *Trésor de la langue française*, Edition Gallimard, Paris
- [MOUCHARD & al 2006] L. Mouchard, E. Salin (2006), *La numérisation 3D du patrimoine technique et industriel*, rapport de Projet d'Etude Recherche, Ecole Centrale de Nantes, 12 p.
- [MUSEE 1998] Musée de l'Imprimerie de Nantes (1998), *Si le Musée de l'imprimerie de Nantes m'était conté*, Editions Pro Arte Graphica, XXX p.
- [MUSEE 2002] Musée des marais Salants, *Projet Scientifique et Culturel*, 2002-2004
- [MUSEE 2004] Musée des marais Salants, *Etude de programmation*, 2004
- [NDIAYE & al 1999] D. Ndiaye, M. Bigand, D. Corbeel, J.-P. Bourey (1999), *Information system for production engineering: contribution to maintaining consistency of composite data using object approach*, 9 p.
- [NEAU 2004] E. Neau (2004) *Innovation et information stratégique*, DESS Information Stratégique et Innovation Technologique, ISTIA
- [NIJSSSEN & al 1989] G.M. Nijssen, T. Halpin (1989), *Conceptual Schema and Relational Database Design*, Prentice Hall, Sydney
- [NOEL & al 2005] J. Noel, G. Subsol, B. Mafart, G. Guipert, J.-D. Gascuel (2005), *Les collections muséographiques en 3D par microtomographie rayons X*, Virtual Retrospect 2005, Biarritz, pp 44-48
- [NONAKA & al 1998] I. Nonaka, N. Konno (1998), *The concept of "ba": Building a foundation for knowledge creation*, California Management Review, n°40-3, pp.40-54
- [NOY & al 2004] N.L. Noy, D.L. McGuinness (2004), *Ontology Development*, http://protege.stanford.edu/publications/ontology_development/ontology101-noy-mcguinness.html
- [OLIVE & al 2007] J. Olive, I. Thouvenin, D. Lourdeaux, M. Sbaoui (2007), *Formation aux techniques industrielles à l'aide des environnements virtuels*, 10^{ème} colloque national AIP Primeca, La Plagne, 11 p.
- [OSAKA 2005] Université d'Osaka (2005), Source pour la création d'applications en réalité augmentée, <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit>, site consulté le 01/05/05
- [OTT 1993] E. Ott (1993), *Chaos in dynamical systems*, Presses universitaires de Cambridge
- [OUAZZANI & al 1998] A. Ouazzani, A. Bernard, J.-C. Bocquet (1998), *Process modelling: a design history capture perspective*, 2^{ème} Conférence internationale Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Compiègne
- [ÖZİŞİK 1985] M. N. ÖZİŞİK (1985), *HEAT TRANSFERT A BASIC APPROACH*
- [PAINLEVE & al 1913] P. Painleve, G. Bonnier, R. Bertin, F. Bloch, A. Fernbach, M. Labbe, E. Leroy, L. Marchis, A. Naquet, P. Strauss, E.-L. Trouessart, *Le monde et la science - préface*, encyclopédie collective, Volume 1, librairie Schwarz & Cie, Paris, n.d., ~1913, pp. 3-4
- [PANCHETTI & al 2007] M. Panchetti, J.-P. Pernot, P. Véron (2007), *Remplissage de trous dans les maillages à l'aide de lignes de caractères extraites d'images*, 10^{ème} colloque national AIP Primeca, La Plagne, 12 p.
- [PARALLELGRAPHICS 2005] Parallelgraphics, Le format VRML, <http://www.parallelgraphics.com>, site consulté le 01/02/05
- [PAYEN 1985] J. Payen (1985), *Technologie de l'énergie vapeur en France dans la première moitié du 19^{ème} siècle. La machine à vapeur fixe*, thèse de Doctorat d'Etat soutenue à l'Université de Paris le 18 février 1978, édité par le Comité des Travaux Historiques et Scientifiques
- [PERCOCO 2003] G. Percoco (2003), *DOE based evaluation of point cloud filtering on STL quality*, 8^{ème} Conférence internationale, 3D digitisation and modelling professionals, Paris, 11 p.
- [PERF-RV 2004] Perf-RV (2004), *Rapport de synthèse finale*, Projet Perf-RV, réseau RNTL, 64 p.
- [PEYRAUT & al 2007] F. Peyraut, J.-L. Seichepine, H. I. Faraoun, M. Hertter, D. Sporer, N. Hopkins et C. Coddet (2007), *Simulation multi-physique et multi-échelle du comportement des revêtements abrasables – application à l'industrie aéronautique*, 10^{ème} Colloque National AIP PRIMECA, La Plagne, 12 p.
- [PIECHOCKI 2007] L. Piechocki (2007), l'UML en français, <http://uml.free.fr>, site web consulté le 26/08/2007
- [PIEGL & al 1997] L. Piegl, W. Tiller (1997), *the Nurbs book*, Editions Springer-Verlag, New York
- [PIGEAUD & al 2007] R. Pigeaud, M. Deveau, N. Paparoditis (2007), *Réalité virtuelle, réalité souterraine : les fac-similés numériques en trois dimensions des grottes ornées paléolithiques. Intérêt et méthodes*, 132^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Arles

- [PILLON 2005] D. Pillon (2005), *Des hypothèses archéologiques, au travail d'archives et à la mise en scène virtuelle : la ville de Laval au Moyen-Age*, Journée d'étude OSTIC, Institut de l'Homme et de la Technologie
- [PLINE 1850] Pline (1850), *Histoire naturelle*, Traduction de Littré, publiée dans la collection des auteurs latins de Dubochet, Paris, tome 2, pp. 360-362
- [POITOU 1989] J.-P. Poitou (1989), *30 ans de CAO en France ou les petits enfants de Gaspard Monge*, Editions Hermès, 1989, ISBN 2-86601-155-4, 160 p.
- [POMIAN 1996] J. Pomian, *Mémoire d'entreprise, techniques et outils de la gestion du savoir*, Editions Sapienta
- [POSEA & al 2004] V. Posea, M. Harzallah (2004), *Ontologies : définition et applications*, IC'2004, 15^{ème} Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances, Lyon, 2 p.
- [POULIQUEN 2006] M. Pouliquen (2006), *Proposition d'un modèle de main pour la simulation des interactions Homme-machine en environnement virtuel. Application à la prévention des risques d'accidents aux mains*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes
- [POVEDA 2001] O. Poveda (2001), *Pilotage technique des projets d'ingénierie simultanée, modélisation des processus, analyse et instrumentation*, Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, 224 p.
- [PRASAD 1996] B. Prasad 1996, *Concurrent Engineering: Fundamentals*, Revue *Integrated Product Development*, volume 2, ISBN 0-13-396496-0, 500 p.
- [PRESSOUYRE 1993] L. Pressouyre (1993), *La convention du patrimoine mondial 20 ans après*, Editions Unesco, 66 p.
- [PSA 2005] Réseau gestion des connaissances PSA (2005), http://www.dpta.inetpsa.com/reseau_gestion_connaissances, consulté le 01/09/05
- [QUERE 2005] B. Quere (2005), *L'évolution du graphisme technique de 1750 à 1850*, Journée d'étude O.S.TIC, Institut de l'Homme et de la Technologie, Nantes
- [RAMIER & al 2005] A. Ramier, E. Rainteau, A. Thebaud (2005), *Projet Presse à platine : La Minerve*, Rapport de projet, IUT de Nantes, 40 p.
- [RASSE 1993] P. Rasse (1993), *Communication et muséologie des techniques*, Colloque REMUS, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532, pp. 18-23
- [RASSE 1997] P. Rasse (1997), *Techniques et Cultures au Musée*, Presses universitaires de Lyon, ISBN 2-7297-0577-5, 229 p.
- [REEDIJK 1999] Hein Reedijk (1999), *Quel musée pour les sociétés du 21^{ème} siècle ?*, La lettre de l'OCIM n°63, 1999, pp. 30-34
- [REMUS 1993] REMUS (1993), *La muséologie des sciences et des techniques*, Colloque REMUS des 12 et 13 décembre 1991, Paris, Palais de la découverte, ISBN 2-11-087532, 235 p.
- [REMY 2004] S. Remy (2004), *Contribution à l'automatisation du processus d'acquisition de formes complexes à l'aide d'un capteur laser plan en vue de leur contrôle géométrique*, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 176 p.
- [RENIMEL 1985] S. Renimel (1985), *Nouvelles muséologies - Musée présent, techniques actuelles*, ouvrage collectif *Muséologie nouvelle et expérimentation sociale*, direction A. Nicolas, ISBN 2-906045-00-4, pp. 115-134
- [RICHEY & al 2001] M. C. Richey, R. S. McIvor, S. C. Sandwith (2001), *Computer Aided-Design-Manufacturing & Measurement Integration*, Conférence *Coordinate Measurement System*, Nouveau Mexique, 7 p.
- [RIVIERE 1989] G. H. Rivière (1989), *La muséologie selon Georges Henri Rivière*, Editions de l'ICOM, pp. 82-83
- [RNTL 2000] Réseau National des Technologies Logicielles (2000), *Le projet Dynamicité*, <http://www.telecom.gouv.fr/rntl/FichesA/Dynamicite.htm>, page consultée le 13/10/04
- [RNTL 2004] Réseau National en Technologies Logicielles (2004), *Libre blanc*, 34 p.
- [ROCHARD & al 2005a] O. Rochard, B. Gavaland, P. Beauce (2005), *Réalisation d'une maquette numérique en vue d'une vulgarisation*, Rapport bibliographique de projet, Formation DUTIL, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 65 p.
- [ROCHARD & al 2005b] O. Rochard, B. Gavaland, P. Beauce (2005), *Réalisation d'une maquette numérique en vue d'une vulgarisation*, Rapport final de projet, Formation DUTIL, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 142 p.
- [ROCHARD & al 2005c] O. Rochard, F. Laroche (2005), *Development of a Virtual Reality Interface coupled to a Knowledge database: An interactive application aimed to museum's public*, Colloque international ICHIM, Paris, 15 p.
- [ROCHE 2004] C. Roche (2004), *L'ontologie chez Condillac Group*, <http://ontology.univsavoie.fr/activites/recherche/ontologie/notreDefinitionEng.asp>
- [ROLLAND-VILLEMOT 2001] B. Rolland-Villemot (2001), *Le traitement des collections industrielles et techniques, de la connaissance à la diffusion*, La lettre de l'OCIM n°73, pp. 13-18
- [ROSER 1886] Journal des usines à gaz (1886), *Matériel d'usines à gaz - Chaudière inexplosible, système Roser*, 10^{ème} année - n° 18 du 20 septembre 1886, pp.297-298
- [ROSS & al 2004] S. Ross, M. Donnelly, M. Dobрева, D. Abbott, A. McHugh, A. Rusbridge (2004), *D i g i C U L T Technology Watch Report 3*, 297 p.
- [ROSS 1977] D.-T. Ross (1977), *Structured Analysis: a language for Communicating Ideas*, Conférence internationale IEEE *Transaction on Software Engineering*, pp. 15-34
- [ROUCOULES 1999] L. Roucoules (1999), *Méthodes et connaissances : contribution au développement*

- d'un environnement de conception intégrée*, Thèse de doctorat en Mécanique, INPG, septembre, Grenoble, 182 p.
- [ROUCOULES 1999] L. Roucoules (1999), *Méthodes et connaissances : contribution au développement d'un environnement de conception intégrée*, Thèse de doctorat, INPG, Grenoble
- [ROUL 2006] A. Roul (2006), *Canot à vapeur de 1861 : historique*, Document interne au PHI, 9 p.
- [ROUSSEAU 2000] H. Rousseau (2000), *Une approche par la théorie du chaos pour l'analyse des flux dans un système de production*, Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, 148 p.
- [RUMBAUGH 1995] J. Rumbaugh (1995), *Modélisation et conception orientées objet - Object Modeling Technique (OMT)*, Editions Masson, 1995
- [SAINT-AUBIN 2007] J.-P. Saint-Aubin (2007), *Les nouveaux outils du dessin archéologique face à l'urgence*, 132^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Arles
- [SAINT-NAZAIRE 1898] *Le Courrier de Saint-Nazaire*, 32^{ème} année, n°24, 11 juin 1898
- [SAITO & al 1991] K. Saito, T. Miyoshi, H. Yoshikawa (1991), *Non-contact 3D digitizing and machining system for free-form surfaces*, CIRP Annals 40/1, pp. 483
- [SALINES 2007] <http://www.salines.com/>, Comité des Salines de France, Paris
- [SALT 2007a] <http://www.saltinstitute.org/>, Salt Institute, Alexandria, Virginia, USA
- [SALT 2007b] <http://www.saltsense.co.uk/>, Salt Manufacturers' Association, USA
- [SAUZEREAU 2002] M. Sauzereau (2002), *L'usine : des machines et des hommes*, 3^{ème} cahier de l'Association Une tour une histoire, Couëron, ISBN 2-9512155-0-9, 95 p.
- [SERRAFERO & al 2007] P. Serraféro, S. Gomes, D. Monticolo (2007), *Ingénierie innovante, collaborative et apprenante : vers une CAO en 5D au service de la mobilité congruente*, Workshop C2EI Capitalisation et réutilisation des connaissances métier en conception de systèmes mécaniques, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 13 p.
- [SHAHROKHI 2006] M. Shahrokhi (2006), *Intégration d'un modèle de situation de travail pour l'aide à la formation et à la simulation lors de la conception et l'industrialisation de systèmes*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes
- [SHANNON 1948] C. E. Shannon (1948), *A Mathematical Theory of Communication*, Journal Bell System Technical Journal, volume 27, ISBN 0252725484
- [SHINBROT & al 1992] T. Shinbrot, W. Ditto, C. Grebogi, E. Ott, M.L. Spano, J.A. Yorke (1992), *Using the Sensitive Dependence of Chaos to Direct Orbits to Targets in an Experimental Chaotic Systems*, Physical Revue Letter n°68
- [SHINBROT & al 1993] T. Shinbrot, C. Grebogi, E. Ott, J.A. Yorke (1993), *Using Small Perturbations to Control Chaos*, Revue Nature n°363
- [SHIRKY 2005a] C. Shirky (2005), *Ontology Is Overrated*, Conférence O'Reilly ETech
- [SHIRKY 2005b] C. Shirky (2005), *Folksonomies & Tags: The rise of user-developed classification*, Conférence IMCExpo
- [SIEKIERSKI 2003] J. Siekierski (2003), *Reverse Engineering in jewellery applications*, 8^{ième} Conférence internationale 3D Modelling, Paris, 3 p.
- [SIMONDON 1989] G. Simondon (1989), *Du mode d'existence des objets techniques*, Editions Aubier, ISBN 2-7007-3414-9, 333 p.
- [SME 1990] Société Monégasque d'Electricité et du Gaz (1990), *1890-1990 : cent ans d'électricité et de gaz en Principauté de Monaco*, 42 p.
- [SMITH & al 2004] M.K. Smith, C. Welty, D.L. McGuinness (2004), OWL Web Ontology Language Guide – Introduction, <http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-guide-20040210>
- [SMITH 2006] P. Smith (2006), *Manufactures de l'Etat (tabacs et allumettes) : devenirs divers...*, Journée d'étude sur le Patrimoine industriel comme vecteur de reconquête économique, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 9 juin 2006
- [SOUBIRAN 2007] S. Soubiran (2007), *Patrimoine des universités et médiation scientifique*, La lettre de l'OCIM n°109, janvier-février 2007, pp. 33-41
- [SOUFFEZ & al 2005] J.-M. Souffez, G. Dumont (2005), *Simplification sans perte de maquettes numériques en vue de leur exploitation en réalité virtuelle*, 9^{ème} colloque national AIP Primeca, La Plagne, 10 p.
- [SOWA 2004] J.F. Sowa (2004), KR Ontology, <http://www.jfsowa.com/ontology>
- [SPACEMANTIX 2002] Projet Européen SpaceMantix (2002), *State of the Art Report in Science and Technology*, Délivrable 3.1, 107 p.
- [SPACEMANTIX 2005] Projet Européen SpaceMantix (2005), <http://www.spacemantix.org>, site consulté le 05/05/05
- [SSM 2007] <http://www.serraprocess.com/>, fabricant Serra Salt Machinery, Barcelone, Espagne
- [STEWART 1997] T. Stewart (1997), *Intellectual Capital: The New Wealth of Organizations*, Journal Fortune
- [SUBSOL 2007] G. Subsol (2007), *Traitement automatique d'images scanographiques tridimensionnelles pour l'étude de fossiles paléo-anthropologiques*, 132^{ème} congrès national des sociétés historiques et scientifiques, CTHS, Arles
- [SUNER 2005a] B. Suner (2005), *De la modélisation à la restitution dynamique des ambiances en architecture*, Journée d'étude OSTIC, Institut de l'Homme et de la Technologie
- [SUNER 2005b] B. Suner (2005), *Les outils et les méthodes pour la restitution des ambiances dans les lieux de spectacle*, Journée d'étude OSTIC, Institut de l'Homme et de la Technologie

- [TESSON & al 1975] J.-L. Tesson, M. Guellec (1975), *Les marais salants de la presqu'île guérandaise : situation présente et perspective d'avenir*, étude, 89 p.
- [THEVENOT 1998] D. Thévenot (1998), *Le partage des connaissances : une mémoire interactive pour la compétitivité de l'entreprise*, Editions Tec & Doc, Lavoisier, 136 p.
- [THOULOZE 2005] D. Thoulouze (2005), *Le patrimoine scientifique et technique contemporain*, journée d'étude, Musée des Arts-et-Métiers, Paris
- [THOULOZE 2006] D. Thoulouze (2006), *Recherche et développement dans l'entreprise : conserver l'instrumentation, pourquoi, comment ?*, Journée d'étude, Musée des Arts-et-Métiers, Paris
- [TICCIH 2003] TICCIH (2003), *Charte pour le patrimoine industriel*, Moscou, 4 p.
- [TICHKIEWITCH & al 1995] S. Tichkiewitch, E. Chapa Kasusky, P. Belloy (1995), *Un modèle produit multivues pour la conception intégrée*, Congrès international de Génie Industriel de Montréal – La productivité dans un monde sans frontières, vol. 3, pp. 1989-1998
- [TICHKIEWITCH 1995] S. Tichkiewitch (1995), *Ingénierie simultanée, ingénierie concourante : le point de vue du chercheur*. Colloque L'ingénierie simultanée, Pôle Régional de Conception et d'Innovation, Belfort, vol. 2, pp. 1-6
- [TISSANDIER 1870] G. Tissandier (1896), *La Nature*, Revue des sciences et de leurs applications aux arts et à l'industrie, n.d. ~1870, pp.196-198
- [TOLLENAERE 1998] M. Tollenaere (1998), *Modélisation de Données. Gestion de Données techniques*, Ouvrage collectif Conception de produits mécaniques, méthodes, modèles et outils, sous la direction de M. Tollenaere, Editions Hermès, pp. 413-434
- [TOPOI 2001] A. Topoi (2001), *VRML : étude, mise en oeuvre et applications*, Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur en informatique, CNAM Paris, 161 p.
- [TOURTIER 1995] P.-A. Tourtier (1995), *Analyse préliminaire des métiers et de leurs interactions*, Rapport intermédiaire du projet GENIE, INRIA-Dassault-Aviation
- [TURGAN 1885] J. Turgan (1885), *Les grandes usines de France : Piquet et Cie – les successeurs d'Alphonse Duvergier*, Revue périodique des arts industriels, Paris, pp.1-16
- [UML 2007] UML (2007), UML® Resource Page, <http://www.uml.org>
- [UNESCO 1972] Unesco (1972), *Convention concernant la protection du patrimoine mondial culturel et naturel*, 17^{ème} Conférence générale, Paris, 17 p.
- [UNESCO 2003] Unesco (2003), *Convention pour la sauvegarde du patrimoine culturel immatériel*, Paris, 14 p.
- [UNESCO 2004] Unesco (2004), *Biens inscrits sur la liste du patrimoine mondial*, Annexe à la convention, 19 p.
- [UNESCO 2005] Unesco (2005), *Orientations devant guider la mise en oeuvre de la Convention du patrimoine mondial*, 163 p.
- [USINE NOUVELLE 2006] Usine nouvelle (2006), *Le journal des régions – le patrimoine industriel à l'honneur*, L'usine nouvelle n°3022, 14 septembre 2006, pp. 74-82
- [VAN HOUTEN & al 2000] F.J.A.M. Van Houten, F. Kimura (2000), *The virtual maintenance system: a computer-based support tool for robust design*, product monitoring, fault diagnosis and maintenance planning, Manufacturing Technology, Annals of the CIRP, 49/1, pp. 91-94
- [VANDENDRIESSCHE 2005] O. Vandendriessche (2005), *Mise en œuvre d'une solution métier intégrée pour la filière électrique*, Société Volvo IT, Conférence MICAD
- [VASCONCELOS & al 2005] D. Da Silva Vasconcelos, O. Zampetti (2005), *Mémoire professionnel*, pp.31-32
- [VINCK & al 1995] D. Vinck, A. Jeantet (1995), *Commissioning or mediating objects in the sociotechnical process of product design : a conceptual approach*, COST Social Sciences Serie
- [VINCK 2004] D. Vinck (2004), *Production d'objets intermédiaires*, Etat de la réflexion, Département STIC CNRS, RTP 37
- [VPAH 2007] Les Villes et Pays d'art et d'histoire (2007), <http://www.vpah.culture.fr>, réseau national regroupant 124 villes de France animé par le ministère de la Culture et de la Communication
- [WAKITA & al 1999] A. Wakita, M. Yajima, T. Harada, H. Toriya, H. Chiyokura (1999), *XVL Technology - A compact and qualified 3D representation with lattice mesh hand surface for the internet*, White paper, <http://www.xvl3d.com/en/technology/wp.pdf>, page consultée le 03/12/04, 7 p.
- [WEIL 1999] B. Weil (1999), *Conception collective, coordination et savoirs ; les rationalisations dans la conception automobile*, Thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, Tome 1
- [WELGER-BARBOZA 2003] C. Welger-Barboza (2003), *Le musée virtuel à l'épreuve de l'enseignement et la recherche en histoire de l'art*, Colloque international ICHIM, 17 p.
- [WILLIAMS 2003] R. Williams (2003), *Reverse Engineering the greek comic mask*, 8^{ème} Conférence internationale 3D modeling, Paris, 8 p.
- [WOODS & al 2003] E. Woods, P. Mason, M. Billinghamurst (2003), *MagicMouse: an Inexpensive 6-Degree-of-Freedom Mouse*, Conférence Graphite, Melbourne
- [WORONOFF 1994] D. Woronoff (1994), *Histoire de l'industrie en France*, Editions du seuil
- [WORONOFF 2003] D. Woronoff (2003), *La France industrielle*, Paris, Editions du Chêne
- [X3D 2005] Web3D Consortium (2005), <http://www.web3d.org>, site consulté le 01/03/05
- [ZDNet 2007] ZDNet (2007), UML aide à formaliser précisément les fonctionnalités et le comportement d'une application Java - concepts de base, http://www.zdnet.fr/builder/architecture/conception_integration_si/0,39021041,39115501-2,00.htm, site web consulté le 26/08/2007

ABREVIATIONS ET LEXIQUE

- ADN = Acide DésoxyriboNucléique. Molécule support de l'information génétique héréditaire
- AFCET = Association Française pour la Cybernétique Économique et Technique
- ALPAV = Association Lyonnaise des Propriétaires d'Appareils à Vapeur
- AMCSTI = Association des Musées et des Centres pour le Développement de la Culture Scientifique, Technique et Industrielle
- AMDEC = Analyse des Modes de Défaillance Et de leur Criticité
- ANRT = Association nationale de la Recherche Technique
- APAVE = Association des Propriétaires d'Appareils à Vapeur et Electrique
- APTE = APplication aux Techniques d'Entreprise
- AR = Augmented Reality = Réalité Augmentée
- ARDECO = Aide à la Réutilisation D'Episodes de Conception
- ARUC = Alliance de Recherche Universités – Communautés
- ASCE = American Society of Civils Engineers
- Avatar = appellation donnée à un mannequin numérique dans le domaine de la Réalité Virtuelle
- BDF = Bloc Diagramme Fonctionnel
- Bluetooth = Protocole de communication informatique sans fil à moyenne portée
- Bouillette = particule d'argile
- BRep = Boundary Representation
- BTP = Bâtiments et Travaux Publics
- CAO = Conception Assistée par Ordinateur
- CATIA = Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée
- CAVE = Cave Automatic Virtual Environment
- CCSTI = Centre de Culture Scientifique, Technique et Industrielle
- CEA = Commissariat à l'Energie Atomique
- CEDIAG = Centre d'Etudes et Développement en Intelligence Artificielle (Groupe Bull)
- CFD = Computational Fluid Dynamics = Simulation dynamique mécanique et fluide
- CG = Computer Graphics
- CHAVIR = CHAntier VIRtuel
- CILAC = Comité d'Information et de Liaison pour l'ArChéologie
- CMM = Coordinate Measuring Machine
- CNAM = Conservatoire National des ARTS-ET-METIERS
- CNISF = Conseil National des Ingénieurs et Scientifiques de France
- CNRS = Centre National de la Recherche Scientifique
- CNU = Conseil National des Universités
- CPNI = Laboratoire Conception de Produits Nouveaux et Innovation, ENSAM Paris
- CSG = Constructive Solid Geometry
- CTHS = Comité des Travaux Historiques et Scientifiques
- CTI = Commission des Titres d'Ingénieur
- DAO = Dessin Assisté par Ordinateur
- DEA = Diplôme d'Etudes Approfondies
- DHRM = Digital Heritage Reference Model
- Diapir = Formation géologique souterraine de sel, en forme de dôme
- DINQ = Direction de l'Innovation et de la Qualité à PSA PEUGEOT CITROËN
- DMF = Direction des Musées de France
- DMS SA = DUJARDIN-MONTBARD-SOMENOR Société Anonyme
- DMU = Digital Mock-Up, la maquette numérique
- DPTA = Direction des Plates-formes et Achats à PSA PEUGEOT CITROËN
- DRAC = Direction Régionale des Affaires Culturelles
- DST = Direction de la Surveillance du Territoire français
- EDF = Electricité De France
- EELM = ENERGIE ELECTRIQUE du LITTORAL MEDITERRANEEN
- ENSAM = Ecole Nationale Supérieure d'ARTS-ET-METIERS
- F.L. METAL = FIVES de LILLE METAL
- Format quadruple raisin = 1 mètre x 1.3 mètres
- Forme = négatif métallique de l'affiche à imprimer
- GDI = Guide du Dessinateur Industriel
- GI = Génie Industriel
- HEREDUC = HERitage for EDUcation, programme Socrates de l'Union Européenne
- HT = Histoire des Techniques
- HTML = HyperText Markup Language
- ICE = Institution of Civil Engineers
- ICF = SOCIETE des INGENIEURS CIVILS de FRANCE

ICOM = International Councils of Museums
 ICOMOS = Conseil International des Monuments et des Sites
 ICOMOS = International Council On Monuments and Sites
 IE = Internet Explorer
 IEEE1394 = Connectique informatique permettant un taux de transfert très élevé (environ 400 Mo/sec)
 IHM = Interface Homme Machine
 Interopérabilité = Capacité de plusieurs langages à communiquer (domaines de l'informatique et de la modélisation d'entreprise)
 IRCCyN = Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes
 IUFM = Institut Universitaire de Formation des Maîtres
 IVGI = Ingénierie Virtuelle pour le Génie Industriel, équipe de recherche de l'IRCCyN – www.irccyn.ec-nantes.fr
 KADS = Knowledge Acquisition Design Systems
 KBE = Knowledge Based Engineering
 KM = Knowledge Management OU Capitalisation des Connaissances
 KOOL = Knowledge representation Object Oriented Language
 MIT = Massachusetts Institute of Technology
 MMT = Machines à Mesurer Tridimensionnelles
 Musée vivant = se dit des Musées dans lesquels les artefacts sont utilisables ou fonctionnels
 NIAM = Nijssen Information Analysis Method
 NTIC = Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication
 Nurbs = Non-Uniform Rational Bezier Splines
 OCIM = l'Office de Coopération et d'Information Muséographiques
 Œillet = Bassin rectangulaire à fond bombé situé à 1.50 mètres au-dessous du niveau de la mer
 OMS = Organisation Mondiale de la Santé
 ONG = Organisation Non Gouvernementale
 Open source = logiciel distribué gratuitement et dont le code source est en accès libre sans droit d'auteur
 OS = Ouvriers Spécialisés
 OST = Organisation Scientifique du Travail
 OSTIC = Objet, Société, Technologie de l'Information et de la Communication. Pôle pluridisciplinaire rassemblant des experts de 2 domaines : les sciences pour l'ingénieur et les sciences humaines et sociales
 PDA = Pocket Data Assistant
 PDM = Product Data Management
 PHI = Pôle Historique d'Indret
 Platine = Support de la feuille dans le métier de l'imprimerie
 PLC = Product Life Cycle = Cycle de vie produit
 PLM = Paris-Lyon-Méditerranée
 PLM = Product Lifecycle Management
 QFD = Quality Function Deployment
 R&D = Recherche et Développement
 RDM = Résistance des Matériaux
 ReForEHST = REcherche et FORMation en Épistémologie et Histoire des Sciences et des Techniques
 REX = Méthode de KM pour le Retour d'Expériences
 RMN = Résonance Magnétique Nucléaire
 RMN = REUNION des MUSEES NATIONAUX de FRANCE
 RNTL = Réseau National des Technologies Logicielles
 ROI = Retour sur investissement
 Rouable = Outil de type râteau mais sans dent et muni d'un grand manche permettant de récolter le sel dans les œillets
 Roulier = Nom donné aux ouvriers chargés de transporter le sel
 RV = Réalité Virtuelle
 SACM = Société Alsacienne de Construction Mécanique
 SADT = Structured Analyse Design Technique
 Salorge = Magasin servant à entreposer le sel
 SAS Cube = Salle immersive multi-écrans cubique de Réalité Virtuelle en stéréoscopie active
 SBM = Société des Bains de Mer
 SCA = Société Coopérative Agricole
 SCE = Society of Civil Engineers, Angleterre
 SDELF = Société de Distribution d'Eau, de Lumières et de Force
 SHS = Sciences Humaines et Sociales
 SME = Société Monégasque d'Electricité
 SPI = Sciences Pour l'Ingénieur
 ST = Système Technique
 STEP = STandard for the Exchange of Product model data
 T.P. = Tiroir-Plans, système de distribution de la vapeur
 THPF = Vis à Tête Hexagonale Partiellement Filetée
 TIC = Technologies de l'Information et de la Communication
 TICCIH = Comité international pour la conservation du patrimoine industriel
 TRIZ = Théorie de Résolution des Problèmes Inventifs
 UICN = Union mondiale pour la nature
 UML = Unified Modelling Language
 UNESCO = United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization OU Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture
 UTBM = Université de Technologie de Belfort-Montbéliard – www.utbm.fr
 VM = Virtual Manufacturing
 VP = Virtual Prototyping
 VRML = Virtual Reality Modelling Language
 XML = eXtensible Markup Language
 XVL = eXtended VRML

INDEX DES FIGURES

Figure 1 : Presse Bliss – machine réelle et modèle virtuel	18
Figure 2 : La démarche de recherche en GI	24
Figure 3 : Le schéma global du projet de recherche selon Millet	25
Figure 4 : La démarche de recherche en HT	26
Figure 5 : Le processus d'expérimentation d'un mini-projet	28
Figure 6 : Le cycle en V standard utilisé en gestion de projets	28
Figure 7 : Le cycle en V modifié : méthode en racine carrée pour la conduite de projets patrimoniaux et pour l'aspect recherche de leurs modélisations conceptuelles associées	29
Figure 8 : La démarche scientifique de notre projet de recherche développée sur la base de cycles en racines carrées	29
Figure 9 : Découpage du manuscrit et apport scientifique	35
Figure 10 : Position et contenu de ma recherche SADT Version 1	36
Figure 11 : Le triptyque du patrimoine	43
Figure 12 : Ironbridge, Coalkbrookdale, Shropshire, Angleterre	44
Figure 13 : Vers une cartographie globalisante de l'artisanat et de l'industrie	45
Figure 14 : Diagramme de classes de la classe Système technique patrimonial	50
Figure 15 : Du Contenant au Contenu de la classe Typologie	51
Figure 16 : Montage de la statue de la Liberté dans les ateliers de MM Gaget, Gautier et Cie	53
Figure 17 : Diagramme de classes du patrimoine et du patrimoine industriel	54
Figure 18 : Grue Titan 01 – Photographie en 2006 et croquis original de 1965	65
Figure 19 : Diagramme de classes de la définition du patrimoine culturel par les critères de l'Unesco	67
Figure 20 : L'espace multi-dimensionnel de positionnement des biens patrimoniaux	68
Figure 21 : Position et contenu de ma recherche SADT Version 2	69
Figure 22 : Le modèle des deux chaînes	74
Figure 23 : Position et contenu de ma recherche SADT Version 3	75
Figure 24 : Le processus de la capitalisation des connaissances en histoire	79
Figure 25 : Exemple de connaissances constructeur (Presse d'Imprimerie Voirin, 19 ^{ème} siècle)	80
Figure 26 : Exemple de connaissances techniques (Presse typographique à arrêt de cylindre et à chemin de fer, 19 ^{ème} siècle)	80
Figure 27 : la chaîne de transformation de l'information	82
Figure 28 : Le processus de la capitalisation des connaissances en Génie Industriel	85
Figure 29 : Les techniques d'acquisition et les modes de transcription des connaissances	85
Figure 30 : Etat de l'art des outils et méthodes de KM [PSA 2005]	86
Figure 31 : L'évolution du graphisme technique	90
Figure 32 : Les générations successives des outils de CAO : de la 2D à la 5D	90
Figure 33 : Hypothèse de la chaîne numérique de patrimonialisation en virtuel	91
Figure 34 : Exemple de numérisation d'un pont à l'aide d'un théodolite laser Leica	96
Figure 35 : Tableau récapitulatif des technologies de numérisation	96
Figure 36 : Le HandyScan de la société Creaform3D	98
Figure 37 : Exemple de reconception d'une chaise après sélection des points aigus	101
Figure 38 : La chaîne numérique globale selon les industriels	108
Figure 39 : Entre réalité et virtualité : la numérisation 3D et l'impression 3D	109
Figure 40 : Différences entre une maquette physique et une maquette virtuelle	111
Figure 41 : Enquête sur la compréhension du public face aux objets techniques complexes	112
Figure 42 : Fichier 3D XML de la presse Bliss	121
Figure 43 : La méthodologie générale de l'hypothèse n°1	134
Figure 44 : Les classes à manipuler lors d'un travail d'archéologie industrielle avancée	134
Figure 45 : Les multi-dimensions contextualisantes de la machine à vapeur Pignet n°135	138
Figure 46 : Evolution des ventes de machines à vapeur de la société Pignet & Cie depuis sa création par Duvergier jusqu'en 1898	143

Figure 47 : 1885-1929 : Evolution du capital de l'entreprise créée par Alphonse Duvergier _____	144
Figure 48 : 1902 - Machine à vapeur Piguet de 25 chevaux _____	147
Figure 49 : Disposition générale de la machine Duvergier en 1885 _____	148
Figure 50 : 1900 - Machine à vapeur Piguet - Plan d'ensemble hors pompe et condenseur _____	150
Figure 51 : 1900 – Machine à vapeur Piguet - Plan de détails du cylindre et du double tiroir _____	151
Figure 52 : 1900 – Machine à vapeur Piguet - Schéma des deux tiroirs superposés _____	153
Figure 53 : 1900 – Machine à vapeur Piguet - Plan de détails de la distribution _____	154
Figure 54 : Lampe à arc, système Bardou _____	157
Figure 55 : L'usine de Marchesseaux à Monaco en 1888 _____	158
Figure 56 : L'usine de la Chiappaïra à Monaco en 1892 _____	160
Figure 57 : L'usine de Fontvieille à Monaco en 1899 _____	160
Figure 58 : Machine Piguet 40x80 T.P. : copie du plan original de 1898 _____	162
Figure 59 : Schéma d'implantation des machines dans l'usine de Fontvieille en 1899 _____	162
Figure 60 : Schéma d'une chaudière de type Roser en 1886 _____	163
Figure 61 : L'éclairage au gaz, le tramway et les lignes électriques aériennes sur l'Avenue d'Ostende à Monaco en 1898 _____	164
Figure 62 : Variation de la puissance électrique de pointe à Monaco de 1890 à 1930 _____	165
Figure 63 : 1977 – Les bâtiments de la Scierie de La Roche-en-Brénil sans modification depuis 1930 _____	169
Figure 64 : Evolution du cumul des cotisations à l'Association Lyonnaise des Propriétaires d'appareils à Vapeur _____	171
Figure 65 : 1977 – Scierie de La Roche-en-Brénil : Couplage du volant d'inertie et de l'axe de distribution de force motrice _____	173
Figure 66 : 2007 – Scierie de La Roche-en-Brénil : L'arbre principal de puissance _____	173
Figure 67 : 1931 - Répartition des appareils électriques de la scierie Brunel _____	174
Figure 68 : 2007 – Scierie de La Roche-en-Brénil : Ancienne cheminée et Pont _____	175
Figure 69 : 2007 – Scierie de La Roche-en-Brénil : Pont roulant et anciens bâtiments de la scierie _____	175
Figure 70 : Evolution de la puissance en courant alternatif disponible et utilisée de 1934 à 1938 _____	175
Figure 71 : Evolution de la puissance en courant continu disponible et utilisée de 1931 à 1938 _____	176
Figure 72 : Evolution de l'installation électrique de La Roche-en-Brénil : 1931 (à gauche) et 1937 (à droite) _____	176
Figure 73 : 1977 – La chaudière de La Roche-en-Brénil installée depuis 1946 _____	177
Figure 74 : Juillet 1954 – caractéristiques de la machine Piguet n°135 _____	180
Figure 75 : 2007 - Carte IGN d'implantation de la scierie à La Roche-en-Brénil avec la ligne du PLM et la route de Paris _____	182
Figure 76 : 1977 - La machine Piguet n°135 à l'arrêt _____	183
Figure 77 : Schéma d'implantation de la salle des machines de la scierie Brunel en 1977. _____	183
Figure 78 : La machine Piguet en démontage [Bien Public 1994] _____	184
Figure 79 : Machine Piguet : modèle filaire du piston _____	186
Figure 80 : Machine Piguet : habillage du modèle filaire du piston _____	186
Figure 81 : Méthodologie de modélisation en CAO 3D+T d'un objet patrimonial _____	187
Figure 82 : Réalisation d'une liaison cinématique _____	187
Figure 83 : Machine Piguet n°135 : Partie puissance _____	189
Figure 84 : Machine Piguet n°135 : Partie Régulateur à boules _____	189
Figure 85 : Machine Piguet : Partie commande dans le cylindre _____	190
Figure 86 : Machine Piguet : Partie commande manuelle _____	190
Figure 87 : Schéma cinématique de la machine à vapeur Piguet – document manuscrit _____	191
Figure 88 : Eléments de référence nécessaires à la définition des liaisons _____	191
Figure 89 : Modèle CAO 3D+T filaire de la machine Piguet _____	192
Figure 90 : L'assemblage final volumique en rendu réaliste de la Machine Piguet _____	193
Figure 91 : Matrice illustrant le concept de visualisation d'objets en dynamique _____	195
Figure 92 : Interface principale du module informatique de visualisation d'objets techniques _____	196
Figure 93 : Répartition des zones de la page internet _____	197
Figure 94 : Application didactique de la Machine à vapeur Piguet n°135 _____	198
Figure 95 : Synthèse de l'évolution des connaissances du cas d'étude de la machine à vapeur Piguet _____	208
Figure 96 : Méthodologie générale pour la conservation du patrimoine technique et industriel _____	209
Figure 97 : Diagramme de classes de la vue Vestiges archéologiques industriels _____	212
Figure 98 : Diagramme de classes de la Vue Dossier d'œuvre patrimonial technique _____	214
Figure 99 : Diagramme de classes de la Vue Produit numérique final de valorisation _____	216
Figure 100 : Répartition temporelle des représentations intermédiaires du processus de patrimonialisation numérique _____	217
Figure 101 : La situation d'usage générique lors d'une activité de patrimonialisation numérique _____	217
Figure 102 : L'objet patrimonial : une transformation en différents états intermédiaires _____	219
Figure 103 : Synthèse des éléments manipulés lors du processus de patrimonialisation numérique _____	219
Figure 104 : Ontologie temporelle décrivant l'objet étudié _____	220
Figure 105 : Modèle d'usage générique du processus de patrimonialisation _____	221
Figure 106 : Hypothèse d'un objet technique ancien à multi-niveaux selon des descriptions infrastructurelle, architecturale et temporelle _____	222

Figure 107 : Modèle d'usage générique de l'objet dans son caractère internaliste	225
Figure 108 : Transformation des vestiges archéologiques en objet technique	226
Figure 109 : Le concept des poupées russes	230
Figure 110 : Exemple de niveaux multidimensionnels d'objets techniques anciens	231
Figure 111 : Positionnement des classes objet technique ancien et typologie structurante	232
Figure 112 : Positionnement simplifié des classes objet technique ancien et typologie structurante	232
Figure 113 : Lien temporel entre l'architecture et l'infrastructure de la typologie structurante	233
Figure 114 : Les niveaux multidimensionnels de la typologie des objets techniques anciens	234
Figure 115 : La métaphore de la sémiotique au patrimoine industriel	235
Figure 116 : Les liens sources-contexte	237
Figure 117 : Les contextes auto-encapsulés sur les niveaux multi-dimensionnels de l'objet technique ancien	238
Figure 118 : Description des multi-contextes des objets complexes	240
Figure 119 : La complexité externaliste de l'objet technique dans une évolution temporelle	242
Figure 120 : PLC étendu fonction de la somme de Connaissances produite par les Phases de vie	246
Figure 121 : Processus interne de production de l'usage externaliste d'un objet technique ancien	247
Figure 122 : Modèle d'usage générique de l'objet dans son caractère externaliste	247
Figure 123 : La classe Homme dans son contexte pour l'usage d'objets techniques anciens	249
Figure 124 : La classe Homme en lien avec la classe Firme	250
Figure 125 : La classe homme dans la société	250
Figure 126 : Modèle d'usage générique de l'objet dans son usage par l'Homme	251
Figure 127 : Modèle d'usage idéalisé de l'objet technique ancien	255
Figure 128 : Le triptyque de l'objet technique ancien idéalisé contextualisé dans ses usages	256
Figure 129 : Les multi-échelles du schème selon des axes dimensionnel et temporel	258
Figure 130 : Le méta-modèle du Digital Heritage Reference Model	260
Figure 131 : La spirale patrimoniale	261
Figure 132 : La démarche de conception standard d'un objet industriel contemporain	266
Figure 133 : Patrimonialisation : le rétro-processus de conception contextualisé	267
Figure 134 : PLC étendu avec paramétrisation temporelle	269
Figure 135 : Plan d'implantation cadastral du Musée des Marais Salants et des Magasins à sel Bertrand, Batz-sur-Mer	272
Figure 136 : Cas d'étude de Batz-sur-Mer - Diagramme de classes intermédiaire du DHRM - De l'objectum à l'artefact : la sauvegarde d'un objet patrimonial	274
Figure 137 : La machine à laver le sel en 2007	275
Figure 138 : Relevé d'architecte – La laverie (vue de face)	275
Figure 139 : Nuage de points, vue de face-droite	276
Figure 140 : Relevés À main à visée mécanique	276
Figure 141 : Cas d'étude de Batz-sur-Mer - Diagramme de classes intermédiaire du DHRM - Etude mécanique internaliste via la modélisation 3D : vers un schème a priori	278
Figure 142 : Description des flux et des composants principaux de la machine de Batz-sur-Mer	279
Figure 143 : Maquette numérique, vue d'ensemble de la machine	279
Figure 144 : Photo, Moteur	280
Figure 145 : Photo, Arbre principal	280
Figure 146 : Photo, la pompe ensevelie	280
Figure 147 : Photo, Chaîne à godets	281
Figure 148 : Catalogue Burton Fils, Chaîne Ewart	281
Figure 149 : Photo, La trémie	282
Figure 150 : Maquette CAO, La trémie	282
Figure 151 : Maquette CAO, Vue arrière en coupe des 3 bacs	283
Figure 152 : Photo, brasseur à pales	283
Figure 153 : Maquette CAO, bac à laver n°2	283
Figure 154 : Photo, engrenages coniques transmettant le mouvement au brasseur	284
Figure 155 : Maquette CAO, Système de circulation de la saumure	285
Figure 156 : Maquette numérique, vue d'ensemble	285
Figure 157 : Photo, L'armoire dans la chaufferie	287
Figure 158 : Photo, L'établi dans la chaufferie	287
Figure 159 : Photo, Pale en fabrication sur l'établi	287
Figure 160 : Photo, Pale ayant été utilisée	287
Figure 161 : Photo, Pale non utilisée dans un tiroir de l'armoire	288
Figure 162 : Photo, Maillon Ewart dans un tiroir de l'armoire	288
Figure 163 : Photo, Palier non utilisé	288
Figure 164 : Photo, Palier et axe déformés	288
Figure 165 : Photo, La pompe supplémentaire	289
Figure 166 : Cas d'étude de Batz-sur-Mer - Diagramme de classes intermédiaire du DHRM - Le sel : histoire générale et usages	290
Figure 167 : Cas d'étude de Batz-sur-Mer - Diagramme de classes intermédiaire du DHRM - La production du sel : récolte et traitement selon sa provenance	295
Figure 168 : 1900 - Bâtiment de graduation de la saline de Salzbourg	298
Figure 169 : Schéma en coupe d'un gisement de sel exploité par génération de saumure	299

Figure 170 : Processus moderne à six effets d'évaporation de sel gemme _____	300
Figure 171 : 1848 - Tableau de composition des eaux de différentes mers _____	301
Figure 172 : Un marais salant au 16 ^{ème} siècle _____	303
Figure 173 : Le processus d'évaporation du sel et ses conséquences sur l'augmentation de sa concentration _____	303
Figure 174 : 1900 – Planning annuel des paludiers _____	305
Figure 175 : 1900 – Gravure d'un marais salant à Batz-sur-Mer _____	306
Figure 176 : Serra Salt Machinery, raffinage du sel _____	309
Figure 177 : Cas d'étude de Batz-sur-Mer – Diagramme de classes intermédiaire du DHRM - Étude externaliste : industrialisation et gestion du lavage du sel dans les magasins Bertrand à Batz-sur-Mer _____	310
Figure 178 : 20 ^{ème} siècle – charrette descendant la rue de la Gare à Batz-sur-Mer _____	312
Figure 179 : 2007 - Carte IGN d'implantation de l'entreprise Bertrand à Batz-sur-Mer avec la ligne du Paris-Orléans-St-Nazaire _____	313
Figure 180 : Plan d'implantation cadastral de la propriété Bertrand, Batz-sur-Mer _____	316
Figure 181 : Description des différentes pièces du bâtiment A, Magasins Bertrand, Batz-sur-Mer _	316
Figure 182 : 2007, photographie depuis la rue du Traict de la façade du bâtiment A _____	318
Figure 183 : Avant 1909, les magasins de la Croix de Paix _____	319
Figure 184 : Le flux de production dans les magasins Bertrand, Batz-sur-Mer _____	320
Figure 185 : Cas d'étude de Batz-sur-Mer - Diagramme de classes intermédiaire du DHRM - L'entreprise Bertrand de négoce de sels marins _____	321
Figure 186 : Evolution du nombre minimal de salariés de l'entreprise Bertrand de Batz-sur-Mer de 1898 à 1966 _____	324
Figure 187 : Cas d'étude de Batz-sur-Mer - Diagramme de classes intermédiaire du DHRM - Le sel en Bretagne : un contexte socio-économique changeant _____	325
Figure 188 : 20 ^{ème} siècle – Costumes d'enfants à Batz-sur-Mer _____	328
Figure 189 : Evolution du nombre de œillets en exploitation, 1840 à 2002, dans l'Ouest de la France _____	330
Figure 190 : 1905-1941 Evolution du nombre de laveries en activité à Batz sur Mer _____	331
Figure 191 : Arbre décisionnel pour le choix de la solution de numérisation 3D _____	336
Figure 192 : Vue partielle du DHRM pour la numérisation 3D d'objets techniques patrimoniaux _____	337
Figure 193 : Critères de validation de la technologie de numérisation 3D à utiliser pour l'intégralité de la machine à sel de Batz-sur-Mer _____	339
Figure 194 : Critères de validation de la technologie de numérisation 3D à utiliser pour les composants de détail de la machine à sel de Batz-sur-Mer _____	340
Figure 195 : Nuage de points, pale de vis sans fin _____	341
Figure 196 : Photo, Deux maillons à attache rapide Ewart _____	342
Figure 197 : Photo, Maillon à oreille : réel et nuage de points _____	342
Figure 198 : Suivi du flux de production du sel des magasins Bertrand à Batz-sur-Mer _____	346
Figure 199 : Maquette numérique de la presse à cylindre Voirin fonctionnant au Musée de l'Imprimerie de Nantes _____	357
Figure 200 : Presse Voirin, came réelle _____	358
Figure 201 : Presse Voirin, came scannée _____	358
Figure 202 : Presse Voirin, came CAO _____	358
Figure 203 : Méthodologie de modélisation en CAO 3D+t d'un objet patrimonial pour une utilisation dans un cadre pédagogique _____	359
Figure 204 : La Minerve, Maquette numérique _____	360
Figure 205 : La Minerve, Modèle filaire partiel _____	360
Figure 206 : La Minerve, Système de pince pour le maintien de la feuille _____	361
Figure 207 : La Minerve, Mécanisme des plateaux encreurs _____	361
Figure 208 : Canot à vapeur, vue de tribord coupé du plan de 1860 _____	365
Figure 209 : Canot à vapeur de 1861, Intégration des vues du plan d'ensemble dans l'environnement de CAO _____	369
Figure 210 : Canot à vapeur de 1861, Maquette virtuelle fonctionnelle CAO _____	370
Figure 211 : Canot à vapeur de 1861, détail de la chaudière du plan d'origine _____	371
Figure 212 : Canot à vapeur de 1861, maquette CAO de la chaudière _____	371
Figure 213 : Canot à vapeur de 1861, schéma de l'injecteur Giffard _____	373
Figure 214 : Canot à vapeur de 1861, détail du réchauffeur et du ballon d'alimentation _____	374
Figure 215 : Canot à vapeur de 1861, Maquette CAO de la transmission _____	375
Figure 216 : Le réseau de coopération des métiers d'une équipe inter-disciplinaire de rétro-conception patrimoniale _____	378
Figure 217 : Nouvelle vue macroscopique du DHRM par l'apport de la valorisation en pédagogie _	380
Figure 218 : SADT décomposé de notre problématique de recherche _____	393
Figure 219 : 1977 – La machine Piguet n°135 en fonctionnement _____	412

CONTRIBUTION A LA SAUVEGARDE DES OBJETS TECHNIQUES ANCIENS PAR L'ARCHEOLOGIE INDUSTRIELLE AVANCEE

Proposition d'un Modèle d'information de référence muséologique et d'une Méthode inter-disciplinaire pour la Capitalisation des connaissances du Patrimoine technique et industriel

Résumé

Pour optimiser sa création de valeur, l'entreprise adapte sans cesse son mode de fonctionnement et ses outils de production. Les machines considérées comme obsolètes car ne répondant plus à la demande sont arrêtées, remises voire même démantelées. Ainsi, certains sites industriels disparaissent et les hommes, catalyseurs des savoir-faire, les emportent avec eux. L'absence de protection de ce patrimoine technique et industriel pose aujourd'hui question car cette culture technique s'avère parfois transposable à des domaines d'applications connexes. Sauvegarder, analyser et comprendre ces objets du Patrimoine Passé peut permettre de les transformer en Capital Présent et devenir source d'innovation pour anticiper notre futur et aider les industriels à créer les objets de demain. Quant à leurs conservations et leurs vulgarisations dans les musées et les sites, le vieillissement intrinsèque de l'information technique nécessite d'implémenter une nouvelle muséologie pour ce 3^{ème} millénaire : la Techno-muséologie. La méthodologie développée consiste à renverser l'axe des temps de la conception : c'est le Rétro-processus de Conception Patrimoniale. L'Archéologie Industrielle Avancée permet la constitution du Dossier d'Oeuvre Patrimoniale Technique en capitalisant les connaissances du passé sous une forme numérique et en les repositionnant virtuellement en situation d'usage à des fins de muséographie et de valorisation. La complexité des objets induisant une multiplicité des compétences, le Processus Coopératif d'Ingénierie Patrimoniale requiert la collaboration de métiers qui, jusqu'alors, ne collaboraient pas ou peu. Dès lors, une nouvelle forme d'Equipe Inter-disciplinaire émerge pour laquelle un référentiel commun permet de faire cohabiter les différentes sémantiques. Ainsi, le Système d'Information proposé encapsule cette taxonomie des Hommes en considérant également les acteurs du passé. Le modèle définit l'Objet technique à caractère patrimonial dans ses Aspects Internalistes et Externalistes. Le Digital Heritage Reference Model ou Dossier d'Oeuvre Patrimonial Numérique de Référence, DHRM, peut alors être considéré comme un nouvel outil de travail muséologique.

Dans ces travaux de recherche, de nombreux cas d'études sont analysés et conceptualisés pour construire les ontologies validant ainsi l'applicabilité du DHRM.

- Mots-clés :**
- | | |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| ▪ Histoire des techniques | ▪ Numérisation 3D |
| ▪ Patrimoine technique et industriel | ▪ Reverse-engineering |
| ▪ Techno-muséologie | ▪ Ingénierie virtuelle |
| ▪ Muséographie | ▪ Processus de conception |
| ▪ Génie Industriel | ▪ Système d'information DHRM |
| ▪ Capitalisation des connaissances | ▪ Archéologie Industrielle Avancée |

CONTRIBUTION TO THE PRESERVATION OF OLD TECHNICAL OBJECTS THANKS TO ADVANCED INDUSTRIAL ARCHAEOLOGY.

Proposition of a Reference information system for museology and an Inter-disciplinary method for Capitalizing knowledge stemming from the industrial and technical heritage.

Abstract

For optimizing its added value creation, enterprise adjusts continuously its operating modes and its production tools. Machines considered obsolescent as soon as they don't meet the demand, are consequently stopped, stored and very often dismantled. Consequently, industrial sites disappear and the workers, creators of knowledge, are leaving the industrial world with their know-how. The lack of protection of this kind of industrial and technical heritage is under scrutiny today as this technical culture can sometimes be transposable to other similar but present application domains. Safe keeping, analyzing and understanding these objects belonging to a Past Heritage can convert them into a Present Capital; sometimes, they can even become an innovation source for preparing our future and assisting industrials to create the tomorrow objects. In addition, concerning their conservation and their popularization in museums and sites, the aging of technical information requires to implement a new kind of museology for this 3rd millennium : the Techno-museology.

The developed methodology consists in overturning the design time axis: it is the Reverse-process of Heritage Design. Advanced Industrial Archaeology, allows the elaboration of the Technical Heritage File by capitalizing knowledge from the past into a digital media and a virtual simulating state for museography and valorization. As the objects complexity requires a multiplicity of competences, the Heritage Cooperative Engineering Process requires collaborations of experts who usually, do not collaborate. Therefore, a new kind of Inter-disciplinary Team is appearing which needs a common base for allowing different semantics living together. Consequently, the Information System proposes to encapsulate this taxonomy of the Men, also taking into account the actors of the past. The model defines the Heritage Technical Object in its Internal and External Aspects. The Digital Heritage Reference Model, DHRM, can then be considered as a new tool for museology.

During these researches, numerous technical studies are analyzed and conceptualized so as to build the ontology's and consequently validate the applicability of DHRM.

- Keywords :**
- | | |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| ▪ Technical history | ▪ 3D digitalization |
| ▪ Industrial and technical heritage | ▪ Reverse-engineering |
| ▪ Techno-museology | ▪ Virtual engineering |
| ▪ Museography | ▪ Design process |
| ▪ Industrial Engineering | ▪ Information system DHRM |
| ▪ Knowledge capitalization | ▪ Advanced Industrial Archaeology |