Faculté des Sciences et Techniques
U.F.R. Sciences et Techniques Mathématiques, Informatique et Automatique
École Doctorale IAEM Lorraine
Département de Formation Doctorale en Informatique

THÈSE

pour l'obtention du titre de
Docteur de l'Université Henri Poincaré - Nancy 1
Mention Modélisation et Simulation des Espaces Bâtis

par

Élise Meyer

Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie - CRAI -
UMR CNRS MAP n.694, ENSA de Nancy
Photogrammétrie Architecturale et GEomatique - PAGE -
UMR CNRS MAP n.694, INSA de Strasbourg

Acquisition 3D, Documentation et Restitution en Archéologie

Proposition d'un modèle de Système d'Information dédié au patrimoine

Soutenue le 31 octobre 2007 devant le jury composé de

M. :	Jean-Marie	Pierrel	Professeur des Universités	Président
M. :	Pierre	Grussenmeyer	Professeur des Universités	Directeur
M. :	Jean-Pierre	Perrin	Professeur des Écoles d'Architecture	Codirecteur
MM. :	Bernard	Gauthiez	Professeur des Universités	Rapporteurs
	Christian	Jacquemin	Professeur des Universités	
MM. :	Frédéric	Colin	Professeur des Universités	Examinateurs
	Jean-Marie	Reynouard	Professeur des Universités	

Remerciements

A *Pierre Grussenmeyer* et à *Jean-Pierre Perrin*, qui ont dirigé cette thèse, pour leur accueil et pour avoir pensé à moi lorsque l'opportunité de réaliser cette thèse s'est présentée. Merci à tous deux pour leur soutien, leur attention et leurs conseils tout au long de ce travail. Merci à Pierre Grussenmeyer pour les moyens qu'il a mis à ma disposition pour le bon déroulement de ces trois années et pour m'avoir permis de participer à de nombreux congrès pour valoriser mon travail. Merci à Jean-Pierre Perrin pour les contacts ayant rendu possible le développement de mon étude sur des sites archéologiques très riches.

A *Bernard Gauthiez* et à *Christian Jacquemin* pour avoir bien voulu accepter la charge de rapporteur.

A *Frédéric Colin*, à *Jean-Marie Pierrel*, à *Jean-Marie Reynouard*, à *Jean-Georges Sieffert* pour avoir bien voulu juger ce travail.

A *Pierre Drap*, pour m'avoir permis de bénéficier des travaux effectués dans le cadre de ses projets, qui sont les fondements informatiques de mon étude.

A *Anne Durand*, pour son aide technique dans mes développements et pour sa disponibilité à distance.

A *John Zimmer*, responsable du Service des Sites et Monuments Nationaux du Luxembourg au moment de la phase d'expérimentation de mon travail, pour l'attention qu'il a portée à mon projet et pour m'avoir permis d'exploiter les données issues de ses travaux sur les sites de Vianden et d'Echternach.

A *Gilles Halin* pour ses conseils informatiques avisés.

A *Samuel*, source d'attentions et de bonne ambiance au sein du laboratoire, et à *Bernard*, source de questionnements.

A tous les collègues et étudiants du laboratoire : *Sophie*, *Fayez*, *Majd*, *Hakim*, *Emmanuel*, *Cyril* et enfin *Céline*, pour sa précieuse contribution pour l'évolution future de ce travail.

A toute l'équipe enseignante de l'INSA de Strasbourg pour leur intérêt et leur sympathie, en particulier à *Tania* pour sa confiance.

A tous ceux qui ont rendu cette thèse possible. Je pense particulièrement à ma famille qui m'a encouragée et soutenue tout au long de ces longues études. Un très grand merci notamment à ma relectrice la plus attentive, qui a contribué par ses conseils et ses remarques à la réalisation de ce document.

A *Xavier* pour sa présence et son soutien jour après jour.

Résumé

Acquisition 3D, documentation et restitution en archéologie : proposition d'un modèle de Système d'Information dédié au patrimoine

L'activité de documentation du patrimoine archéologique évolue avec le développement des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC). Traditionnellement associée à de l'archivage, la documentation d'un site archéologique peut aujourd'hui également être synonyme de publication, puisqu'elle peut être diffusée en ligne aussi bien à d'autres professionnels qu'au grand public. Cette thèse propose un modèle de Système d'Information dédié à la documentation sur Internet de sites patrimoniaux. Il permet de conserver, gérer et représenter des documents traditionnels, des données issues de relevés bi- et tridimensionnels, mais aussi des résultats de travaux de restitution et d'imagerie.
Dans un premier temps, l'étude établit un état de l'art qui permet d'appréhender les moyens actuels et les besoins des professionnels du patrimoine en termes de conservation, visualisation et publication de leurs données. Puis, notre approche considère ces préoccupations pour définir les fonctionnalités du Système d'Information que nous proposons. Sur la base d'exemples issus du patrimoine luxembourgeois (le Château de Vianden et la Villa d'Echternach), nous décrivons la manière dont nous conservons les données et les métadonnées associées, ainsi que les outils développés pour la représentation de ces informations. Nous présentons aussi nos principes de gestion des données, basés sur les liaisons spatio-temporelles qui peuvent exister entre les différents documents. Ces liaisons nous permettent de proposer l'utilisation de graphiques bidimensionnels ou de modèles tridimensionnels comme des supports privilégiés de navigation et d'interaction avec tous les autres documents conservés. Une modélisation globale du Système d'Information, pouvant servir de métamodèle de système de documentation en ligne, nous permet finalement d'ouvrir notre champ d'application à d'autres domaines comme l'architecture ou le génie civil.

Mots-clés : Système d'Information, documentation, gestion de données, restitution, Internet, archéologie

Abstract

3D acquisition, documentation and restitution in archaeology : proposal of a model of Information System dedicated to Cultural Heritage

The documentation of archaeological heritage is an activity that evolves with the development of the New Information and Communication Technologies (NICT). Traditionally associated with recording, the documentation of an archeological site is also today synonym of publication, because it can be disseminated on-line both to other professionals and to the general public. This PhD thesis proposes a model of Information System dedicated to the documentation on Internet of patrimonial sites. It allows to record, to manage and to represent traditional documents, data coming from bi-and three-dimensional surveys, but also results of restitution and imagery works.
At first, the study establishes a state of the art that allows knowing the current means and the needs of the heritage professionals in terms of conservation, visualization and publication of their data. Then, our approach considers these preoccupations to define the features of the Information System that we propose. On the basis of examples stemming from the Luxemburg heritage (the Castle of Vianden and the Villa of Echternach), we describe the way we keep the data and the associated metadata, as well as the tools developed for the representation of this information. We also present our principles of data management, based on the spatiotemporal connections that may exist between the various documents. These connections allow us to propose the use of bi-dimensional graphics or three-dimensional models as privileged supports of navigation and interaction with all other preserved documents. A global modeling of the Information System, being able to serve as a metamodel of system of on-line documentation, allows us finally to open our scope to other domains like architecture or civil engineering.

Keywords : Information System, documentation, data management, restitution, Internet, archaeology

Table des matières

Remerciements **iii**

Résumé **v**

Abstract **vii**

Table des matières **ix**

Introduction **1**
Contexte et objectifs de la thèse 1
Organisation du mémoire 3

I Gestion et représentation informatique de ressources archéologiques **5**

1 Bases de données et Systèmes d'Information Géographique **7**
1.1 Bases de données pour l'archéologie 7
1.1.1 Définitions préalables 7
1.1.2 Histoire et recommandations pour l'archéologie 11
1.1.3 Exemples de projets d'archivage 21
1.2 Systèmes d'Information Géographique en archéologie 29
1.2.1 Définitions préalables 29
1.2.2 Utilisations en archéologie et recommandations 37
1.2.3 Exemples de SIG réalisés pour l'archéologie 44
1.2.3.1 SIG à l'échelle du territoire 44
1.2.3.2 SIG à l'échelle d'un site 49
1.2.4 Généralisation : Systèmes d'Information et 3D 52

2 Visualisation et documentation des données archéologiques **59**
2.1 Outils de visualisation utilisés en archéologie 59
2.1.1 Généralités 59
2.1.2 Recommandations pour l'utilisation de la Réalité Virtuelle 62
2.1.3 Exemples de projets de visualisations et de reconstitutions 67

2.1.3.1 Représentation 67
2.1.3.2 Reconstitution 73
2.2 Publication ou documentation ? 79
2.2.1 De la publication traditionnelle à la publication électronique . . . 79
2.2.2 De l'archive à la documentation numérique 82
2.2.3 Difficultés et recommandations pour de nouvelles formes de documentation 84

3 Gestion et représentation de données archéologiques : projets globaux et bilan 91
3.1 Quelques projets représentatifs des recherches actuelles 91
3.1.1 3D Murale 91
3.1.2 3D Knowledge 3DK : Acquisition, Représentation et Analyse . . 95
3.1.3 SCULPTEUR 97
3.1.4 Nabonidus 99
3.1.5 Silchester : un VRE pour l'archéologie 100
3.2 Bilan de l'Etat de l'Art 106

II Présentation de l'approche 109

4 Vers un Système d'Information pour la documentation patrimoniale 111
4.1 Problématique 111
4.2 Structure de l'approche 112

5 Environnement de développement et échelle de travail 115
5.1 Utilisation de logiciels libres pour une implémentation sur Internet . . . 115
5.2 Choix de l'échelle de travail 119

6 Fondements informatiques 125
6.1 Contexte 125
6.2 Développements initiaux 126
6.3 Evolution vers des formats standards 128
6.4 Conclusion 131

III Proposition d'un modèle de Système d'Information dédié à la documentation de sites patrimoniaux 133

7 Principes de conservation des données 135
7.1 Types de données 135
7.2 Formalisation en XML 139
7.2.1 Qu'est-ce que XML ? 139
7.2.2 Pourquoi XML ? 142
7.2.3 Application 145

7.3 Saisie et visualisation 149
7.3.1 Double enregistrement en XML et dans MySQL 149
7.3.2 Intégration dans le SI 152
7.3.3 Affichage 159
7.4 Révision 161

8 Outils de gestion des données 165
8.1 Liaisons entre les données 165
8.2 Traitements thématiques 173
8.2.1 Listes 173
8.2.2 Recherches 177
8.2.2.1 Recherche par type de donnée 177
8.2.2.2 Recherche par mots-clés 178
8.2.2.3 Recherche par images 182
8.3 Traitements interactifs 184
8.3.1 Représentations 2D 185
8.3.2 Modèles 3D 192

9 Moyens de représentation des données 205
9.1 Corpus des métadonnées 205
9.2 Vues des données 206
9.3 Représentations originales 208
9.3.1 Représentations bidimensionnelles 210
9.3.2 Représentations tridimensionnelles 212

10 Modélisation du Système d'Information 217
10.1 Concepts de l'approche objet 217
10.2 UML 219
10.3 Application au SI 222

Conclusion générale 245
Bilan de la recherche 245
Limites de notre travail 248
Perspectives de développement et d'utilisation 249

Glossaire 253

Bibliographie 257

Table des figures 271

Liste des tableaux 277

Annexes **279**
Annexe A - Le Château de Vianden 279
Annexe B - La Villa gallo-romaine d'Echternach 287
Annexe C - Intégralité des données et des métadonnées 294
Annexe D - Automatisation de la création de modèles 3D interactifs 296
Annexe E - Liste des publications 305

Introduction

Contexte et objectifs de la thèse

Le présent mémoire décrit une recherche menée dans le domaine de la conservation du patrimoine. Nous entendons par ce terme l'activité qui vise à identifier, à protéger et à faire connaître les éléments estimés de l'environnement bâti, soit les édifices, les structures et les sites créés tout au long de l'évolution d'un pays ou d'une région.
Cette thèse porte particulièrement sur la conservation du patrimoine archéologique au sens documentaire du terme. En effet, la documentation a une place fondamentale dans la conservation en archéologie. Elle consiste à créer les archives du site archéologique étudié, en recensant tous les événements, les structures significatives et les contextes. Regroupant aussi bien les documents réalisés au moment de la fouille du site (relevés topographiques, dessins d'artéfacts, rapports de fouilles) que les textes anciens ou les documents numériques qu'il est désormais possible de produire (modèles tridimensionnels, images virtuelles), la documentation d'un site archéologique est de plus en plus vaste et hétérogène.

Sur le terrain, les archéologues utilisent aujourd'hui des bases de données pour enregistrer et décrire les artéfacts récoltés, ils prennent des photographies numériques et font des relevés par GPS ou tachéométrie électronique. Mais avant le développement de ces technologies, des milliers de sites archéologiques ont été fouillés pendant des décennies et la seule manière de conserver des traces des travaux effectués était de produire des documents sous forme papier. Ces documents sont très précieux et sont aujourd'hui massivement numérisés. Malheureusement, cette numérisation a souvent pour but uniquement la conservation des documents, et leurs équivalents numériques sont enregistrés dans des bases de données reproduisant les systèmes de classement des bibliothèques d'archives. De plus, les organismes de conservation du patrimoine ou les centres d'archéologie utilisent souvent des systèmes de bases de données commerciaux, ce qui fait dépendre la pérennité des documents de la maintenance du format propriétaire qu'ils ont choisi. Par ailleurs, cela favorise la multiplicité des formats d'enregistrement et empêche tout échange ou comparaisons entre ces données numériques.
Ainsi, toute exploitation d'un site archéologique, que celle-ci soit passée, présente ou

en cours depuis de nombreuses années, produit des quantités de données de natures diverses. Qu'elles soient numériques à l'origine ou qu'elles aient été numérisées par la suite, il est nécessaire d'enregistrer ces données dans un système unique et de les lier pour faciliter leur consultation, leur analyse et leur croisement. De plus, pour favoriser les échanges entres organismes, il est préférable de choisir de les conserver dans un format informatique largement adopté ou standardisé, idéalement non propriétaire. Nous pensons que c'est à ces conditions qu'il est possible de créer une documentation numérique complète, exploitable et "communicable" d'un site archéologique, participant pleinement à sa conservation.

Dans ce mémoire, nous soutenons la thèse qu'un Système d'Information fonctionnant de manière libre sur Internet et permettant la saisie, la gestion et la représentation de tous les types de données induits par l'exploitation d'un site archéologique, peut assister les archéologues pour la documentation et le partage de leurs travaux.

Pour étayer cette thèse, nous nous basons sur les besoins, en termes de moyens informatiques, exprimés par les archéologues qui souhaitent réaliser une documentation numérique complète de leurs données. Pour dégager ces attentes, nous recensons les outils informatiques qu'ils utilisent actuellement pour gérer, visualiser et publier leurs travaux. En effet, du point de vue d'un professionnel du relevé et non de l'archéologie, cette étude des habitudes des archéologues est nécessaire pour pouvoir proposer un système en adéquation avec leurs besoins.
Parallèlement à ce recensement, nous indiquons les recommandations des organismes de standardisation ou de conservation à grande échelle pour une préservation plus pérenne des données et pour rendre les échanges possibles. Nous étudions aussi la pertinence de conception d'un système libre sur Internet pour le partage et la communication des recherches en archéologie.

L'objectif du Système d'Information est de permettre l'intégration dans un système unique de tous les types de données que l'archéologue produit au cours de la fouille, mais aussi des données qu'il peut faire réaliser ultérieurement pour valoriser son site. Ces données sont donc fortement hétérogènes, ce qui implique leur enregistrement dans des bases de données évolutives et adaptables aux préoccupations spécifiques de chaque archéologue. De plus, pour que les jeux de données conservés soient complets et documentés, il est nécessaire de permettre l'enregistrement des données primaires et secondaires, ainsi que des métadonnées s'y rapportant.

Une fois les données conservées, pour pouvoir les gérer efficacement, il est nécessaire d'établir des liaisons entre elles. Les principaux critères permettant de relier les données archéologiques sont spatiaux et temporels. En effet, toute structure ou tout objet peut être localisé géographiquement et attribué à une période particulière de l'histoire du site. Un apport important de cette étude dans ce cadre est l'exploitation des données bi- et tridimensionnelles réalisées pour documenter le site sous forme de représentations interactives permettant un accès spatial et temporel aux autres données intégrées dans

le Système d'Information. Par ailleurs, il est également intéressant de pouvoir lier les différents types de données entre eux (un objet et une photographie le représentant, un plan et le modèle en 3D de la même structure) pour faciliter l'exploitation et le traitement des informations.

Outil de saisie et de gestion des données, un Système d'Information se doit de permettre également la représentation des données qui y sont intégrées. Cette représentation passe par la possibilité d'accéder facilement aux données restituées à partir des données documentaires ou des relevés, comme les images virtuelles ou les modèles 3D proposant des reconstitutions du site. Par ailleurs, il est nécessaire de permettre à l'utilisateur de se créer ses propres représentations des données. Par la création de vues thématiques paramétrables ou par la génération "à la volée" de graphiques bidimensionnels ou de modèles tridimensionnels à partir des données originales, l'utilisateur peut interagir avec les données de manière complémentaire aux représentations interactives permettant un accès spatio-temporel aux informations évoquées précédemment.

Enfin, pour ouvrir le champ d'application à d'autres domaines que l'archéologie, une modélisation globale de l'architecture du Système d'Information est requise pour souligner le potentiel de l'outil pour la conservation documentaire du patrimoine au sens large. Ce métamodèle de Système d'Information dédié à la documentation permettra de mettre en évidence le fait que le système est utilisable pour tout type de sites patrimoniaux et pour le partage de la documentation à la fois aux professionnels et au grand public.

Organisation du mémoire

Nous développerons notre thèse en trois grandes parties : d'abord un Etat de l'Art des outils et besoins en gestion et représentation de ressources archéologiques, puis une présentation détaillée de l'approche et des fondements informatiques, et enfin la proposition d'un modèle de Système d'Information dédié à la documentation de sites patrimoniaux.

Partie 1 - Gestion et représentation de ressources archéologiques

- Dans le premier chapitre, nous dresserons un bilan de l'utilisation des bases de données et des Systèmes d'Information Géographique en archéologie. Nous donnerons des définitions générales des ces technologies, puis nous indiquerons des recommandations pour adapter leur utilisation au domaine spécifique qu'est l'archéologie. Ces recommandations nous permettrons d'établir un cahier des charges pour la conception de notre système.
- Le deuxième chapitre a la même structure que le premier, mais décrit l'utilisa-

tion et les besoins en termes d'outils de visualisation. Nous poserons également la question de la différence entre la publication et la documentation des données archéologiques, de sorte à bien définir ce que nous entendons lorsque nous employons le terme documentation.
- Nous conclurons cette partie bibliographique dans le chapitre 3 par une présentation de plusieurs exemples utilisant toutes les technologies évoquées précédemment, particulièrement des systèmes fonctionnant sur Internet. Ceci nous permettra de situer notre Système d'Information par rapport aux travaux effectués actuellement par d'autres entreprises ou laboratoires de recherche. Nous finirons par un bilan de l'Etat de l'Art sous forme d'un tableau récapitulant les intérêts d'utiliser les outils informatiques présentés, et les besoins auxquels il s'agit de répondre dans un nouveau système.

Partie 2 - Présentation de l'approche

- Le chapitre 4 définit la problématique générale qui anime ce travail de recherche pour la proposition d'un modèle de Système d'Information dédié au patrimoine. Nous y détaillerons également la structure de notre approche.
- Dans le chapitre 5, nous décrirons l'environnement dans lequel nous avons choisi de développer notre système. Nous indiquerons également à quelle échelle nous travaillerons et nous présenterons nos terrains d'expérimentation.
- Nous expliquerons ensuite, dans le chapitre 6, les fondements informatiques sur la base desquels nous avons réalisé notre Système d'Information.

Partie 3 - Proposition d'un modèle de Système d'Information dédié au patrimoine

- Le premier aspect du Système d'Information est la conservation des données. Ainsi, nous proposerons dans le chapitre 7 les principes mis en œuvre pour la saisie, la visualisation et la révision de tous les types de données hétérogènes provenant de nos terrains d'expérimentation.
- Le deuxième aspect est la gestion des données. Nous présenterons les outils que nous avons développés pour effectuer cette gestion dans le chapitre 8. Nous expliquerons comment les données sont liées, et les traitements thématiques et interactifs développés.
- Le troisième et dernier aspect est la représentation des données. Nous détaillerons dans le chapitre 9 les moyens mis à la disposition de l'utilisateur pour la création de représentations originales des données, notamment bi- et tridimensionnelles.
- Enfin, nous proposerons dans le chapitre 10 une modélisation globale de l'architecture du Système d'Information développé. Elle résulte en un métamodèle de Système d'Information permettant de montrer l'universalité du système et faisant entrevoir la possibilité d'implémenter un système équivalent, éventuellement avec des technologies différentes, mais poursuivant les mêmes buts pour répondre au mieux aux besoins des professionnels du patrimoine au sens large.

Première partie

Gestion et représentation informatique de ressources archéologiques

Chapitre 1

Bases de données et Systèmes d'Information Géographique

Dans ce premier chapitre, nous mettrons en lumière l'utilisation des bases de données et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans le domaine de l'archéologie. Dans chaque section, nous donnerons d'abord une définition générale des notions abordées, puis nous nous intéresserons plus particulièrement à la manière dont ces systèmes sont perçus et utilisés en archéologie.

1.1 Bases de données pour l'archéologie

1.1.1 Définitions préalables

La notion de base de données est souvent identifiée à la notion de banque de données. Une banque de données en informatique est un « ensemble de données relatives à un domaine défini de connaissances et organisé pour être offert aux consultations d'utilisateurs »[1]. Une base de données quant à elle peut être définie comme un « ensemble de données organisé en vue de son utilisation par des programmes d'ordinateurs, associés éventuellement à toute information relative à leur utilisation »[1]. La notion de base de données est donc centrée sur l'ordinateur, alors que la banque de données concerne plus l'utilisateur.
Notre propos dans ce mémoire est proche de la notion de banque de données, dans le sens de la mise à disposition de connaissances à des utilisateurs. Mais comme nous nous

[1] d'après : *Enrichissement du vocabulaire de l'Informatique*. Ministère de l'industrie et de la recherche. Arrêté du 22 décembre 1983.

attachons plus à la création informatique d'une banque de données et à son exploitation par des systèmes informatiques, dans la suite nous utiliserons indifféremment le terme base de données.

Une base de données est donc un ensemble structuré et organisé permettant le stockage de grandes quantités d'informations afin d'en faciliter l'exploitation (ajout, mise à jour, recherche de données). La création d'une base de données équivaut à la modélisation du monde réel selon la perception d'un individu, le terme modélisation étant ici entendu comme la description logique des objets et des liens qui régissent leurs rapports [Fargette, 1985]. L'idée essentielle lorsque l'on crée une base de données est d'éviter la duplication de fichier et la redondance.
Une base de données a une structure logique et une structure physique. La structure logique globale décrit les objets et les liens entre eux, indépendamment de leur utilisation. La structure physique quant à elle est décrite par différentes entités physiques (voir Figure 1.1) :

- Le champ, qui peut être défini comme plus petite donnée enregistrée manipulable ou comme un tout insécable pour lequel le système ne peut pas connaître les parties.
- L'enregistrement, qui est un ensemble de champs. C'est la plus petite quantité d'information lue ou écrite par le système en un accès.
- Le fichier, qui est un ensemble d'enregistrements. C'est la structure du fichier qui permet au système d'accéder à des enregistrements.
- La base de données, qui est un ensemble de fichiers.

La matérialisation de chacune de ces entités est appelée occurrence : occurrence de champ (information élémentaire), occurrence d'enregistrement (information manipulable), occurrence de fichier et de base de données.

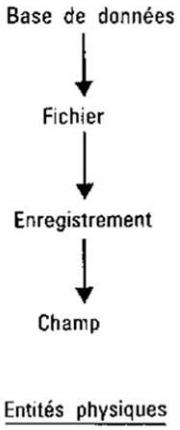


FIG. 1.1 – Structure physique des données [Fargette, 1985]

La gestion et l'accès à une base de données sont assurés par un ensemble de programmes qui constituent un Système de Gestion de Base de Données (SGBD). Un SGBD permet l'ajout et la modification de données grâce à un Langage de Description de Données (LDD) et à un Langage de Manipulation de Données (LMD). Il permet aussi la recherche de données dans la base de données, ce qui est un point crucial pour l'exploitation de celle-ci. L'interrogation d'une base pour récupérer une certaine partie des données est une requête.
Les objectifs principaux d'un SGBD d'après [Fargette, 1985] sont :

- la modélisation des données (séparation de la structure physique et logique, maîtrise de la redondance)
- la manipulation des données (l'étendue des requêtes doit être quasi-illimitée)
- les performances (le temps de réponse doit être optimum c'est-à-dire inférieur à trente secondes)
- le partage des données (des contraintes d'intégrité et d'autorisation d'accès doivent être définies pour assurer l'intégrité et la protection des données)

La création d'un SGBD pour exploiter des bases de données est imposée par la pluralité des informations qui rend nécessaire une certaine organisation pour obtenir, par traitement approprié, d'autres informations.

Il existe de nombreuses structures de bases de données : hiérarchiques, réseaux, relationnelles, orientées objet, semi-structurées... La plus répandue, dans le domaine de l'information géographique notamment, est la structure relationnelle (Figure 1.2). Nous allons ici en détailler quelques aspects, car la plupart des systèmes que nous avons rencontrés dans le domaine archéologique utilisent ce type de base de données.

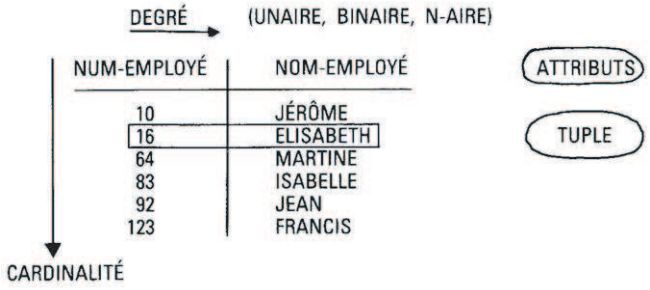


FIG. 1.2 – Structure d'une relation [Fargette, 1985]

Le principe d'une base de données relationnelle, énoncé dès 1970 [Codd, 1970], est de stocker des données hétérogènes dans des tables et de permettre l'établissement de relations entre elles. Un premier prototype de Système de Gestion de Bases de Données Relationnelles (SGBDR) a été construit dans les laboratoires d'IBM dans les années 80. En 1987, un langage de requête normalisé appelé SQL (*Structured Query Language*) est standardisé spécifiquement pour la gestion de bases de données relationnelles. La syntaxe du SQL est très simple, car elle repose sur la syntaxe de la langue anglaise.

Ce langage contient notamment un LDD, un LMD qui est la partie la plus courante et la plus visible de SQL, un langage de contrôle de données (LCD) et des opérateurs standards (MIN, MAX, BETWEEN, IS NULL, etc.).
Pour concevoir efficacement une base de données relationnelle, il est nécessaire de faire preuve d'abstraction. Dans le contexte des systèmes de gestion de données, il s'agit d'abstraire une structure représentant le contenu informatif du système, c'est-à-dire les entités réelles et les relations qui existent entre elles, qui peuvent éventuellement être représentées par des structures de données particulières ou des processus. Ce principe de représentation de la réalité est souvent appelé un modèle conceptuel [Burnard, 1991]. La définition du Modèle Conceptuel de Données (MCD) des entités que l'on souhaite gérer est une étape très importante dans le processus de conception de la base de données.

C'est ce que l'on appelle communément l'analyse conceptuelle, et c'est un des travaux les plus importants lors de la conception d'une base de données comme le disait déjà J. F. Sowa en 1984 :

> « *Conceptual analysis is the work of philosophers, lawyers, lexicographers, systems analysts and database administrators.* »[2] [Sowa, 1984]

La réalisation d'une analyse fonctionnelle pour la création d'un modèle entités/relations est relativement simple et largement appliquée. Cette approche requiert de modéliser les données en terme d'entités ayant des attributs et des relations entre elles. Les principaux avantages sont que la distinction entre attributs et entités simplifie le processus de création de la base de données, et que l'utilisation des relations pour modéliser les informations sémantiques permet d'étendre les champs d'application. Un modèle conceptuel figurant une interprétation, il est bien sûr nécessaire d'établir dès le départ le cadre dans lequel il va être utilisé. Dans le domaine qui nous intéresse, il sera donc indispensable de travailler avec l'expert (archéologue) pour définir le modèle conceptuel des données qu'il souhaite traiter. Le modèle peut alors être vu comme un outil aidant à comprendre comment une collection de données peut être interprétée et décomposée, dans le but de l'analyser et de pouvoir y faire des recherches.
D'un point de vue pratique, le MCD est conçu grâce au SGBDR. Dans une base de données relationnelle, les données sont organisées en tables, chacune consistant en un nombre indéterminé de lignes et de colonnes. Chaque colonne contient une donnée simple et indécomposable (champ), sachant que la valeur d'une (au moins) de ces colonnes doit permettre d'identifier la ligne dans laquelle elle apparaît. On appelle alors cette colonne la clef primaire de la table. Les tables et les colonnes sont donc très similaires aux entités et aux attributs du modèle conceptuel, ce qui permet une traduction immédiate du MCD théorique en base de données relationnelle par l'intermédiaire du SGBDR. Les relations modélisées dans le MCD sont quant à elles représentées par des liens (ou jointures) entre les tables. Elles ont deux caractéristiques principales : leur degré qui définit le nombre d'entités (tables) impliquées, et leur cardinalité qui donne le nombre d'occurrences de l'entité qui participent à la relation. La relation se base généralement

[2] L'analyse conceptuelle est le travail des philosophes, des avocats, des lexicographes, des analystes de systèmes et des administrateurs de bases de données. (Traduction libre)

sur les clefs des tables à joindre.

Ces définitions théoriques permettent d'entrevoir dès à présent l'intérêt de créer des bases de données et d'utiliser des SGBD dans le domaine archéologique. Plus particulièrement, une analyse conceptuelle minutieuse, réalisée en accord avec le contexte des données, va permettre de créer un modèle conceptuel fidèle des informations à traiter, et de concevoir la base de données relationnelle à partir de ce MCD . En outre, le choix de réaliser une base de données de type relationnelle pour des informations archéologiques trouve sa logique dans le fait qu'elle permet par nature la gestion de données très hétérogènes, caractéristique très significative des données provenant de l'archéologie.

1.1.2 Histoire et recommandations pour l'archéologie

Les bases de données ont une longue histoire en archéologie. Dès le milieu des années 60, des chercheurs comme R. G. Chenchall [Chenhall, 1967] reconnaissaient déjà leur potentiel pour réaliser des collections automatisées et des catalogues. Pourtant, leur utilisation n'est devenue naturelle et omniprésente qu'au début des années 80, quand les micro-ordinateurs ont permis de rendre l'informatique accessible à tous et quand les systèmes de gestion de données sont devenus plus accessibles. La technologie des bases de données fournit des méthodes simples et efficaces pour enregistrer et accéder à des grandes quantités de données. D'après Josep Puyol-Gruart [Puyol-Gruart, 1999], la valeur de ces données dépend de la possibilité d'en extraire des informations pertinentes (une information étant l'addition de données et d'éléments sémantiques), utiles pour la prise de décision et la compréhension de la source de la donnée. L'enregistrement de données dans une base de données doit donc être fait de telle sorte que les données permettent de dégager des informations.
La difficulté principale, lorsqu'il s'agit de créer des bases de données pour des objets issus de l'archéologie, est que les archéologues sont prompts à dire que leurs données ne ressemblent à aucune autre. Dans une base de données archéologiques, chaque objet a un ensemble d'attributs (type de matériel, couleur, chronologie...) qui sont enregistrés de telle sorte qu'on puisse les retrouver par des requêtes simples ou combinées. La structure des données et de leurs attributs dans la base de données dépend donc des besoins des archéologues de terrain au moment où la base est créée. Ainsi pendant très longtemps, chaque système de gestion de données archéologiques a été conçu spécifiquement pour la situation en question. Il n'est donc pas surprenant qu'il n'y ait pas d'acceptation universelle d'un type de SGBD pour gérer des données archéologiques, ce qui d'après Jonathan Moffett est peut-être symptomatique d'un malaise plus profond en archéologie : le manque de standards dans les pratiques de fouilles et particulièrement dans les systèmes d'enregistrement des données [Ross et al., 1991]. Cette hypothèse est datée de 16 ans déjà, mais il est toujours possible de la formuler. En effet, l'incompatibilité des formats d'enregistrement des données est encore plus réelle aujourd'hui avec, par exemple, la multiplication des techniques de relevé (tachéométrie, photogrammétrie,

lasergrammétrie...) et des programmes informatiques pour le traitement. Le problème de la création de bases de données archéologiques d'un type défini pour tous (ou au minimum la formulation de normes) n'a pas encore trouvé de solution acceptée par tous, même si de nombreux groupes de travail s'y consacrent comme nous le verrons un peu plus loin.
Pourtant, René Ginouvès proposait déjà en 1971 la création de banques de données pour l'ensemble de la discipline archéologique [Ginouvès, 1971], ce qui semblait à l'époque très utopique et l'est probablement encore aujourd'hui puisque ce problème existe toujours. En 1990, il se posait la question suivante :

> « La multiplication des banques de données construites à l'échelle du chercheur ou du petit groupe favorise-t-elle la construction de systèmes généraux d'analyse, la transformation de nos mœurs documentaires, et en définitive l'efficacité de la recherche ? » [Ginouvès, 1990]

Dans sa recherche de solutions, il a alors mis en évidence [Guimier-Sorbets, 1990] les mêmes difficultés que Moffett, à savoir la nature des données, la forme de leur analyse et les contraintes des logiciels qui les exploitent. Dans tous les cas, il a souligné que s'il doit y avoir des liens entre différentes banques de données, cette préoccupation doit avoir été présente dès la conception de celles-ci (à l'origine du travail). Il s'agit d'avoir la volonté dès le départ de réaliser une base de données qui soit compatible avec une autre pour permettre un enrichissement des données par confrontations et échanges.

Pour aider les archéologues et leurs équipes à créer des jeux de données numériques les plus standardisés possibles, un certain nombre d'organismes rédigent et maintiennent régulièrement ce que l'on pourrait appeler des recommandations ou "guides de bonnes pratiques" pour reprendre les termes d'un organisme anglais qui est particulièrement actif dans ce domaine : l'*Archaeology Data Service* ADS (Université de York) qui travaille avec ou pour l'*English Heritage* et la *Royal Commission on the Historic Monuments of England*. Ce service propose un certain nombre de publications disponibles en ligne[3] parmi lesquelles des documents intitulés :

- Séries des guides de bonnes pratiques (*Guides to Good Practice Series*)
- Stratégies pour données numériques (*Strategies for Digital Data*)
- Gérer des collections numériques (*Managing Digital Collections*)
- Guide de ressources pour les Arts et Sciences Humaines (*Resource Guide for the Arts and Humanities*)

Nous allons détailler les résultats et les recommandations émanant du guide "Stratégies pour données numériques", car ils donnent une bonne idée des préoccupations et difficultés des archéologues lorsqu'ils souhaitent archiver leurs données sur ordinateur. Ce document provient d'une enquête que l'ADS a mené en 1998 sur la demande de l'*English Heritage* et de la *Royal Commission on the Historic Monuments of England*. Des questionnaires ont été envoyés aux archéologues anglais et irlandais. Les thèmes de cette enquête étaient la création, l'archivage, l'utilisation et la réutilisation de données numériques en archéologie [Condron et al., 1999].

[3] `http://ads.ahds.ac.uk/project/pubs.html` [réf. du 01 décembre 2006]

Les résultats significatifs de cette enquête de terrain peuvent se résumer en sept points :

1. Il y a un besoin d'archives sécurisées et durables pour les collections de données numériques.
2. Des archives de projets accessibles, numérisées et en ligne sont nécessaires pour l'archéologue pour faciliter les recherches, l'éducation et la planification.
3. Des stratégies sont nécessaires pour identifier quelles collections de données doivent être préservées prioritairement (suivant les besoins des archéologues et l'état de conservation du site).
4. Le faible taux d'archivage et de catalogues accessibles est une barrière à l'utilisation d'archives numériques. Il est nécessaire de réaliser un index mis à jour régulièrement référençant toutes les ressources disponibles.
5. Des standards et guides sont nécessaires pour la création, l'archivage et la diffusion des collections numériques.
6. Des stages ou formations sont nécessaires pour les aider à la création effective, la préservation et la réutilisation de données numériques.
7. Il est nécessaire que les différentes organisations de toutes tailles travaillent ensemble pour développer et renforcer les stratégies pour la création de données numériques.

On entrevoit clairement dans ces conclusions le besoin des archéologues d'avoir accès aux données numériques de leur communauté, mais également leurs craintes et demandes pour qu'ils puissent être capables à terme de réaliser et de maintenir eux-mêmes les archives numériques de leurs travaux. Ils souhaitent également que les organismes qui leur offrent des systèmes d'archivage (systèmes de bases de données) travaillent ensemble pour que les données ne soient pas disséminées ou inaccessibles pour d'autres personnes. On retrouve les préoccupations que l'on citait plus haut en ce qui concerne la création de jeux de données numériques compatibles et le plus standardisés possibles.
L'analyse des résultats de l'enquête menée a permis ensuite à l'ADS d'éditer des recommandations pour les fournisseurs de systèmes mais également pour les archéologues désireux de numériser leurs données. Ces recommandations sont les suivantes :

- Programmes et ressources pour données numériques
    1. Un catalogue d'archives de données numériques nationales, inter-connectées et accessibles depuis n'importe quel poste de travail connecté à Internet assisterait beaucoup les recherches.
    2. La création et l'archivage de données numériques doivent être faits en accord avec les standards nationaux et internationaux.
    3. Les données numériques créées comme résultats de recherches archéologiques sont pertinentes pour la communauté archéologique.
- Standards et création de données digitales
    1. Les standards pour la création de données numériques sont essentiels pour faciliter les échanges d'informations. Les organismes nationaux doivent conti-

nuer à collaborer avec les programmes de développement de standards européens et internationaux (CIDOC[4], CIMI[5]).

2. Les organismes nationaux doivent continuer à encourager l'utilisation de standards pour les projets qu'ils financent. Des guides doivent être faits et fournis aux candidats avec le projet. L'ADS fournit lui-même une liste de standards de données archéologiques[6]. Tous les archéologues devraient utiliser les standards appropriés dans tous les travaux qu'ils entreprennent.

– Standards et archivage numérique

1. Les jeux de données numériques sont des éléments importants des archives de projet qui requièrent un examen approfondi s'ils doivent être préservés pour une utilisation future.
2. Les programmes de projets doivent prévoir des dispositions claires pour l'archivage des données numériques créées durant le projet.
3. Lorsque les archives sont dispersées entre plusieurs organisations, des pointeurs sur la localisation des autres éléments archivés sont importants pour maintenir l'intégrité des archives.
4. Il existe un besoin pour un document qui détaille les standards et matériels appropriés pour la création d'archives numériques. Ce document doit comprendre une liste d'archives numériques qui se conforment à ces standards (pour l'exemple). Un schéma de conformité pour archives numériques doit être fourni.

– Sélection d'informations numériques pour les archives

1. Les jeux de données brutes ainsi que les analyses des découvertes primaires, les informations sur le contexte du site, les données relevées, les catalogues et indices sont des sources d'information vitales pour la recherche (idéalement conservées sur papier et numériquement). Si ces éléments ont été créés numériquement dès le départ, ils doivent avoir été ciblés pour l'inclusion dans des archives numériques standardisées.
2. L'archivage numérique de bases de données volumineuses, de fichiers graphiques (CAO) ou issus de SIG est nécessaire si ces ressources doivent conserver leurs fonctionnalités dans le temps.
3. Des stratégies actives régionales et nationales doivent être développées pour la sélection de jeux de données numériques qui répondent aux besoins actuels et futurs des archéologues.
4. Il y a un besoin d'une collection rétrospective des données numériques existantes. Le manque actuel de stratégie implique que les archives réagissent de façon *ad hoc* (spécifique).

[4]Comité international pour la documentation du Conseil international des musées [Doerr, 2003].

[5]Consortium pour l'échange d'information muséologique, `http://www.cultivate-int.org/issue1/cimi/` [réf. du 11 janvier 2007].

[6]`http://ads.ahds.ac.uk/project/userinfo/standards.html` [réf. du 10 décembre 2006]

- Recouvrement des coûts et financement des archives numériques
    1. L'accès aux indices des archives de projets doit être gratuit pour pouvoir assister les particuliers dans la localisation des archives, pour encourager une plus grande utilisation de celles-ci et pour impliquer le grand public de plus en plus largement. Il a été reconnu cependant que des services additionnels comme la reproduction des jeux de données, le port, la formation particulière et la documentation additionnelle peuvent engager des coûts qui peuvent incomber à l'utilisateur.
    2. Les archives numériques ont besoin de financements pour des services comme la maintenance des archives, le support aux utilisateurs et la formation, pour s'assurer que les charges incombant aux utilisateurs ne sont pas prohibitives.
    3. Les dépositaires peuvent être chargés financièrement pour archiver des jeux de données. Néanmoins, les charges doivent tenir compte de la manière dont les projets ont été initialement financés et du niveau d'accès aux données que le dépositaire va autoriser au public. Les projets permettant un haut niveau d'accès aux données devraient idéalement être moins chers à déposer.
- Mécanismes de remise des données
    1. Les jeux de données détaillées devraient être rendus disponibles de plusieurs manières différentes pour assurer l'accès à un maximum d'utilisateurs.
- Besoins de formation et infrastructures d'accompagnement
    1. Pour pouvoir utiliser les données numériques, la formation est nécessaire à la fois comme partie de la formation continue des professionnels, et comme composante de l'apprentissage universitaire. Il faut aussi fournir des formations appropriées pour les archivistes numériques.
    2. Les organisations archéologiques pourraient coordonner leurs efforts pour développer plus efficacement des stratégies pour le financement d'infrastructures d'accompagnement pour l'archéologie dans son ensemble.

Ces recommandations très détaillées peuvent contribuer à établir le cahier des charges pour un projet visant à assister l'archivage numérique de données archéologiques. Les points essentiels à retenir concernent :

- l'accessibilité des bases de données (à mettre à disposition sur Internet avec des droits différents sur les données suivant le type d'utilisateur),
- la nécessité de se conformer à des standards à la fois pour créer et pour archiver les données,
- l'importance d'enregistrer des métadonnées (informations additionnelles sur les données) en plus des données brutes,
- le besoin de prévoir des supports explicites et des formations pour permettre aux archéologues d'archiver eux-mêmes numériquement et efficacement leurs données.

Nous y reviendrons dans le Chapitre 3 de ce mémoire, dans lequel nous ferons le bilan de cet Etat de l'Art pour introduire les choix que nous avons faits en accord avec certaines de ces recommandations.

D'autres organismes que l'ADS sont également actifs dans le domaine de la préservation des données archéologiques, comme l'Institut de Conservation du Getty GCI (*Getty Conservation Institute*). Le Groupe J. Paul Getty est une organisation culturelle et philanthropique internationale servant les Arts et les Sciences Humaines dans le monde.
Leur antenne s'occupant de conservation patrimoniale édite un bulletin d'information et des documents permettant de mieux appréhender la création de données numériques pour l'archéologie. On peut citer par exemple une lettre d'information datant de 2003 qui se consacre à "la conservation et l'archéologie" avec un article, une discussion et des exemples de projets mis en œuvre [GCI, 2003]. L'article de Brian Fagan, professeur d'anthropologie à l'Université de Californie (Santa Barbara), situe l'activité de conservation par rapport à l'archéologie en tant que travail de terrain. Il indique que dans les cercles archéologiques, le terme conservation signifie la préservation d'artéfacts ou de bâtiments, de roches, d'art ou d'autres restes tangibles. Le conservateur est stéréotypé par les archéologues comme quelqu'un qui a pour tâche principale de protéger les objets fouillés, mais en réalité son travail est bien plus vaste avec la préservation de toutes les données annexes à ces objets. Ces professionnels pourraient et devraient jouer un rôle intégral dans la conservation de sites archéologiques. Mais pour que cela arrive, les archéologues ont besoin d'une nouvelle vision de la conservation archéologique dans laquelle elle serait une priorité à chaque fois qu'une campagne de terrain est projetée. Evidemment, les archéologues doivent fouiller assez pour faire des recherches sur des problèmes de base, mais leur responsabilité primaire devrait être d'assurer que la base de données finale du site archéologique dure aussi longtemps que possible. On retrouve ici les préoccupations de Ginouvès (que nous citions plus haut) concernant la nécessité de prendre en compte dès le départ le fait de devoir créer une base de données du site, mais également le fait de réaliser une base de données qui soit pérenne et compatible avec d'autres systèmes. La discipline de conservation archéologique est aujourd'hui plus connue sous le nom de "Management de Ressources Culturelles" CRM (*Cultural Resource Management*), dénomination qui suggère de gérer les données archéologiques pour les générations futures - un mandat beaucoup plus large que le seul sauvetage de sites et d'artéfacts de la destruction. Cette gestion inclut non seulement le relevé, les fouilles et l'analyse, mais aussi des recommandations pour la gestion à long terme de la ressource. Les projets de CRM ont de sérieuses responsabilités, impliquant souvent des décisions quant aux sites devant être fouillés, détruits ou préservés dans leur intégralité. En tout cas, le nombre de données archéologiques préservées (numériquement notamment) grâce à tous les projets menés a considérablement augmenté, mais elles sont publiées confidentiellement ou circulent de manière limitée sur le Web, ce qui fait qu'elles sont relativement inaccessibles pour la plupart des archéologues. On retrouve là certaines des constations faites par l'ADS concernant l'accessibilité et la préservation à long terme des données archéologiques.

Par ailleurs, l'Institut de Recherche du Getty GRI conduit (comme l'ADS) des études sur les standards et donne des directives pour favoriser l'accès aux données sur les arts et les disciplines liées (archéologie notamment) en promouvant des normes et des pra-

tiques, et en développant des outils et des guides pour le développement, la gestion, la préservation et la délivrance d'informations sous forme numérique. Notamment, il a édité un guide d'introduction sur les métadonnées, une publication en ligne consacrée aux types et utilisations des métadonnées, et à la manière dont elles peuvent améliorer l'accès aux ressources numériques [GRI, 2000]. Métadonnée, littéralement "donnée sur une donnée", est un terme de plus en plus omniprésent, qui est compris de différentes façons par les communautés professionnelles diverses qui conçoivent, créent, décrivent, préservent et utilisent des Systèmes d'Information et des ressources. Les Technologies de l'Information et de la Communication rendant l'âge de l'information numérique de plus en plus réel, il est essentiel de comprendre les rôles cruciaux que les différents types de métadonnées peuvent jouer dans le développement de systèmes d'information patrimoniaux efficaces, interopérables, maintenables et à échelle variable. Une métadonnée peut être vue comme la « somme totale de ce que l'on peut dire de n'importe quel objet d'information à n'importe quel niveau d'agrégation »[7]. Dans ce contexte, un "objet d'information"[8] est tout ce qui peut être adressé et manipulé par un homme ou un système comme une entité discrète. Les professionnels du patrimoine et de l'information, comme les conservateurs de musée, les bibliothécaires ou les archivistes, utilisent de plus en plus le terme métadonnée pour désigner l'information à valeur ajoutée qu'ils créent pour améliorer, décrire, suivre et augmenter l'accès aux objets d'information. Une grande proportion des activités d'archivage et de muséographie s'est traditionnellement concentrée sur le contexte. Elucider et préserver le contexte d'une donnée sert à l'identification et à la conservation dans le temps de la valeur intrinsèque des enregistrements et des artéfacts. C'est ce qui facilite l'authentification des objets et ce qui aide les chercheurs dans leurs analyses et interprétations. Particulièrement en archéologie, enregistrer des métadonnées sur les données brutes (objets issus de fouilles, plans...) est donc particulièrement adapté, car le contexte est toujours très important pour l'interprétation ultérieure de la donnée et pour la conservation précise de la mémoire du site archéologique. Plus on enregistre d'informations complémentaires sur la donnée, plus on peut créer une base de données fidèle à l'état du site tel qu'on l'a trouvé, et relatant le plus exactement possible les travaux qui y ont été faits, même si le site vient à être détruit. René Ginouvès le disait lui aussi déjà. Sans utiliser explicitement le terme "métadonnée"[9], il proposait :

> « ...d'enregistrer [dans des bases de données] la totalité des caractéristiques dont se sert habituellement l'archéologue dans ses raisonnements interprétatifs, avec en plus des caractéristiques dont on ne se sert guère directement mais qui permettent de prendre une vue plus précise du document, et en plus des caractéristiques dont on peut penser qu'elles seront quelque jour utilisées. Cette formule [...] aboutit à donner de chaque document une des-

[7] Traduction libre de [GRI, 2000].

[8] Un objet d'information est une entité numérique ou un groupe d'entités, indépendamment du type ou du format, qui peut être adressé ou manipulé comme un objet simple par un ordinateur. Ce concept peut être ambigu car il peut être utilisé pour faire référence à la fois à un contenu réel (comme des images numérisées) ou à un contenu de remplacement (comme des enregistrements de catalogues) [GRI, 2000].

[9] qui n'était pas encore très utilisé en 1990

> cription au moins aussi riche que celle des publications traditionnelles, et en pratique nettement plus riche... » [Ginouvès, 1990]

Du point de vue de la conception d'une base de données comprenant des métadonnées, les communautés de l'information sont conscientes du fait qu'un objet d'information doit être très structuré. En effet, plus l'objet est structuré, plus cette structure pourra être exploitée pour la recherche, la manipulation et l'interrelation avec d'autres objets d'information (conception d'une base de données relationnelle). La création, la documentation et la mise en application de cette structure exigent cependant des types de métadonnées spécifiques. Dans un environnement où un utilisateur peut accéder aux objets d'information sur un réseau, une métadonnée :

- certifie l'authenticité et le degré de perfection du contenu,
- établit et documente le contexte du contenu,
- identifie et exploite les rapports structurels qui existent entre et à l'intérieur des objets d'information,
- fournit une gamme de points d'accès intellectuels pour une gamme de plus en plus diverse d'utilisateurs, et
- fournit certaines informations qu'un professionnel pourrait avoir indiqué dans une référence physique ou dans un rapport de recherche [GRI, 2000].

Dans toutes ces diverses définitions, les métadonnées ne servent pas uniquement à identifier et à décrire un objet d'information. Elles documentent également la manière dont cet objet se comporte, sa fonction et son utilisation, son rapport à d'autres objets d'information et comment il devrait être géré.
Concernant les standards de métadonnées, une discussion de l'auteur de la 1ère partie du rapport du GRI [GRI, 2000], Anne J. Gilliland-Swetland, montre que la théorie et les pratiques varient considérablement en fonction des différentes missions professionnelles et culturelles des musées, des archives, des bibliothèques et des autres communautés de l'information [Gilliland-Swetland, 2000]. Elle indique que des standards détaillés pour les métadonnées sont en train d'émerger (comme EAD *Encoded Archival Description* et RKMS *RecordKeeping Metadata Schema*) qui tentent d'articuler les différences spécifiques aux missions de ces communautés, aussi bien que de faciliter la confrontation entre des éléments de données communs. D'autres comme le *Dublin Core Metadata Element Set* (DC) identifie un jeu simple et réduit d'éléments de métadonnées qui peuvent être utilisés par n'importe quelle communauté pour décrire et chercher parmi une grande variété de ressources informatives sur le Web. De tels standards de métadonnées sont nécessaires pour garantir que différents types de métadonnées descriptives sont capables d'interagir les uns avec les autres et avec des métadonnées issues de systèmes non-réglementés comme les communautés de gestion de données et les créateurs d'information.
Pour conclure sur les métadonnées, on peut donner quelques points clés qui doivent être suivis par les professionnels de l'information lorsqu'ils développent des systèmes d'information intégrant des métadonnées [GRI, 2000] :

- Identifier quel(s) schéma(s) de métadonnées devrai(en)t être appliqué(s) pour répondre au mieux aux besoins du créateur, du dépositaire et de l'utilisateur de

l'information.
- Décider quels aspects des métadonnées sont essentiels pour ce qu'ils veulent faire et à quel degré de profondeur ils en ont besoin (c'est-à-dire savoir à quel moment ce n'est pas assez décrit et à quel moment ça l'est trop)[10].
- S'assurer que les schémas de métadonnées appliqués correspondent aux dernières versions disponibles.

Si de telles recommandations n'ont pas été suivies dès le départ par les créateurs de données et de métadonnées, des organismes comme *The European Research Network of Excellence in Open Cultural Heritage* EPOCH[11] favorisent l'application du Modèle Conceptuel de Référence CIDOC-CRM (ISO 21127, [Doerr, 2003]) par tous ses associés, en proposant des formations et en les aidant à avoir accès aux documentations de référence sur les standards. Calquer la configuration des structures de données internes des associés au standard CIDOC-CRM est aussi une façon de promouvoir l'adoption de cette norme internationale [D'Andrea et al., 2006].
Nous y reviendrons également dans le Chapitre 3, où nous expliquerons dans quelle mesure nous utiliserons les métadonnées et comment nous prendrons en compte les standards pour répondre au mieux aux besoins des archéologues et des conservateurs.

Pour conclure cette partie sur les recommandations concernant la conservation des données en archéologie, on peut citer des organismes proposant des standards détaillés et des guides pour l'archéologie de terrain. Par exemple pour le transfert des archives aux musées, la *Society of Museum Archaeologists* SMA a édité en 1995 un guide destiné aux archéologues du Royaume-Uni et de l'Irlande pour rendre accessibles les archives archéologiques [SMA, 1995]. De même, pour la préservation physique et le stockage des archives de terrain [Walker, 1990, Ferguson et Murray, 1997, Brown et Perrin, 2000] ou la documentation des collections de musées [MDA, 1997]. Concernant ce dernier point, cette association anglaise *Museum Documentation Association* MDA est très active dans le domaine de la conservation du patrimoine : elle maintient notamment un forum sur les standards d'information autour du patrimoine (*Forum on Information Standards in Heritage* FISH)[12]. On y parle de standards pour l'enregistrement d'informations sur l'histoire, le patrimoine ou l'état actuel de bâtiments, de sites archéologiques ou de monuments. Des outils d'indexation et de recherche d'informations y ont également été développés. Comme souligné précédemment, les standards sont importants pour le partage de l'information avec d'autres équipes, pour transmettre des copies ou mettre des informations en ligne. A titre d'exemple, nous allons détailler deux modules proposés par la MDA :
- MIDAS[13] propose une liste approuvée d'entités ou d'"unités d'informations" qui

[10] Il y aura probablement toujours des différences importantes entre les dépenses de développement et de gestion des métadonnées pour répondre aux besoins actuels, et la création de métadonnées suffisantes pour pouvoir être valorisées à l'avenir pour des utilisations souvent imprévues.

[11] `http://www.epoch-net.org/` [réf. du 16 janvier 2007]

[12] `http://www.fish-forum.info/` [réf. du 15 janvier 2007]

[13] `http://www.jiscmail.ac.uk/cgi-bin/filearea.cgi?LMGT1=FISH&a=get&f=/web_midasintro.htm` [réf. du 15 janvier 2007]

devraient être inclues dans tout inventaire ou tout enregistrement systématique de l'environnement historique. Ces unités d'informations sont groupées dans des schémas d'informations, et couvrent des domaines comme les types de monuments, les événements ou l'organisation des ensembles architecturaux. C'est un standard "de contenu" ou de métadonnée pour des informations sur l'environnement historique. Les standards pour l'indexation dans chaque "unité d'informations" pour assister la recherche de données sont contenus dans le module INSCRIPTION.

– INSCRIPTION[14] propose une collection de "listes de mots" maintenues et recommandées par le FISH. Ce module fournit des outils pour l'indexation complète et cohérente des différents aspects du patrimoine construit et enterré. Il inclut, par exemple, des standards pour l'enregistrement de l'âge et de la nature d'un site. Cela aidera à répondre à des questions spécifiques comme "Quel est ce site ?", "Quel âge a-t-il ?". Ou a des requêtes plus générales comme "Que connaissons-nous des villas romaines ?". INSCRIPTION permet ainsi de compléter les définitions des entités individuelles ou "unités d'informations" d'un site, d'un événement ou d'une ressource que FISH recommande dans le standard MIDAS.

Ces modules sont importants car une grande proportion des connaissances et des éléments de compréhension du patrimoine est comprise dans une importante variété d'inventaires maintenus par des organismes nationaux de conservation, des autorités locales, des musées ou des chercheurs individuels et universitaires. Pour faire la meilleure utilisation de ces fonds d'informations, particulièrement quand ces ressources sont disponibles sur Internet, il est important que la compréhension de la façon dont les informations devraient être enregistrées soit partagée. MIDAS établit cette compréhension partagée, basée sur l'expérience de beaucoup d'organisations clé impliquées dans le rassemblement et la dissémination d'informations sur l'environnement historique. L'utilisation d'un jeu approuvé de termes pour indexer ces enregistrements assiste l'accès aux collections de données et aide aussi à la communication des données entre les différents inventaires. Le FISH espère que les standards inclus dans INSCRIPTION deviendront le point de départ pour l'établissement de standards communs pour la terminologie au Royaume-Uni et en Irlande[15].

Ceci n'est qu'un exemple de plus d'organisme donnant des recommandations en matière de standards ou de métadonnées pour la conservation du patrimoine, comme les services ou instituts que nous avons cités plus haut. Dans la section suivante nous verrons des exemples de réalisations de bases de données pour la gestion d'informations archéologiques. Les projets présentés n'appliquent pas forcément les conseils que nous avons énoncés, mais ils se veulent représentatifs de la manière dont les systèmes de bases de données ont été et sont utilisés en archéologie.

[14] `http://www.fish-forum.info/inscript.htm` [réf. du 15 janvier 2007]
[15] `http://www.fish-forum.info/terms.htm` [réf. du 15 janvier 2007]

1.1.3 Exemples de projets d'archivage

***The Archaeological Data Archive Project* ADAP.** Le "Projet d'Archives de Données Archéologiques" était un projet d'un organisme américain, le Centre pour l'Etude de l'Architecture et de l'Archéologie CSA (*Center for the Study of Architecture/Archaeology*) qui se consacre à favoriser l'utilisation des technologies informatiques et de l'information numérique dans les domaines de l'histoire architecturale, l'archéologie et autres disciplines s'y rapportant. Ce projet, démarré en 1994 et stoppé depuis 2002, avait pour but de sauver, sécuriser et enregistrer à long terme les données archéologiques informatisées (artéfacts, plans...) provenant de fouilles, mais aussi de travaux de chercheurs et de professionnels. En effet, beaucoup de données numériques peuvent devenir rapidement obsolètes, notamment à cause du support d'enregistrement (disquettes...), alors qu'il est indispensable qu'une sauvegarde numérique subsiste (par exemple pour les dessins CAO dont l'impression est pauvre par rapport au fichier original). Les données en question, aussi bien les enregistrements bruts des données de fouilles que les compilations de documents résultant de travaux de laboratoires, ont trois points communs : elles ont été créées avec un certain coût, elles ont une valeur potentielle pour la communauté archéologique, et leur valeur dépend de leur disponibilité et de leur qualité. Ainsi, ces données doivent être préservées et rendues largement accessibles. Pour ce faire, le projet ADAP a contribué à créer des archives contenant tout type de données archéologiques (culturelles, chronologiques, géographiques...) sous forme de textes, fichiers CAO, images, dessins, etc. Ces fichiers ont été rendus accessibles au public pour la consultation et le téléchargement. A l'époque (1994), le projet avait été démarré dans une certaine urgence pour éviter la perte de données archéologiques ayant été enregistrées numériquement sur des supports amenés à ne plus pouvoir être lus par les nouveaux matériels informatiques, en particulier d'irremplaçables données de fouilles. Ensuite, il s'est avéré (comme nous le soulignions plus tôt) que les nouveaux documents et informations créés par la suite[16] sont aussi importantes que les données brutes (même si le danger de disparition est moins imminent). Les données à conserver ont donc été toujours plus nombreuses avec les nouveaux fichiers qui s'ajoutent et les anciens qui sont numérisés. Par ailleurs, les formats d'enregistrement des données ont aussi suscité des débats, et il avait été décidé au final de les demander en format natif, en ASCII et en .dbf (format de bases de données). Une réflexion avait aussi été menée pour faciliter la transformation de ces données dans d'autres formats.

Les créateurs de ce projet étaient conscients que les standards deviendraient de plus en plus importants pour que tout le monde soit capable d'avoir accès aux données efficacement. Mais, le projet ayant débuté en 1994, il n'était pas possible d'appliquer des normes rétroactivement alors qu'elles n'avaient même pas été établies. Ils n'ont donc pas demandé les données dans un format standard arbitraire,

[16] Les informations secondaires (catalogues, publications, indexes, notes descriptives, opinions personnelles) en relation avec les informations primaires que sont les artéfacts eux-mêmes constituent ensemble l'histoire complète des données fouillées [Burnard, 1991].

mais par contre ils ont exigé une description minutieuse des fichiers en question. Ils ont donc conservé des métadonnées dont nous avons souligné l'importance précédemment. Ils ont souhaité que les fichiers puissent être utilisés à long terme, et sans ces descriptions, ils n'auraient pas pu l'être. L'intégrité et la protection de toutes les données archivées avaient également fait partie des préoccupations de départ de ce projet qui se voulait ouvert, consultatif et à valeur ajoutée pour la profession. [Eiteljorg, 1995]

Malheureusement, d'après le directeur du CSA également directeur de ce projet, Harrison Eiteljorg, qui a annoncé la fin de ce projet en août 2002[17], après presque une décennie la quantité de matériels reçus et stockés dans la base de données ADAP était très faible, et tous les fichiers ont été rendus à leurs propriétaires dans leur forme actuelle pour qu'ils puissent s'occuper de leur conservation ailleurs. Il semble qu'il y ait deux problèmes insurmontables pour la création d'archives d'après lui. Le premier est l'absence de réelles possibilités pour assembler une quantité de matériel assez importante pour être vraiment utile, et ce en un temps raisonnable. Cela reflète principalement la réticence des savants à déposer leurs matériels dans des archives, même si cette résistance est passive tant le besoin de préservation des artéfacts dans des bases de données est évident. De plus, beaucoup de projets d'archivage numérique n'ont pas été menés à terme. Le deuxième problème est que le système d'archive que l'on a tenté de mettre en place dans ce projet risquait de ne pas être exhaustif dans l'immédiat ou dans un avenir proche. Ce problème est courant dans le monde universitaire et est vu généralement comme l'obstacle principal lorsqu'il s'agit de créer des archives numériques. D'autant que rien n'indique que plus de données auraient été déposées par la suite dans le système pour créer une archive réellement profitable pour les utilisateurs. Cette crainte est fondée car l'histoire de la discipline n'offre pas beaucoup d'exemples de partage prompt de données de fouilles ou de relevés. Les archéologues sont trop habitués à traiter leurs objets et leurs données comme privés. La fin de ce projet ADAP ne change pas le besoin de créer des dépôts appropriés pour les données numériques issues de la recherche archéologique. Elle ne réduit pas non plus l'exigence morale de préserver toutes ces données irremplaçables. Cela met juste en évidence les problèmes associés au travail d'archivage de données archéologiques. Pour conclure, Eiteljorg indique que l'archéologie est pratiquement la seule discipline à estimer qu'il est impossible de créer un système d'archivage commun pour ses données numériques. Pourtant les archéologues devront s'y atteler probablement plus ardemment que beaucoup d'autres savants, car leurs données ne peuvent pas être recréées une fois qu'elles sont perdues. Leurs expériences ne peuvent pas être reproduites.

[17] sur une liste de discussion pour l'étude du Proche-Orient Antique `https://listhost.uchicago.edu/pipermail/ane/2002-August/002502.html` [réf. du 17 janvier 2007]

Informatisation des archives du sol en archéologie de sauvetage. Dans cette partie, nous allons détailler les expériences menées à Lyon entre 1984 et 1994 pour l'informatisation de données archéologiques en milieu urbain. Ces travaux ont été présentés en ces termes par leurs auteurs dans une revue publiée par l'Institut de Recherche et d'Histoire des Textes (IRHT), unité de recherche du CNRS. Cette revue "Le Médiéviste et l'Ordinateur" comporte un numéro intitulé "Informatique et Archéologie" (daté du printemps 1994), dans lequel plusieurs organismes français font part de leurs expériences notamment dans les domaines de la gestion des archives du sol et de la combinaison de l'information [Burnouf et al., 1994].
Pour commencer, Joëlle Burnouf[18] fait le bilan des travaux menés préalablement à la construction du métro de Lyon entre 1984 et 1988. Le chantier du métro de Lyon fut un des premiers chantiers d'archéologie de sauvetage (en France) à tenter d'informatiser les données de fouilles. L'archivage, la gestion et le traitement de la masse des données de fouilles sont les principaux problèmes de chaque responsable de chantier archéologique. Il est nécessaire d'utiliser un outil qui permette un stockage important, une consultation aisée et une recherche rapide à partir de différents éléments en fonction du sujet traité[19]. Dans le cas particulier de ce chantier, les gisements étaient disparates et ne couvraient pas les mêmes réalités historiques, se déployant du néolithique au XIXème siècle. Les données de terrain devaient pouvoir être le plus rapidement accessibles au plus grand nombre, de l'archéologue de terrain au sédimentologue travaillant en laboratoire, au céramologue travaillant au musée ou au documentaliste travaillant aux archives. Pour le traitement de cet ensemble de données dans la perspective d'une nécessaire synthèse pour publication, il fallait également faciliter la consultation des archives de fouilles et le croisement des informations. C'est pourquoi, dès le départ de ce projet l'utilisation de l'informatique a été pensée comme un outil quotidien de vérification, de tri et de listage immédiat. Pour les logiciels, le choix de l'équipe s'était porté sur des configurations en usage à l'époque, publiées et diffusées gratuitement, permettant de réaliser des plans et coupes avec projection des objets découverts en fouille. Ils avaient également développé eux-mêmes deux applications : l'une pour la céramique médiévale et l'autre pour le fichier des photographies du chantier. Dans le bilan qu'elle fait de ce projet dans l'article cité ici (soit 6 ans après la fin du projet), J. Burnouf souligne que l'organisation du travail de l'équipe fut très complexe dans la mesure où les archéologues assuraient l'ensemble des opérations, de la fouille au traitement de l'information. Mais ils ont constaté que l'enregistrement informatique et l'exigence de rigueur qu'il requiert ont permis, outre la formation à ce travail, d'obtenir moins de perte de données et une meilleure qualité des résultats dans le traitement de la source. Par contre, elle a posé dès la fin du projet le problème d'ensemble des archives de fouilles, de leur devenir et de leur conservation (tout comme Eiteljorg précédemment). Pour les

[18] J. Burnouf fut responsable de l'opération d'archéologie préventive préalable à la construction de la ligne D du métro de Lyon.

[19] notamment dans un contexte d'urgence comme celui d'un chantier de métro, compte tenu des délais, de la durée limitée des interventions et de la quantité importante de données à traiter

archives informatiques, elle pensait que seuls les dépôts d'archives présentaient des garanties pour la conservation et la consultation suivant les règles déontologiques en usage dans la profession. Mais ceci n'avait pas encore été fait pour les archives du métro du Lyon en 1994 (qui ont failli être perdues dans un déménagement) et les données stockées sur disquette étaient déjà considérées comme perdues dans la mesure où la copie et le stockage sur des supports plus résistants n'avaient pas été assurés. Pour citer J. Burnouf, elle disait il y a plus de 10 ans déjà :

> « L'usage de l'"outil" informatique étant désormais plus courant, il devient urgent de régler les problèmes de conservation de l'information électronique : car il s'agit de se ménager le choix de reprendre l'étude des "archives de fouilles", pour remettre en question des résultats aujourd'hui vieux de dix ans, et favoriser la critique interne des sources archéologiques. » [Burnouf et al., 1994]

On constate en comparant ces mots avec les conclusions de H. Eiteljorg sur le projet d'archivage aux Etats-Unis, qui sont elles beaucoup plus récentes (2002), que l'urgence soulignée par cette archéologue française est toujours d'actualité. En effet, comme on le disait plus haut, les archéologues ne sont toujours pas enclins à déposer leurs données numériques sur des serveurs d'archives, ce qui implique également que celles-ci ne sont pas transformées dans des formats plus pérennes qui permettraient de les sauvegarder à long terme.
Le deuxième projet mené à Lyon entre 1991 et 1994 est un système d'enregistrement et d'exploitation automatisé des données archéologiques nommé L.P.Arch' [Arlaud et al., 1993]. Ce projet a été développé à la faveur des opérations de fouilles archéologiques préalables à la construction des Parkings LPA sur la Presqu'île Lyonnaise. La première étape de ce projet a été une analyse documentaire fine permettant de décrire le fonctionnement du chantier archéologique et de le modéliser (phase d'analyse conceptuelle dont nous parlions plus haut). Cette phase comprend l'analyse détaillée du cursus des opérations et des besoins de manière à créer une base qui puisse évoluer au gré des nécessités, et l'élaboration de fiches, aussi structurées que possibles, énumérant des rubriques (identification, définition des unités d'enregistrement...) dont on définit le type (alphanumérique, numérique, date...) et la taille, en relevant les éléments significatifs sur lesquels se feront les recherches. Puis, pour la conception de la base de données, l'analyse de la structure logistique des chantiers et les principes généraux de l'organisation du travail ont permis de formuler un modèle privilégiant une organisation multi-fichiers. La solution de la base de données relationnelle[20] permet d'éviter les redondances entre les données des fichiers, source de gaspillage tant en termes de temps que de performances. Ce dispositif permet à l'utilisateur une vue dynamique sur l'ensemble des données du chantier, une communication instantanée entre les informations des divers fichiers au gré des besoins et une automatisation de la saisie. Cette base de données s'articule autour de la documentation

[20] c'est-à-dire un ensemble de fichiers reliés les uns aux autres comme nous l'avons vu dans le premier point de cette section

intrinsèque du site. Elle comprend les unités stratigraphiques, unités de base de la recherche et de l'enregistrement archéologique sur le terrain, les objets mobiliers, les documents graphiques et photographiques, mais également tous les documents en rapport moins direct avec l'étude de terrain (sources scripturaires : archives médiévales et modernes, sources bibliographiques, cartographie...) mais pouvant cependant contribuer à la reconstitution du site[21]. Un des avantages de la création de cette base de données informatisée pour son concepteur est que l'utilisation de l'informatique au travers de fichiers d'étude spécifiques dépasse le stade du simple comptage et du tri. Cela permet d'élaborer des traitements quantitatifs et typologiques sur des données parfaitement contrôlées et localisées. D'un point de vue technique, le logiciel permettant de créer et d'exploiter la base de données de manière relationnelle (SGBDR) a été choisi en fonction de différents critères :

> « la possibilité d'utiliser la base sur un réseau en mode multi-utilisateurs, de grandes qualités de convivialité, la flexibilité et la rapidité d'exécution des principales fonctions (recherche, tri...), des garanties de fiabilité (un suivi par son éditeur), la sécurité du fonctionnement (protection de l'intégrité des informations, auto-réparation de la base, récupération des données) si d'aventure intervenait un incident majeur, un système tourné vers l'échange (importation et exportation de données de provenances diverses). » [Burnouf et al., 1994]

Nous y reviendrons dans le Chapitre 5 où nous expliquerons les choix informatiques que nous avons faits pour concevoir le système proposé, notamment le choix du système de gestion de bases de données.
En conclusion de ce projet, les auteurs[22] indiquent dans le rapport sur lequel nous nous sommes basés [Burnouf et al., 1994] qu'il est en mesure de répondre globalement à la majorité des exigences d'un grand chantier urbain (classement, gestion, recherche de tous les documents archéologiques issus du terrain ou générés par l'étude), tout en restant souple, évolutif et parfaitement adaptable aux préoccupations de chacun des membres de l'équipe. L'informatisation imposa une discipline de travail, de la rigueur au niveau de la réflexion et de la méthodologie : elle incita à être plus logique, plus exigeant et parfois plus inventif. Par ailleurs, le système intégra nécessairement, selon une procédure de *feed-back*, toutes les évolutions des méthodes d'enregistrement du terrain, consécutives aux réflexions déclenchées par l'élaboration du système documentaire que nous avons décrit.

[21] On retrouve ici les métadonnées qu'il est nécessaire de conserver avec les données primaires.
[22] C. Arlaud : responsable d'opération, M. Hammache : archéologue-informaticien, J.-M. Lurol : responsable-adjoint. AFAN.

Digital Archive Network for Anthropology and World Heritage **DANA-WH.**
Le "Réseau d'Archives Digitales pour l'Anthropologie et le Patrimoine Mondial" est un projet émanant de plusieurs laboratoires universitaires de recherche en archéologie (américains principalement). Ce projet a fait l'objet de plusieurs publications récentes [Clark et al., 2001, Clark et al., 2002, Landrum et al., 2003] et nous supposons qu'il est toujours maintenu, étant donné que toutes les données prévues n'y ont pas encore été intégrées. Le développement technique de DANA-WH a été réalisé par le Laboratoire de Technologies Archéologiques de l'Université d'Etat du Dakota du Nord NDSU ATL (*North Dakota State University Archaeology Technologies Laboratory*). L'ATL donne aussi des conseils pour les institutions et les chercheurs qui souhaiteraient participer au projet DANA-WH. La structure du système DANA-WH est basée sur l'idée qu'un certain nombre d'institutions y contribueront en fournissant des ressources informatiques et des données. Les données qui ont été intégrées (ou qu'il est prévu d'intégrer) dans le système proviennent de l'archéologie, de l'anthropologie biologique, de l'ethnologie et de la linguistique. Les différents fournisseurs de ces données ont aussi contribué au développement du système.
DANA-WH est un réseau de bases de données distribuées et inter-opérantes, chacune ayant un contenu spécifique de valeur dans son domaine (archéologie, anthropologie, ethnologie...). Ces bases de données contiennent des jeux de données contrôlés par des Systèmes de Gestion de Bases de Données Relationnelles (SGBDR) séparés et fonctionnant sur des systèmes informatiques indépendants, hébergés par différentes institutions et connectés à un même réseau. DANA-WH contient un ensemble d'informations textuelles, dimensionnelles et visuelles sur des objets du patrimoine humain. En plus de ces informations sur chaque objet, le système inclut des images bidimensionnelles et des modèles tridimensionnels précis d'objets matériels (c'est-à-dire des artéfacts et des fossiles). Ces modèles sont des substituts digitaux des spécimens réels qui peuvent être manipulés pour être vus sous tous les angles et sont suffisamment précis pour permettre d'y faire des mesures détaillées et des analyses. Pour le moment en phase primaire de développement, le système archive uniquement des collections archéologiques de la NDSU, de l'Université du Minnesota à Moorhead et de l'Univesité HNB Garwahl de Srinagar en Inde (céramiques, pierres, ossements, armes archaïques des Indiens d'Amérique et poteries indiennes). Une collection d'anthropologie biologique est en train d'être développée : elle propose d'inclure des ressources informatives et multimédia sur l'Homo Sapiens, les ancêtres de l'homme (l'Homo Erectus, l'Homo Habilis...), des ancêtres hominidés (l'Australopithèque), ainsi que des primates (gorilles, orang-outans, chimpanzés, bonobos, gibbons...). Les collections d'ethnographie et de linguistique n'ont pas encore été mises en œuvre, mais sont projetées pour l'avenir.
Ce réseau permettra un accès fiable et universel (temporellement et spatialement) aux contenus et aux services pour l'éducation et la recherche en anthropologie. Le projet est actuellement financé par le programme Bibliothèques Nationales des

Sciences Digitales (NSDL *National Science Digital Libraries*)[23], qui a pour but de développer et mettre en œuvre des bibliothèques de données digitales pour les matériels anthropologiques.
En ce qui concerne l'utilisation du système, il s'agit d'abord de télécharger l'environnement Java de Sun Microsystems (*Java Runtime Environment* JRE), dont le système de démarrage Web (*Java Web Start* JWS) permet aux utilisateurs de DANA-WH d'exécuter le logiciel client du réseau depuis le bureau de l'ordinateur sans l'aide d'un navigateur Internet standard. Une fois que ce système de démarrage est installé, l'utilisateur peut accéder à l'application client de DANA-WH directement depuis le site Internet du projet[24] en cliquant sur un hyperlien nommé "Lancer l'application". Après avoir cliqué sur ce lien une première fois, l'utilisateur n'aura plus besoin de repasser par le site Internet pour utiliser l'application (l'icône du projet apparaît sur le bureau de son ordinateur). Pour la visualisation des objets en 3D, l'utilisateur doit également télécharger l'environnement 3D de Java (Java 3D JRE). Une fois que tout est installé et que l'application est lancée, l'utilisateur accède à l'interface de recherche du système grâce à un système d'authentification (pour les partenaires uniquement). Pour la collection archéologique, qui est la seule accessible pour le moment, la recherche initiale est géographique sur six niveaux ayant une spécificité spatiale croissante (régions globales, sous-régions globales, nations individuelles...).

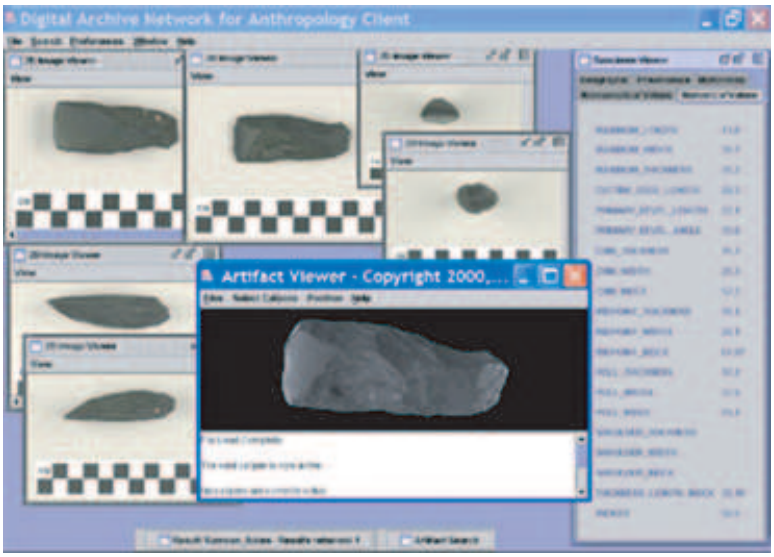


FIG. 1.3 – Vue de l'interface client du système DANA-WH montrant le modèle 3D (premier plan au centre) et six images 2D (gauche et haut) et des données métriques (droite) d'une herminette en pierre Samoan AS-11-8-42. Spécimen d'herminette original fourni à l'ATL pour numérisation par courtoisie du Dr Paul Cleghorn, Pacific Legacy Inc., Honolulu, Hawaii. [DANA-WH, 2004]

[23] `http://www.nsdl.nsf.gov/indexl.html` [réf. du 19 janvier 2007]
[24] `http://dana-wh.net/` [réf. du 19 janvier 2007]

Puis lorsque le lieu a été choisi, il s'agit de faire des sélections par le code du site, des caractéristiques matérielles ou des attributs d'artéfacts. Entre autres informations diverses (caractéristiques...), l'interface de visualisation est capable de récupérer des images 2D (par exemple, JPEG) de l'objet ou des modèles 3D. Le visualisateur d'images 2D fournit des vues multiples des artéfacts avec des échelles métriques, tout comme les dessins scientifiques des objets. Par exemple, la Figure 1.3 montre, grâce au visualisateur, six vues d'une pierre Samoan (capture d'écran avec les images 2D et le modèle 3D de l'objet). Les outils de mesure dans cette interface de visualisation en 2D n'ont pas encore été implémentés mais ils vont bientôt l'être grâce à des outils Java, tout comme pour les outils de mesure fonctionnant dans le visualisateur 3D. Ce visualisateur 3D a plusieurs avantages : il permet de retourner à une position précédente, de sauver et d'imprimer un point de vue et de recharger automatiquement un point de vue prédéfini dans un nouveau modèle. Il permet aussi différents affichages : couleurs, noir et blanc, nuage de points.... Des outils pour compresser les modèles sont actuellement en cours de développement pour permettre de les manipuler facilement car, même si cela permet des mesures sub-millimétriques, la taille des modèles peut rapidement devenir difficile à gérer (20-30 MB chacun).

Conclusion

Après avoir donné quelques définitions préalables nécessaires à la compréhension des systèmes évoqués ensuite, nous avons consacré une partie importante à l'histoire des bases de données en archéologie et aux organismes qui œuvrent pour aider les archéologues et les professionnels de la gestion d'information à créer des bases de données adéquates pour le domaine particulier qu'est l'archéologie. Nous avons notamment abordé les notions de standards et de métadonnées qui sont très importantes pour tendre vers la réalisation de bases de données plus pérennes, plus compatibles entre elles et plus compréhensibles de tous (grâce aux informations complémentaires apportées par les métadonnées), pour éviter que des données irremplaçables comme les données archéologiques ne viennent à être perdues. Puis, nous avons donné trois exemples de projets mis en œuvre par différents organismes, pour illustrer les notions abordées préalablement et pour souligner les éventuels problèmes que les concepteurs de ces projets ont pu rencontrer. Nous tirerons les conclusions de ces exemples dans le Chapitre 3 de ce mémoire, dans lequel nous indiquerons entre autres les besoins et les erreurs à ne pas commettre lorsqu'on souhaite créer des bases de données pour la gestion d'informations archéologiques.

Pour exploiter efficacement les informations enregistrées dans les bases de données, il est nécessaire de créer des Systèmes d'Information qui permettent de mettre en relation toutes ces données et de les représenter, notamment spatialement lorsque le système d'information est géographique. Les SIG sont les systèmes d'information les plus fréquemment utilisés en archéologie.

1.2 Systèmes d'Information Géographique en archéologie

1.2.1 Définitions préalables

Un Système d'Information Géographique est un type particulier de Système d'Information (SI), sachant qu'un SI est « un système de communication permettant de communiquer et de traiter l'information »[25]. Il est donc, par définition, un système permettant de communiquer et de traiter de l'information géographique. Plus particulièrement, un système d'information (géographique) vise à combiner au mieux les différentes ressources accessibles : bases de données, savoir-faire, capacités de traitement, selon les applications qui lui sont demandées. Deux définitions sont fréquemment citées pour expliquer ce qu'est un SIG : une de Michel Didier du CNIG (Conseil National de l'Information Géographique) qui l'a défini en 1990 comme un « ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à fournir et extraire commodément des synthèses utiles à la décision » [Didier, 1990], et une donnée à un colloque de la SFPT (Société Française de Photogrammétrie et Télédétection), également en 1990, qui le décrit comme un « système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler, organiser, gérer, élaborer, présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace ». Le terme information est ici entendu comme le résultat de l'application de règles et de directives sur des données, qui ont amené à des faits ou à des découvertes. Par données, nous entendons les descriptions quantitatives et qualitatives des particularités de l'objet faisant office de sujet étudié. Pour permettre de tirer des nouvelles informations ou pour retirer des caractéristiques spécifiques aux données recherchées, il faut utiliser les outils informatiques (ordinateurs), dans lesquels sont contenues à la fois toutes les données et toutes les méthodes permettant de les traiter. Ce sont des Systèmes d'Information [Koehl, 1997]. Un SIG est formé de la même manière, la particularité étant qu'un tel système permet de saisir, stocker, réorganiser, modéliser, analyser et représenter, sous forme alphanumérique et graphique, des données "géolocalisées"[26]. Schématiquement, la relation entre les données gérées par le SIG et la réalité peut être représentée comme illustré sur la Figure 1.4.
Un SIG permet donc le traitement numérique de données géométriques et de leurs attributs associés, pour constituer des informations très diverses qui servent à décrire, à analyser et à comprendre le monde réel que l'on peut alors modéliser à souhait. L'aspect thématique des types de données traités par les SIG différencie ces systèmes d'avec les systèmes DAO[27] et permet la réalisation de cartes thématiques pour représenter les données contenues dans le SIG. Il est aussi possible de faire des graphiques ou des rapports textuels, mais le traitement interactif des données est l'une des caractéristiques

[25] Norme ISO 5127-1-1983

[26] "géo" signifie que chaque donnée élémentaire qui est gérée dans un SIG est référencée par rapport à une partie de la croûte terrestre ; "localisation" signifie positionner géographiquement les objets traités ; donc la "géolocalisation" est le positionnement géographique d'un objet sur la surface de la Terre (au plan national, régional, local...).

[27] Dessin Assisté par Ordinateur

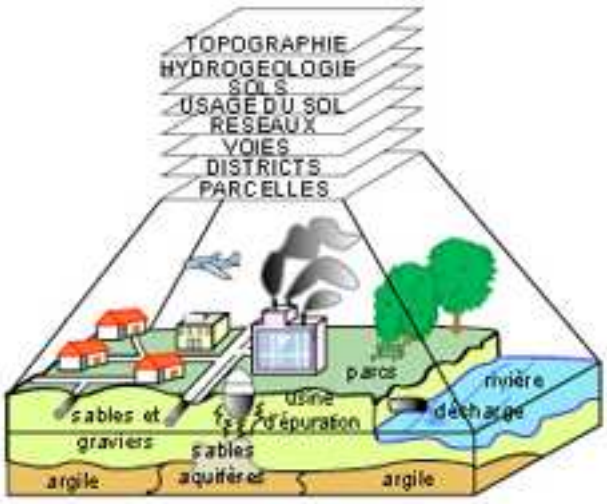


FIG. 1.4 – Schéma d'un Système d'Information Géographique : données et réalité [Denegre et Salge, 1996]

principales des SIG. Nous avons conçu notre système d'information dans cette optique d'interactivité comme nous le verrons par la suite.
Lors de la création d'un SIG, des objectifs généraux peuvent être suivis pour que le système ait une réelle valeur ajoutée par rapport aux données brutes [Brassel et Weibel, 1988] :

- capacité de traitement de grosses quantités hétérogènes de points géolocalisés ;
- possibilité de tri et d'accès à des données en fonction de leur existence, position, attributs parmi un grand nombre d'objets géolocalisés par l'intermédiaire de requêtes ;
- capacité d'interactivité de ces requêtes ;
- flexibilité[28] ;
- capacité du système à tenir compte des requêtes et règles antérieures pour les traitements de données ultérieurs.

Lors de la création du système d'information pour l'archéologie que nous avons développé, nous avons essayé de garder en tête ces objectifs notamment en ce qui concerne la souplesse des requêtes et la flexibilité du système.

Concernant les types de données gérées dans les SIG, ils sont divers [Koehl, 1997] :

1. Les données géométriques, qui sont la forme de l'objet et la position relative de différents points. Ces points sont en général décrits à l'aide de leurs coordonnées, ce qui a pour conséquence de définir dans le même temps un système de référence pour l'utilisateur. Dans un SIG la géométrie des objets peut être visualisée par une représentation ponctuelle, linéaire ou surfacique. La description d'objets ponctuels

[28] concevoir l'accès concurrent de plusieurs utilisateurs sur les mêmes données et à des niveaux différents

linéaires utilise des données de type vecteur, alors que la description d'objets surfaciques amène vers des données de type raster.

2. Les données de type vecteur, qui désignent les objets géolocalisés reposant sur des points. Les éléments de base sont les points, les lignes (ou segments) et les surfaces (ici ce sont des polylignes fermées). Ces données sont représentées par des graphes géométriques : points, lignes et relations d'incidence entre ces éléments, qui sont en général indépendants d'un système de référence.
3. Les données de type raster, qui concernent directement les objets surfaciques. L'élément géométrique-image de base est le pixel[29], qui est rangé en lignes et colonnes dans une matrice comprenant des éléments carrés ou rectangulaires identiques. Ceci permet de remplir des surfaces de données. Contrairement aux données vectorielles, les données raster ne connaissent pas de différence de type point, ligne ou surface, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de lien logique entre les différents éléments de l'image. Chaque pixel a juste une valeur (niveau de gris, altitude, intensité...). Il n'est pas possible de construire de relation logique entre les différents pixels d'une image, ce qui implique qu'une représentation raster est souvent désignée comme un graphisme non intelligent.
4. Les données thématiques ou attributs. Ces données sont descriptives, elles représentent des éléments non géométriques comme des textes, des mesures, des numéros, des noms... Ces attributs appartiennent à divers domaines suivant les fonctionnalités attendues pour le SIG. Ils existent sous forme analogique dans des cartes, formulaires, ou sous forme numérisée dans des bases de données, des tableaux ou des listes.

Comme nous le verrons par la suite, la majorité des données que notre système va permettre de gérer sera de type raster et thématique, car nous n'avons pas forcément géolocalisé les photos ou plans que nous avons scannés à partir des originaux papier. Ceci est faisable à n'importe quel moment pour spatialiser ces données (saisie de coordonnées dans un système de référence).

Ces données de tout type, qui sont stockées de manière permanente, sont la base du système. Il faut faire une distinction entre structure du SIG et résolution d'un problème en utilisant un SIG. La structure repose sur quatre composants : le modèle MLDU qui signifie Matériels, Logiciels, Données, Utilisateurs. La complexité d'un SIG est donc directement liée aux progrès technologiques dans les domaines du matériel et dans celui des méthodes de traitement informatique des données. Au niveau matériel, le concepteur de SIG n'a pas beaucoup d'influence, il profite des progrès qui sont faits chaque jour pour augmenter les performances des calculateurs. Par contre, il s'agit de développer les moyens de manipulation et d'organisation des données, c'est-à-dire les logiciels.

[29] *picture element*

Ces logiciels comportent quatre modules permettant la saisie, la gestion, l'analyse et la représentation des données :

- La saisie est l'ensemble des techniques d'acquisition de données ponctuelles, géolocalisées, par l'intermédiaire de moyens et méthodes de topographie classique (tachéométrie, photogrammétrie, télédétection, digitalisation, scannérisation de cartes ou autres sources de données). Les recherches tendant à l'amélioration de la saisie s'intéressent actuellement à la normalisation des formats d'échange[30], à l'automatisation de l'acquisition et à l'intégration de systèmes de connaissances pour augmenter le degré d'automatisation.
- La gestion consiste en la manipulation interactive et le traitement des données sous forme numérique. Les paramètres importants sont les volumes de données et le temps d'accès en fonction du type de données (vecteur, raster, attributs). Le noyau de gestion des données est formé par la base de données et ses modules de gestion (SGBD). Pour un SI de type géographique, ces données sont classées en fonction de leur géométrie et de leurs attributs.
- Les SIG sont caractérisés par la multiplicité des méthodes d'analyse et de traitement des données. Les analyses servent à acquérir de nouvelles informations et à faire ressortir des bases de décisions en utilisant les recoupements géométriques, logiques et les relations entre données. Le plus important est la fonctionnalité et la convivialité d'utilisation des différents outils par l'utilisateur. Les algorithmes de traitement permettent par exemple la transformation de données (vecteur en raster...), la généralisation et la conversion de données ou des simulations, synthèses ou animations.
- La représentation et la visualisation des informations est l'aspect le plus important après l'analyse des données. En effet, une représentation, sous forme graphique par exemple, est beaucoup plus attrayante pour l'utilisateur qu'une suite de chiffres et d'attributs classés dans des tables. Les recherches menées dans ce domaine concernent là encore la normalisation des formats d'échange, la généralisation en vue de l'agrégation des données, et les techniques de représentation et visualisation des informations.

Notre travail dans cette thèse étant de concevoir un SI pour la gestion de données patrimoniales, nous verrons par la suite (Chapitre 4) que nous avons concentré nos efforts sur ces quatre modules, pour prendre en compte toutes les composantes nécessaires à la réalisation d'un système d'information efficace.

Les Systèmes d'Information Géographique sont utilisés dans différents domaines et sont de plus en plus spécialisés.
Les plus courants, dans les collectivités territoriales par exemple, sont les SIG locaux, régionaux ou nationaux, qui sont des instruments de décision dans les domaines du droit, de la gestion et de l'économie. Ils sont aussi une aide pour la planification et le développement. Les fondements de ces types de SIG sont une référence unique pour les données géolocalisées, ce qui permet d'effectuer des recoupements entre toutes les

[30] On retrouve le besoin de standards dont on parlait pour les bases de données.

sortes de données qui y sont contenues. Les modèles de données sont réduits et limités en fonction de la destination du système, et ils sont en général en mode vecteur pur. La plupart des requêtes sont prédéfinies car ces SIG sont surtout utilisés par des services topographiques (pour le cadastre, les réseaux géodésiques, les levés locaux, le livre foncier...), qui s'en servent souvent pour les mêmes travaux.
Les géographes, planificateurs et démographes utilisent quant à eux plutôt des SIG à vocation spatiale. Ils servent à traiter des domaines comme la croissance démographique, l'économie, les mouvements de population, etc.. Ils sont un instrument de décision dans le domaine de l'analyse spatiale pour des programmes de développement régionaux, locaux (plan local d'urbanisme ou plan d'alignement) ou pour des statistiques administratives. Ces SIG comprennent une très forte interactivité, sont très visuels et l'analyse est le concept prédominant.
Les SIG réseau drainent eux le plus grand nombre d'utilisateurs. Leur but est la documentation et le traitement de données d'exploitation, c'est-à-dire aussi bien des données sur les clients que des données sur les consommations. Ils sont surtout composés de données vecteur et comprennent des algorithmes d'analyses de données réseau pour faire des recoupements d'après la localisation.
Puis, il existe des SIG à vocation écologique qui permettent l'acquisition, l'enregistrement, le traitement et la représentation de données quantitatives, qualitatives, spatiales et temporelles, relatives à la description de l'état de l'environnement. Ces systèmes peuvent contribuer à mettre en évidence les évolutions, détériorations et dangers des phénomènes écologiques. Les données gérées par ce type de SIG sont souvent hybrides (vecteur et raster) et surtout descriptives. Les domaines d'application sont vastes : gestion de données sur la qualité de l'eau, de l'air, des sols ; mise en évidence de la détérioration de la flore et des dangers pour la santé publique ; contrôles des gaz dans l'atmosphère ; sauvegarde des espèces par l'aménagement des espaces protégés... Les échelles de travail sont plutôt grandes, mais on peut également trouver des applications à l'échelle du territoire pour l'étude de la déforestation ou des reboisements. A titre d'exemple, nous pouvons citer le "Système d'Information Multimédia pour l'Environnement Sub-saharien" SIMES, projet de recherche et développement ayant fait partie d'un programme européen de coopération internationale pour les pays en développement INCO-DC[31]. Plusieurs laboratoires français, européens et africains y ont participé, notamment l'INRIA et IRD, l'objectif étant de développer un partenariat avec les pays en développement. Le rapport final de ce projet date de 2001 [Monga, 2001]. SIMES visait à l'application et à l'adaptation des nouvelles technologies de l'information à la compréhension et à la maîtrise de l'environnement sub-saharien. Les objectifs scientifiques et technologiques étaient de favoriser les compétences particulières en informatique environnementale. Pour ce projet, plusieurs sources de données étaient déjà existantes et il s'agissait de les fédérer pour apporter une valeur ajoutée en permettant l'application de traitements (statistiques, traitement d'images...) sur les données. Ces sources étaient soit les données gérées par les organismes partenaires (bases de données avec des don-

[31] *European Union's International Co-operation (INCO) Programme for the Developing Countries (DC)*

nées hydrologiques, des images satellites et aériennes, des références documentaires, des données issues d'enquêtes...), soit les sources d'informations propres au système SIMES (bases de données où sont rassemblées des informations extraites des sources déjà existantes). Des outils ont alors été créés pour exploiter ces données : outils d'acquisition de l'information, outils de gestion de la connaissance, outils de traitement de l'information, outils de diffusion de l'information, outils d'administration et de coordination du système. Lors de la création du système, les concepteurs ont veillé à l'indépendance et à l'autonomie des sources d'information gérées par les partenaires, et à la généricité, l'interopérabilité et la portabilité des outils. Un système de représentation et de gestion de connaissances a également été mis en place dans le système SIMES, qui permet d'utiliser les connaissances pour établir des liens ou des relations entre les différentes informations stockées. La mise en place de ce système a nécessité qu'on élucide des questions relatives aux types d'informations extraites et à la définition des métadonnées associées, à la manière d'extraire l'information, à la définition d'une ontologie[32] spécifique permettant de classer l'information ou aux systèmes d'indexation. Des opérations pilotes ont été menées : l'une pour exploiter les données de l'observatoire de la pêche dans le Delta Central du Niger et l'autre à partir des données de l'observatoire de la vallée du fleuve Sénégal. Pour détailler, la première opération comprenait les sources d'information suivantes : l'état d'occupation des villages et campements, l'activité et la mobilité des ménages, les débarquements des pirogues ou les mises en place de barrages. Les valeurs ajoutées du système SIMES ont été la constitution de synthèses statistiques, graphiques, textes pour la production d'un bulletin papier destiné aux décideurs locaux, un site Web contenant des informations générales sur les zones de suivi et reprenant également le contenu (graphique notamment) des bulletins, ou encore le calcul de données bioécologiques (descriptif morphologique du paysage...) collectées sur des zones échantillon. Le deuxième projet avait sensiblement le même genre d'objectifs, avec en plus l'exploitation de données météorologiques à partir d'images de METEOSAT, ou encore l'enregistrement de données géomorphologiques ou sur les aménagements et infrastructures.

Pour finir avec les domaines d'application des SIG, il en est d'autres qui sont aussi spécialisés que l'exemple précédent, comme par exemple les SIG appliqués au patrimoine architectural. Le travail en milieu patrimonial est particulier parce qu'il inclut la gestion de données spatiales et historiques. Il y a donc une dimension temporelle à prendre en compte qui n'est en général pas gérée par les SIG commerciaux actuels [Autran, 2001]. Pour le patrimoine le mode de représentation privilégié est la carte, qui permet dans un premier temps de collecter l'information, puis qui sert de média d'analyse et de communication des résultats. Par contre, les cartes sont souvent imparfaites et couvrent irrégulièrement l'histoire (dans le temps et dans l'espace), donc il faut adopter un mode de description temporelle spécifique pour les référencer dans une base de données historiques. De nombreuses activités de recherche portent sur ce thème [Scholl et al., 1998, Chorochronos, 1998, CASSINI, 1999, Luttermann et Grauer, 1999] : elles se consacrent

[32] Une ontologie est (notamment) une norme pour les métadonnées ou les métainformations, que l'on définit soi-même par rapport à ses besoins ou que l'on choisit parmi des normes standard proposées par des organismes comme ceux cités dans la partie précédente.

à l'étude et à la représentation de l'espace et du temps, à l'étude et à l'élaboration de modèles de données et de langages d'interrogation pour les bases de données spatio-temporelles, ou à la recherche de nouvelles interfaces graphiques basées sur les techniques d'animation. Il y a également des projets de sauvegarde du patrimoine architectural comme par exemple l'"Inventaire Systématique par Photos Aériennes du Patrimoine Architectural de la Vallée du Drâa au Maroc". Ce projet est un travail commun entre le CERKAS[33], le Ministère de la Culture du Maroc, le Bureau d'Architecture et d'Urbanisme H. Hostettler de Berne et l'Institut de Photogrammétrie de l'EPF de Lausanne. L'objectif est la saisie systématique des monuments historiques de la vallée du Drâa afin de contribuer à leur documentation, mais aussi à leur conservation, leur entretien et leur réhabilitation. En effet, les problématiques dans cette région sont l'éclatement des architectures, l'éclatement des tissus historiques, le manque d'infrastructures et l'exode rural. Ce projet a donc été mis en œuvre pour aboutir à la création d'une banque de données et d'un SIG qui sont des aides à la décision pour réaliser des interventions efficaces et pour collaborer avec d'autres organismes. Il permet aussi le rayonnement scientifique de la région traitée. Un site Internet[34] a été réalisé pour présenter l'ensemble de l'information recueillie au cours du projet. Il sert de base à une meilleure compréhension de l'état des Ksour de la vallée du Drâa en vue de leur réhabilitation. Des photos aériennes, ainsi que des photos terrestres et même des images acquises par satellites, fournissent une description visuelle des Ksour de la vallée. En plus de cela, des fiches descriptives pour chaque Ksar, relatant autant de son histoire que de son organisation sociale, sont disponibles sur le site. Des plans réalisés à la main ou à l'ordinateur, ainsi que des modèles architecturaux, permettent également de compléter les connaissances architecturales sur ces Ksour. Ce site permet de naviguer entre toutes les données disponibles et des requêtes sont possibles pour sélectionner les lieux, types de données ou mots-clés qui nous intéressent. Le logiciel utilisé pour réaliser le SIG est MicroStation combiné avec MGE (*Modular GIS Environment*). Il comprend l'information géométrique (digitalisée), l'information d'imagerie (données raster, photos) et l'information sémantique et descriptive (texte). De plus, il contient des modèles 3D des édifices (réalisés dans MicroStation) et des *Engineering Links* permettant de faire le lien entre la modélisation 3D et des photos ou du texte. [EPFL, 2000, Kölbl et al., 2001a, Kölbl et al., 2001b]

En conclusion de cette partie générale sur les SIG, il est important de noter que les SIG fonctionnant de manière "ouverte" sur le Web sont de plus en plus développés et utilisés[35]. Leur conception est encadrée notamment par le *Open Geospatial Consortium, Inc.* OGC, consortium international regroupant 335 compagnies, des agences gouvernementales et des universités participant à un processus consensuel pour développer les spécifications d'une interface disponible publiquement[36]. Ce cahier des charges appelé OpenGIS® recommande des solutions interopérables qui "géographisent" le Web, des

[33] Centre de Restauration et de Réhabilitation des zones atlasiques et sub-atlasiques

[34] `http://photpc15.epfl.ch/draa/html2/index.php` [réf. du 29 janvier 2007]

[35] Ceci est important car nous avons choisi de développer notre SI avec des logiciels en accès libre sur Internet pour ne pas dépendre d'un fournisseur de logiciel commercial (cf. 5.1).

[36] `http://www.opengeospatial.org/` [réf. du 05 février 2007]

services sans fil et la mise en valeur des Technologies de l'Information. Les spécifications rédigées visent à encourager les développeurs à réaliser de l'information spatiale complexe, et des services accessibles et utiles avec toutes sortes d'applications. OpenGIS® est une marque déposée associée à tous les produits qui mettent en œuvre ou se soumettent à ce cahier des charges. Les spécifications sont des documents techniques qui détaillent des interfaces ou des codes informatiques. Les développeurs de logiciels utilisent ces documents pour construire les fichiers support des interfaces ou des codes de leurs produits et services. Ils ont été développés conjointement par les membres de l'OGC pour relever des défis d'interopérabilité spécifiques. Idéalement, quand le cahier des charges a été suivi par deux ingénieurs logiciel différents travaillant indépendamment, les composants résultants sont capables de fonctionner ensemble sans nouvelle mise au point. Les spécifications sont mises à disposition gratuitement pour tous. Il y a par exemple un document appelé Modèle de Référence OpenGIS® ORM[37] qui décrit la structure du travail en cours de l'OGC, et le cahier des charges et d'exécution des développements et solutions interopérables pour les services géographiques, les données et les applications [OGC, 2003]. Il y a aussi des documents relatant des bonnes pratiques[38], qui sont des rapports contenant des discussions sur les meilleures pratiques liées à l'utilisation et/ou à la mise en œuvre d'un document OGC appliqué à un projet, et liées à la communication vers le grand public. Ces "Documents de Meilleures Pratiques" présentent une position officielle de l'OGC qui approuve donc les contenus de ces papiers[39].

A part l'OGC, d'autres réseaux s'occupant du développement de l'information spatiale sur le Web ont été mis en place. Par exemple *GIS Development* qui est un Réseau Mondial "Géospatial" de Communication pour la science, la technique et les applications de l'Information Géographique[40]. Il a pour vocation de produire, évaluer et disséminer la connaissance spatiale à tous les dépositaires par l'éducation, la formation, la recherche, la consultation et les services multimédias. Il promeut également l'utilisation de l'Information Géographique dans divers secteurs de développement dans le monde entier, et en particulier en Asie. Il aide les communautés et gouvernements dans le développement de leur productivité, leurs politiques et leurs capacités de gestion, en facilitant les transferts de connaissances dans le domaine de l'Information Géographique. Il favorise également le réseau croissant de ceux intéressés par la "géo-informatique" et encourage l'échange de savoir-faire scientifiques par ses plates-formes clefs : Magazines, Portail, Conférences et Formation. Le portail contient notamment une section sur l'archéologie qui comporte des articles relatant l'utilisation de l'information géographique dans ce domaine. Pour finir, il a y aussi des projets comme le *FreeGIS Project*[41] qui donne une vision globale des développements de SIG sur le Web ou "SIG libres", et communique sur les projets futurs et autres informations concernant les logiciels SIG libres et les données géographiques libres.

[37] OpenGIS® *Reference Model*

[38] un peu comme les "guides de bonnes pratiques" de l'ADS que nous citions dans la partie 1.1.2

[39] `http://www.opengeospatial.org/standards/bp` [réf. du 05 février 2007]

[40] `http://www.gisdevelopment.net/` [réf. du 05 février 2007]

[41] `http://freegis.org/` [réf. du 07 février 2007]

Comme exemple de système de dissémination de l'information spatiale sur le Web, ayant notamment été appliqué à l'archéologie, il faut citer le système GRASS[42]. C'est un SIG libre utilisé pour la gestion et l'analyse de données géospatiales, le traitement d'images, la production de graphiques et de cartes, la modélisation spatiale et la visualisation. GRASS est actuellement utilisé par des institutions universitaires et commerciales dans le monde entier, aussi bien que par beaucoup d'agences gouvernementales et de sociétés de conseil pour l'environnement.

Après ces généralités sur les SIG et sur leur utilisation en général, abordons désormais plus particulièrement la manière dont ce genre de systèmes est abordé dans le domaine particulier qu'est l'archéologie, et quelles sont les recommandations des organismes comme l'ADS pour en faire une utilisation qui soit une réelle valeur ajoutée par rapport à une banque de données classique.

1.2.2 Utilisations en archéologie et recommandations

Un site archéologique est un concept artificiel dans un espace contenant des systèmes de terrain, des zones sacrées et des frontières, dans lesquels le site est un simple centre d'activités humaines [Richards, 1998]. Cette dimension spatiale a longtemps été négligée par l'archéologie au profit du temps. Pourtant, l'espace est une notion omniprésente en archéologie : d'une part, à l'échelle territoriale, des notions à caractère spatial (région, domaine) sont couramment manipulées par les archéologues ; d'autre part, à l'échelle locale, une fouille archéologique est la restitution dans l'espace des activités humaines. L'utilisation des SIG en archéologie peut donc être divisée en deux parties principales :

- pour des besoins de recherches basées sur les analyses spatiales des distributions archéologiques, faites par manipulation numérique de jeux de données importants et complexes,
- et pour des besoins de Management de Ressources Culturelles (CRM, cf. 1.1.2) en utilisant des banques de données géoréférencées pour la conservation des sites et des artéfacts.

SIG : Archéologie à l'échelle territoriale

Le premier type d'utilisation est le plus courant : la majorité des SIG réalisés depuis l'apparition de cette notion s'appuient sur la dimension spatiale à l'échelle territoriale de l'archéologie. Dans un article paru en 1985, René Ginouvès soulignait déjà l'importance croissante de cette dimension spatiale :

> « Ainsi, l'objet de l'archéologie n'est plus seulement l'ensemble des créations matérielles dues au travail humain, mais aussi l'ensemble des transformations que l'homme a imposées à la faune, à la flore, au milieu géographique, et, en définitive, l'ensemble des relations réciproques, avec son environnement,

[42] *Geographic Resources Analysis Support System*, `http://grass.itc.it/` [réf. du 07 février 2007]

de l'homme tout entier. » [Ginouvès, 1985]

Le site archéologique est donc considéré non plus en tant que tel, mais dans les interactions qu'il produit avec son environnement et avec les autres sites. La notion de "territoire" devient jusqu'aux années 90 la notion autour de laquelle va se construire l'archéologie spatiale. Dès lors, la notion de modélisation spatiale en archéologie a été introduite et elle a trouvé dans les SIG un outil adapté à ses besoins.
Cependant, il y a des difficultés spécifiques liées à l'application des modèles spatiaux (utilisés couramment en géographie par exemple) aux objets archéologiques. En effet, la modélisation se base sur des objets élémentaires au niveau desquels il faut collecter l'information. Or en archéologie, on considère souvent que l'unique objet pouvant être spatialisé est le site archéologique, qui est un objet non figé et non sûr (certains sites ne sont pas connus, d'autres ne sont pas reconnus en surface ou d'autres ont été détruits). Lors du développement de modèles spatiaux pour l'archéologie, il faut donc prendre en compte ces incertitudes pour éviter de proposer des modélisations fausses ou qui seraient effectuées à partir d'échantillons trop réduits de sites archéologiques pour être fiables. Par ailleurs, la détermination d'indicateurs pertinents pour décrire les sites devant être inclus dans la modélisation pose aussi quelques problèmes. Dans l'optique de la détermination de systèmes de peuplement par exemple, une variable importante est la démographie, mais celle-ci n'est pas évaluable directement et il faut faire appel à des indicateurs de population ou à des indicateurs de hiérarchie des sites pour pouvoir la déterminer. De même, les indicateurs temporels sont très difficiles à déterminer car il est quasi impossible de découper des unités de temps pertinentes par rapport à l'occupation réelle des sites [Carozza, 2005].
Face à ces difficultés, les modèles spatiaux en archéologie sont principalement utilisés pour des analyses permettant de déterminer des stratégies d'implantation des sites, analyses dites "contextuelles", qui sont les plus courantes aujourd'hui. Ces études ont pour but la réalisation d'outils pour analyser les relations entre un site archéologique et son environnement plus ou moins proche. Elles visent à comprendre les déterminants de la localisation et à orienter les recherches sur le terrain. Elles présentent cependant également des difficultés car les données environnementales actuelles ne sont que partiellement transposables aux époques antérieures, et il s'agit donc d'étudier tous les indicateurs du passé et de formuler des hypothèses d'évolution des unités spatiales.
Par ailleurs, les SIG sont aussi utilisés à cette échelle pour les analyses de hiérarchie de peuplement, c'est-à-dire pour hiérarchiser sur des critères spatiaux (en plus des critères archéologiques) les réseaux d'habitat. La notion de distance de type "friction" est utilisée, basée sur la topographie du terrain et sur la relation pente/temps de marche entre les différents bassins de populations.
A part ces deux applications, les SIG sont également très utilisés pour réaliser des modèles prédictifs de localisation, ce que l'on appelle modélisation prédictive. Cette démarche vise à pallier le manque d'information archéologique via l'utilisation de différents modèles (statistiques, probabilistes ou déterministes). En effet, il n'y a qu'une infime partie du territoire qui a déjà fait l'objet d'une reconnaissance archéologique. Il faut donc proposer des modèles d'aide à la décision pour permettre aux archéologues de

prédire les localisations préférentielles des sites. Cette approche est largement répandue dans le monde anglo-saxon [Kvamme, 1990, Kvamme, 1992b, Peterman, 1993], moins en France.
Ces approches spatiales à l'échelle territoriale de l'archéologie induisent une modification des thématiques archéologiques et devraient conduire les archéologues et les historiens à développer une réflexion autour des données à introduire dans les modèles, et de la mise en place de méthodes de collecte de l'information utile [Carozza, 2005]. Dans tous les cas, il est nécessaire également de réfléchir à des procédures de validation des modèles spatiaux proposés dans les SIG pour l'archéologie. En France, le réseau ISA[43] (Information Spatiale et l'Archéologie), constitué de laboratoires d'archéologie du CNRS, regroupe des concepteurs et des utilisateurs d'information spatiale en archéologie, et se consacre à ce genre de problématiques. Ce réseau se définit autour de l'application à l'archéologie des outils de la géomatique, nouveaux outils de cartographie, SIG et télédétection. Il a pour objet de réunir géographes et archéologues pour favoriser la définition de nouveaux objets de recherche concernant les sociétés du passé, le transfert de concepts de la géographie dans le domaine de l'archéologie, la diffusion et l'utilisation de la géomatique dans les divers milieux professionnels de l'archéologie.

SIG : Management de ressources culturelles

Comme deuxième domaine d'application, on considère désormais le Management de Ressources Culturelles (CRM) comme le secteur de croissance le plus important des SIG en archéologie [Kvamme, 1992a, Lang, 1993, Miller, 1995, Van Leusen, 1995]. L'idée est d'intégrer des données de types très différents dans un environnement simple - cartes de distribution, images, bases de données textuelles, etc. - qui peuvent alors être modélisées au même titre que les autres processus de l'organisation. Par exemple, la plupart des procédés mis en œuvre pour l'enregistrement traditionnel d'un site ou d'un monument commencent par l'identification du lieu de l'application, par comparaison avec l'emplacement sur une carte imprimée. Ils se poursuivent par l'enregistrement d'identifiants uniques pour chaque site ou monument qui vont être concernés, en vérifiant les correspondances avec la base de données textuelle informatisée. Puis ils s'intéressent éventuellement aux fichiers de données secondaires, pour pouvoir examiner les archives liées - photographies, plans, rapports de fouilles, etc. Il y a donc des avantages évidents à pouvoir accéder à la plupart de ces éléments dans une interface spatiale unique [Lang, 1997]. Malheureusement, même pour ces projets de CRM, les buts ont souvent été déterminés par le besoin d'inclure les sites dans les processus de planification, y compris dans l'évaluation des impacts environnementaux d'événements commerciaux qui pourraient être organisés autour de la ressource archéologique [Richards, 1998]. Ainsi, dans ce papier, Richards ne relevait en 1998 que quelques exemples de projets utilisant réellement les SIG pour la gestion de données à l'échelle d'un site archéologique :

- un projet sur un cimetière espagnol [Quesada et al., 1995] utilisant ARC/INFO pour étudier les relations entre les tombes dans un cimetière ;
- un projet sur les sites romains de l'Age du Fer dans les *Assendelvers Polders*

[43] `http://isa.univ-tours.fr/index.php` [réf. du 13 février 2007]

[Meffert, 1995], qui a permis d'examiner les processus de sédimentation et de distribution des témoins, incluant les représentations graphiques des fragments et les numéros relatifs et absolus des poteries ;
- et un projet sur le peuplement Romano-britannique à *Shepton Mallet* [Biswell et al., 1995], où les avantages de l'utilisation d'un SIG ont été clairement démontrés pour visualiser la distribution des artéfacts, les comportements et secteurs d'activité, et les rapports entre sites et structures.

D'autres exemples plus récents seront cités dans la partie suivante, mais il est clair dans la littérature que les projets à l'échelle locale sont encore beaucoup moins nombreux et moins aboutis que les projets à l'échelle du territoire. Or, le problème de la localisation tant planimétrique qu'altimétrique des vestiges au sein du champ de fouille est essentiel. En effet, l'archéologie, étude des documents de toute nature permettant d'approcher le passé de l'homme, est une discipline particulière de l'histoire qui peut être divisée en deux parties :
- l'archéologie de terrain, où l'homme de l'art fait des fouilles, recueille les vestiges et accumule les témoins,
- et l'archéologie de bureau, où les chercheurs étudient ces témoins du passé pour pouvoir en tirer des conclusions permettant de reconstituer la vie des hommes à une époque donnée.

Pour pouvoir arriver à des conclusions significatives et valables de ces études, il importe que les objets trouvés ne soient pas isolés de leur contexte [Tschaen, 1989] (ce que nous avons déjà évoqué plus haut). Il faut donc spatialiser les éléments fouillés et enregistrer des informations sur leur environnement. Les SIG, utilisés à une échelle locale, permettent d'assister la gestion géolocalisée de ces artéfacts, même si cela peut présenter des difficultés spécifiques en archéologie. Les données à traiter sont effectivement très hétérogènes (primaires et secondaires) et il s'agit de réaliser des systèmes qui permettent de toutes les gérer, dans ce cas spatialement. De plus, il y a des contraintes assez importantes, de coût le plus souvent, qui freinent les équipes archéologiques dans la mise en place de tels systèmes. Neil Lang du RCHME[44] en déplore un certain nombre qui entravent une large utilisation des SIG, notamment pour la gestion des collections de musées [Lang, 1997] :
- le coût d'une base de données géographique numérique,
- les coûts de conversion et de capture des données (digitalisation, scannérisation),
- les nettoyages nécessaires de la base des éléments erronés ou redondants,
- les coûts de formation,
- les droits d'auteur pour les informations spatiales numérisées,
- le temps souvent important entre la mise en place du système d'information et l'apparition de bénéfices pour l'organisation.

Dans le même esprit, Biswell *et al.* indiquent que les principales contraintes à l'utilisation des SIG pour la gestion des données issues des fouilles sont la qualité des données collectées sur le site, ainsi que les restrictions financières. Ils concluent que le manque de cadre théorique (standards, normes) bien développé dans lequel entreprendre des

[44] *Royal Commission on the Historical Monuments of England*

analyses spatiales à l'échelle du site est un facteur contribuant au fait que les SIG étaient peu utilisés pour ce genre de travaux [Biswell et al., 1995].
Pour parer à ces difficultés, les systèmes libres dont on parlait dans la première partie de ce chapitre sur les SIG peuvent apporter quelques solutions, même si le coût (en terme de temps surtout) de la numérisation des données est un passage obligé pour l'utilisation de systèmes informatiques pour gérer des données réalisées de manière analogique. On peut surtout relever dans la conclusion de Biswell que des solutions peuvent être trouvées grâce à la mise en place de standards et par la proposition, par des organismes nationaux voire mondiaux, de fichiers de recommandations pour les personnes souhaitant mettre en place des SIG pour la gestion de leurs données fouillées. Comme dans le cas des bases de données, un certain nombre d'organismes (les mêmes que ceux cités précédemment) proposent des "guides de bonnes pratiques" pour la conception et l'utilisation des SIG en archéologie, à l'échelle du territoire notamment.

Les standards sont un aspect important de tout travail lié aux Systèmes d'Information, Géographique plus particulièrement. Ils définissent la saisie, la description et le transfert d'informations. Spatialement, une carte est en quelque sorte une norme pour la description du monde réel. Bien que les cartes soient réalisées de manière à avoir un aspect le plus naturel possible, toutes s'appuient sur des symboles ou des conventions pour transmettre les informations. Quelques conventions de configuration sont assez intuitives, mais les symboles auront souvent peu de pertinence pour quelqu'un qui n'a pas été formé pour interpréter ces conventions. Pour être employés couramment et compris, les standards doivent donc répondre à un besoin de la communauté des utilisateurs, ils doivent être communiqués efficacement et être largement adoptés. Les initiatives pour la création de normes peuvent aussi favoriser les rapprochements dans la communauté pour améliorer la coordination et l'attention portée aux nouveaux développements. Par exemple, le fait de créer des catalogues de jeux de métadonnées sur ce qu'est l'information numérique et les critères de qualité, peut permettre d'éviter de dupliquer les efforts de définition de telles notions [Lang, 1997]. Les activités menées actuellement utilisent de plus en plus de standards, ce qui permet d'encourager le partage d'expériences entre toute la communauté "géospatiale".
Pour l'information géographique en particulier, depuis deux décennies, des standards ont émergé grâce à un certain nombre d'organismes de standardisation nationaux ou internationaux, comme le Comité Européen de Normalisation CEN, le *British Standard Institut* BSI ou bien sûr l'Organisation Internationale des Standards ISO (*International Standards Organisation*).
Les standards peuvent servir à :

- promouvoir et élargir l'utilisation de l'information géographique,
- augmenter la compatibilité entre différents jeux de données,
- simplifier le transfert de données entre différentes sources,
- fournir une assurance de qualité sur les données,
- réduire les coûts.

Ils spécifient ou fournissent des règles et des directives pour des processus répétés couramment afin de parvenir à des résultats cohérents, qui peuvent alors être communiqués

entre fournisseurs et utilisateurs. C'est en cela que les standards peuvent permettre d'aider les archéologues pour l'utilisation des SIG à l'échelle d'un site, en leur fournissant des conseils et des marches à suivre pour créer de l'information échangeable, de qualité et à moindre coût. Cependant, il faut toujours être conscient du fait que tout standard adopté aujourd'hui peut devenir obsolète et inefficace demain : tout format standardisé doit donc être suffisamment flexible et ouvert, tout en conservant les avantages de la standardisation en terme de cadre cohérent permettant d'automatiser les recherches et extractions d'informations [Schloen, 1999].

Comme pour les bases de données, l'ADS[45] (entre autres) fournit des recommandations pour favoriser la création de SIG standardisés en archéologie. Dans le guide intitulé *GIS Guide to Good Practice* [Gillings et al., 1998], les recommandations concernent : les modèles de données spatiales, les modèles de données attributaires, les techniques de saisie des données (digitalisation, scannérisation), les sources de données spatiales et attributaires, la façon de créer une base de données pour un SIG, la documentation des jeux de données et les formats de données acceptés dans les SIG utilisés en archéologie. Nous allons détailler rapidement les modèles de données, ainsi que les conseils pour la création des bases de données et la documentation, car lors de la conception de notre Système d'Information nous avons veillé à suivre ces recommandations le plus possible. Les modèles de données spatiales peuvent être divisés en deux catégories : les modèles vectoriels et les modèles raster. Pour les modèles vectoriels, il faudrait toujours enregistrer les informations suivantes pour assembler, compiler et utiliser des données vectorielles :

- le type de données : point, ligne ou surface ;
- le type de topologie que le fichier contient ;
- les détails de tout traitement automatique des vecteurs qui pourraient être appliqué ;
- l'état de la topologie dans le fichier ;
- le système de projection ;
- le système de coordonnées.

Pour l'utilisation des données raster d'un autre côté, il faudrait toujours conserver :

- la taille de la grille (nombre de lignes et de colonnes contenant les pixels de l'image) ;
- la résolution de la grille (taille du pixel) ;
- les informations de géoréférencement (coordonnées des points de contrôle, projection).

Par ailleurs, s'il s'agit de structurer et organiser une base de données attributaires flexible et utile, les facteurs suivants sont très importants :

- les conventions de désignation (noms) ;
- les clés (primaires) ;
- la définition de champs caractéristiques ;
- les références de grille ;

[45] *Archaeology Data Service* (Université de York)

- la validation ;
- les données numériques ;
- les contrôles lors de l'enregistrement des données ;
- les valeurs de confiance ;
- la cohérence ;
- la documentation ;
- les dates.

Ensuite, concernant les sources de données spatiales[46] et attributaires[47], le guide donne également les informations qui doivent être obligatoirement enregistrées. Ceci permet d'assister la création et la structuration des fichiers de métadonnées pour qu'ils soient complets et standardisés. Pour les sites que nous avons traités avec notre proposition de Système d'Information, nous avons structuré les métadonnées en respectant au maximum les informations relevées dans ce guide.

Concernant la création des bases de données destinées à être utilisées par un SIG, il s'agit de combiner et d'intégrer des informations provenant de sources très différentes (comme on a pu le constater dans les énumérations ci-dessus). Pour ce faire, les points suivants doivent être gardés à l'esprit :

- toutes les données spatiales doivent être enregistrées dans le même système de coordonnées. Si certaines données ne sont pas dans le même système que les autres, ces données doivent être transformées et/ou projetées dans le système requis ;
- toutes les données spatiales doivent être à la même échelle ou résolution spatiale. Il faut surtout faire attention si on veut combiner des données vectorielles et raster (provenant de scans de cartes par exemple) parce que si l'échelle de la carte papier était petite au départ, elle comprenait des généralisations dont il faut être conscient si on la combine par la suite à des données vectorielles beaucoup plus précises ;
- si des informations non-spatiales doivent être combinées ou intégrées aux informations géographiques, elles doivent utiliser les mêmes résolutions de terrain, les même codes, etc. Si des schémas ou modèles différents sont utilisés, il sera nécessaire de convertir ou de traduire ces données pour qu'elles s'accordent à ces schémas.

Pour finir avec les recommandations, documenter les jeux de données est essentiel. Nous avons déjà insisté préalablement sur le caractère indispensable de la conservation du contexte des données enregistrées. L'une des choses les plus importantes à enregistrer lors de la conception et de l'utilisation d'un SIG est donc l'ensemble des renseignements sur la provenance, le contexte ou le mode d'acquisition de la donnée. La liste suivante n'est pas exhaustive mais elle permet d'avoir une idée de ce qu'il peut être nécessaire d'enregistrer durant la création, la collection et l'utilisation des données :

[46] cartes, plans, données numériques ou textuelles, données digitalisées, photographies aériennes, images satellitaires, relevés issus de la topographie de terrain, données GPS, etc.

[47] indexes papier, archives de sites archéologiques et de relevés, rapports textuels ou articles de journaux internationaux, archives sur microfiches, interprétations d'études géophysiques, analyses morphologiques à partir de photographies aériennes, sources d'information photographiques, bases de données typologiques, types d'artéfacts, bases de données d'autres organismes ou de musées, etc.

- le matériel informatique utilisé ;
- les logiciels utilisés ;
- les dates importantes pour les données (création, traitement, enregistrement...) ;
- l'auteur de la donnée ou du travail sur la donnée ;
- la provenance de la donnée (achat...) ;
- l'échelle ou la résolution de saisie des données ;
- l'échelle ou la résolution à laquelle les données sont actuellement stockées ;
- les erreurs moyennes quadratiques ou autres évaluations de la qualité des données ;
- les buts de la création du jeu de données, s'ils sont connus ;
- la méthode de relevé des données originales (station totale, GPS, laser) ;
- les buts que le commanditaire du SIG poursuit par l'acquisition des données ;
- l'histoire complète concernant la propriété et les droits sur les données.

Ces recommandations sont bien sûr contraignantes, mais elles visent à la création de systèmes aussi complets et transportables que possible. Elles ne constituent pas une obligation, mais plutôt une marche à suivre, un guide. Comme indiqué précédemment, nous avons essayé d'appliquer la majorité des conseils donnés pour la conception des bases de données (cf. 1.1.2) et des SIG lors de la création de notre système. Nous y reviendrons dans le tableau récapitulatif du Chapitre 3, où nous verrons notamment les distances qu'il faut prendre par rapport à ces recommandations pour un SIG, sachant que nous avons conçu un SI n'intégrant pas que des données spatialisées ou "spatialisables".
Dans la section suivante, nous donnerons des exemples de conception de Systèmes d'Information Géographique à différentes échelles pour l'archéologie.

1.2.3 Exemples de SIG réalisés pour l'archéologie

Très généraux ou plus particuliers, ces exemples de projets permettent de voir les différentes utilisations possibles des Systèmes d'Information Géographique dans ce domaine.

1.2.3.1 SIG à l'échelle du territoire

***The Egyptian Antiquities Information System* EAIS.** Le Conseil Suprême des Antiquités Egyptiennes (SCA) a mis en place un projet à long terme (2000-2007) ayant pour but la création d'un SIG bilingue (anglais/arabe) pour la gestion des sites historiques de l'Egypte : le projet EAIS[48]. Ce SIG est un outil qui augmente la capacité du SCA à cartographier, documenter et enregistrer les sites archéologiques du pays. Le problème principal pour la gestion des sites en Egypte est

[48] `http://www.eais.org.eg/[réf.du14mars2007]`

qu'ils ne sont pas systématiquement localisés sur des cartes officielles ou rassemblés dans des bases de données au fur et à mesure qu'ils sont découverts et fouillés. Par rapport à cela, le SIG permet au SCA d'intégrer des informations concernant les sites dans des planifications pour l'utilisation des sols par exemple, ou dans des activités de prises de décisions. Cela peut également permettre de prévoir les besoins en systèmes de protection des sites archéologiques. En effet, il ne peut pas y avoir de relations efficaces entre le développement du pays (en terme d'utilisation des terres), la gestion des sites et les travaux de fouilles sur les sites sans un système d'information fiable pour tous les sites historiques du pays. Pour que le SIG soit viable, il est nécessaire d'intégrer les informations, les plus à jour et les plus précises possibles, de toutes les différentes institutions et groupes travaillant en Egypte. Par exemple, la majorité des cartes sont fournies par l'"Autorité de Relevé de l'Egypte" (service topographique national), le SCA partage des données légales et les archéologues sont priés de fournir des données archéologiques sur leurs sites, à l'aide de différents rapports pré-formatés qui leur sont fournis lorsqu'ils sollicitent l'autorisation de fouiller le site. Ces fiches à compléter permettent de garantir aux missions archéologiques que les informations qu'elles donnent au SCA pour le projet EAIS seront immédiatement incorporées dans le SIG, qu'elles seront directement traitées et qu'elles auront un impact sur la protection du site.
D'un point de vue technique, le SIG a été développé dans le logiciel ArcView 9.1, avec l'extension Spatial Analyst pour la manipulation de certaines données et Adobe Photoshop pour améliorer les images. La base de données est actuellement transférée de Microsoft Access 2003 à SQL Server 2000, avec utilisation de VB.NET 2003 comme interface. Pour la communication des données, les publications sont faites de manière classique dans des livres comprenant de grandes cartes et un CD pour un accès numérique à certaines données.
La qualité de la base de données est assurée par le fait que des métadonnées standardisées sont utilisées aussi bien lors de la collecte des données que lors de la conception de la base : les données ont été analysées et des standards ont été adoptés pour chacune d'elles. Les données sont également contrôlées et révisées par des archéologues experts de l'EAIS et du SCA. Il y a des contrôles qualité qui sont pratiqués périodiquement sur les données de la base de données archéologiques et les procédures de contrôle sont continuellement mises à jour.
EAIS est le SIG officiel du SCA : il inclut donc tous les sites gérés par le SCA (dont il est propriétaire, qu'il supervise ou qu'il a enregistré), mais aussi les sites qu'il a cédé à d'autres organismes (parce qu'ils n'avaient pas de signification archéologique particulière par exemple) ou des sites non enregistrés (qui auraient été trouvés lors des recherches pour le projet EAIS mais que le SCA ne connaissait pas avant par exemple).

La carte archéologique de la France. Dans le même ordre d'idée que le projet EAIS en Egypte, il existe en France la carte archéologique nationale qui rassemble et ordonne pour l'ensemble du territoire national les données archéologiques disponibles. Sa réalisation est une mission que l'Etat assure avec le concours des établissements publics et celui des collectivités territoriales ayant des activités de recherche archéologique. La conception de cette carte a été lancée très tôt en France, dès 1975, et son informatisation a commencé dès 1978. C'est une carte "géo-archéologique scientifique" qui répertorie les vestiges et les anciens paysages et décrit leur évolution, ainsi que leurs conditions d'enfouissement ou d'érosion. Dressée par les personnels spécialisés des services régionaux de l'archéologie (parfois avec la collaboration des collectivités territoriales), elle prend en compte plus de 350 000 sites archéologiques reconnus sur le territoire français. Elle s'enrichit chaque année, en moyenne, d'une vingtaine de milliers de sites ou indices de site. Devant à l'origine répondre tant aux besoins de la recherche qu'à ceux de la gestion administrative, elle vise maintenant un objectif peut-être moins ambitieux en apparence, mais aussi plus réaliste, qui est celui d'être un outil d'aide à la décision pour la gestion du patrimoine archéologique [Guillot, 1994]. C'est un instrument de travail fondamental pour la gestion du territoire et la prise en compte du patrimoine archéologique, notamment lors de l'établissement des documents généraux de protection du patrimoine - zonages, plans locaux d'urbanisme -, et dans le cadre des prescriptions archéologiques que les services de l'Etat peuvent être conduits à émettre lorsqu'ils sont saisis de projets de travaux affectant le sous-sol, le sol et les élévations. Cette carte doit indiquer si, pour un site déterminé, il y a ou non risque d'atteinte au patrimoine archéologique. Il s'agit surtout de réduire l'aléa archéologique. En effet, les informations enregistrées ne portent que sur les sites archéologiques déjà répertoriés ou sur les zones de forte présomption. Une grande partie du territoire n'a donc pas encore fait l'objet d'aucune prospection et demeure, de ce fait, susceptible de receler de nombreux vestiges.
Techniquement, deux applications informatiques ont été spécialement développées par le ministère de la culture comme outils de réalisation de la carte archéologique : DRACAR et SCALA. L'application DRACAR gère les données textuelles, autrement dit les fiches de site, mais aussi les demandes d'autorisations de fouille, les opérations archéologiques, les responsables d'opération, les lieux de dépôt du mobilier archéologique ou les dossiers d'aménagement du sol. L'application SCALA (Système de Cartographie Appliqué à l'Archéologie) a pour objectif de produire rapidement et facilement des cartes de localisation pouvant être confrontées ou superposées aux documents des dossiers d'aménagement du territoire, ainsi que des cartes thématiques et statistiques. Elle a été développée à la base avec le SIG Arc/Info [Guillot, 1994]. La carte archéologique nationale s'appuie aujourd'hui sur un SIG appelé Patriarche (PATRImoine ARCHEologique) [Buchsenschutz et al., 2004, Fromentin et al., 2006].

Un SIG pour construire la perception passée des paysages. Les recherches sur le paysage sont très importantes en archéologie pour tenter de comprendre les processus de socialisation des civilisations passées. Un article de Llobera[49] propose une méthode originale basée sur l'utilisation d'un SIG pour modéliser les "proéminences topographiques" du terrain et s'en servir ensuite pour essayer de comprendre comment les paysages étaient perçus [Llobera, 2001].
Les archéologues ont besoin de mettre en commun les attributs sociaux et structurant des témoins découverts avec les attributs incorporés dans le paysage. Llobera met en évidence un manque de méthodes formelles, dans les recherches archéologiques actuelles, dans lesquelles la perception du paysage serait un élément clef. Il propose donc un SIG pour définir et explorer un exemple particulier de perception du paysage : la "proéminence topographique". Il la décrit comme une fonction différentielle de hauteur entre un individu et son environnement, fonction appréhendée du point de vue de l'individu (Figure 1.5). Il a modélisé cette

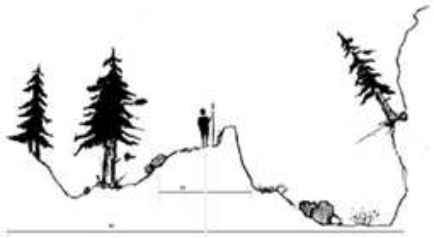


FIG. 1.5 – Changement de la proéminence topographique avec l'échelle [Llobera, 2001]

notion à différentes échelles et a détecté différents comportements selon des rayons de visibilité à divers endroits. Cela lui permet de produire des images montrant différents niveaux de proéminences par rapport à différents comportements de celles-ci. Il indique alors que de telles images peuvent donner de nouveaux aperçus des monuments archéologiques en combinant les informations obtenues par l'étude des proéminences topographiques avec des informations sur leur architecture, leur nature ou d'autres témoins archéologiques. Le SIG permet alors de répondre à des questions comme : quelles caractéristiques de l'objet archéologique conservent leurs proéminences partout dans le paysage ? est-ce que l'objet archéologique (cimetière en hauteur par exemple) était fait pour être vu de loin ou est-ce qu'il était plutôt destiné à être apprécié par une rencontre de proximité ?
Le but du travail de Llobera n'était pas de fournir une explication complète de la zone étudiée, mais d'utiliser les données disponibles pour illustrer le potentiel des SIG pour retrouver et combiner des informations qui n'auraient pas pu être systématiquement obtenues autrement. Il montre que le SIG est un outil capable de fournir de nouvelles informations qui, malgré son apparence "semblable à la

[49] Institut d'Archéologie, Collège Universitaire de Londres et *Donald Baden-Powell Quaternary Research Centre, Pitt Rivers Museum*, Département d'Anthropologie, Université d'Oxford

carte"[50], va beaucoup plus loin que ce qui peut être représenté et obtenu à partir de cartes de distribution traditionnelles. Le SIG permet en réalité de visualiser les données subtiles et relationnelles qui existent dans la nature (potentiel inexploité des SIG pour Llobera).

Un SIG pour la recherche archéologique urbaine. L'utilisation d'outils comme les SIG nécessite leur adaptation pour l'analyse des données archéologiques. Il faut procéder à une réflexion méthodologique préalablement à toute informatisation des systèmes de traitements archéologiques, et surtout ne pas se borner à une automatisation de certaines tâches. Cette remise en cause des méthodes utilisées jusqu'alors doit être l'occasion de les faire évoluer. Mettre en place un SIG sur un projet peut donc être très constructif, mais uniquement s'il ne s'agit pas de transférer simplement les données cartographiques manuelles à du DAO. L'utilisation des SIG ne doit pas se borner (comme c'est souvent le cas) à de la cartographie automatique. C'est ce que Rodier souhaite montrer dans un article présentant un SIG appelé Totopi[51], mis en place pour la recherche archéologique urbaine de la ville de Tours [Rodier, 2000]. L'idée est donc de se servir du SIG développé comme d'un outil de recherche pour la spatialisation des données archéologiques permettant de répondre à des questions d'analyse spatiale. Les thématiques de recherche du projet sont les suivantes :

- la topographie historique : typologie fonctionnelle des structures et chronologie ;
- l'analyse morphologique du parcellaire napoléonien de la ville ;
- l'évaluation du potentiel archéologique et la modélisation du dépôt archéologique.

Pour ce faire, toutes les couches du SIG ont été structurées tant pour les données graphiques que sémantiques. Pour les études sur la chronologie, une réflexion sur la gestion du temps dans les SIG a été menée. Nous avons déjà indiqué que le découpage par périodes peut être délicat (cf. 1.2.2), ce qui a été le cas lors du projet Totopi. La chronologie y a donc été gérée par quatre champs : date d'apparition et de disparition, et précision de ces datations. Le système est interrogeable par une entrée chronologique qui tient compte autant des éléments attestés que des incertitudes et des vides dans les plans. Concernant l'analyse morphologique, l'apport du SIG a été une automatisation de cette analyse pour la rendre systématique, ce qui permet d'être sûr d'avoir pris en compte toutes les lignes du parcellaire. Les hypothèses de travail peuvent donc être construites sur la base du traitement de l'ensemble des données brutes. Le SIG permet ensuite de tester ces hypothèses, d'affiner les résultats, de mettre en évidence des phénomènes, mais (Rodier insiste sur ce point) il ne se substitue en aucun cas au raisonnement ni ne remplace l'interprétation. Pour le dépôt archéologique, des modélisations par périodes ont été réalisées en tenant compte de la topographie historique et des destructions récentes. Il s'agissait d'obtenir au final, par périodes, une carte de "l'épaisseur chronologique" de l'occupation urbaine.

[50] *map-like*

[51] TOpographie de TOurs Pré-Industriel

D'un point de vue technique, le choix a été fait d'utiliser un logiciel fonctionnant sur un PC classique et manipulable simplement par des non-informaticiens. Les données d'imagerie ont donc été intégrées dans MapInfo (vectorisation manuelle d'images scannées ou de photos numériques, fichiers de points topographiques), et les données sémantiques dans des bases de données développées sous 4e Dimension et importées dans MapInfo.

1.2.3.2 SIG à l'échelle d'un site

Si les logiciels de DAO sont très utilisés pour le suivi et l'exploitation des fouilles, il y a au contraire très peu d'applications des SIG dans ce domaine particulier, comme nous l'avons déjà noté précédemment. Cependant, des personnes comme Powlesland [Lyall et Powlesland, 1996] et Arroyo-Bishop [Arroyo-Bishop et Lantada Zarzosa, 1995] se consacrent à l'intégration de données "intra-site" (enregistrements, analyses) dans des SIG depuis de nombreuses années, et proposent leurs propres logiciels.
Malgré les discussions de Biswell [Biswell et al., 1995] (que nous avons déjà évoquées) sur les limitations importantes de l'archéologie moderne et commerciale en terme d'intégration des SIG dans les pratiques existantes, il démontre cependant à l'aide de séries d'analyses spatiales réalisées à l'échelle "intra-site" que les SIG ont un fort potentiel par rapport aux outils de CAO habituels. De même, par rapport aux bases de données, Richards [Richards, 1998] indique que l'arrivée des SIG a poussé les archéologues à accepter le fait que d'inventorier des sites et des monuments archéologiques dans des bases de données implémentées dans des fichiers simples est une représentation inadéquate des espaces archéologiques. Les SIG lient les informations spatiales et les attributs des données archéologiques, ce qui permet de générer instantanément des cartes de distribution par exemple, et mène à une meilleure compréhension de la répartition des objets archéologiques sur le site.
Nous proposons dans la suite deux études qui permettent d'avoir un aperçu du potentiel des SIG pour l'archéologie à une échelle locale.

Des rapports archéologiques dans un SIG ? Un projet nommé InterPARES[52], visant à développer une base de connaissances théoriques et méthodologiques essentielles pour la conservation à long terme de rapports authentiques créés et/ou maintenus sous forme numérique, est en cours depuis 1999 (la deuxième phase sera finalisée à l'été 2007), mené par des organismes canadiens et américains. Dans ce cadre, une corrélation très forte a été détectée entre les rapports étudiés dans ce projet et les rapports résultants de travaux archéologiques. Une étude a donc été menée pour mettre en évidence l'opportunité d'exploiter les rapports archéologiques dans un SIG [Pearce-Moses, 2003]. Cette étude de cas a pour but premier d'examiner la nature des rapports d'activités archéologiques et ce que les archéologues eux-mêmes pensent des rapports qu'ils créent.

[52] *International Research on Permanent Authentic Records in Electronic Systems*

Le site archéologique est l'élément majeur de la recherche archéologique : c'est un lieu où des traces d'anciennes activités humaines sont trouvées, c'est l'archive de l'archéologue [Fagan, 1999]. Comme nous l'avons déjà noté préalablement, la contextualisation complète (spatialement et temporellement) des artéfacts trouvés sur un site est une condition majeure pour toute investigation archéologique. Ceci est accompli par la documentation complète du contexte des artéfacts, par des rapports écrits et des photographies. Les documents résultant des travaux sur les sites archéologiques sont donc nombreux et hétérogènes : notes, diagrammes, cartes, journaux de bord, rapports de fouilles, rapports de relevés topographiques, monographies, bases de données, tableaux, ou encore programmes informatiques spécialisés. Leur préservation à long terme est essentielle pour conserver la mémoire du site (généralement "détruit" à la fin des travaux de fouille), ou pour permettre à d'autres équipes d'y travailler plus tard. Malheureusement, la réattribution, la législation et l'expansion rapide des villes ont augmenté la production de rapports archéologiques devant être faits très rapidement et dont la conservation est menacée. Beaucoup de personnes sont donc en train de stocker ces rapports sur des médias instables et fragiles, qui ont besoin d'une attention supplémentaire pour éviter de les perdre définitivement.

Intégrer ces rapports dans un SIG peut alors permettre de les conserver numériquement et de fournir, en plus, des moyens de les exploiter dans le futur. Une fois les rapports intégrés dans un SIG, ils peuvent devenir des "rapports numériques interactifs" avec lesquels le monde archéologique peut se familiariser. Cependant, avant toute intégration dans un SIG, il faut comprendre comment le domaine archéologique définit la fiabilité, la précision et l'authenticité de tels rapports numériques. En effet, le format électronique peut changer le concept de rapport de beaucoup d'archéologues et leur manière de le gérer, ce qui peut alors affecter les qualités du rapport. Dans le cadre du projet InterPARES2, des enquêtes ont été menées pour étudier la faisabilité d'un tel SIG pour les rapports archéologiques. Les résultats seront publiés sous peu.

Le SIG comme interface entre prospection et fouille. La prospection et la fouille archéologiques ont le même objectif de recherche, à savoir, l'étude de la culture matérielle des humains. Elles participent des investigations des archéologues, mais sont basées sur des propriétés physiques différentes et travaillent à différentes résolutions et avec différents instruments. Un article de Neubauer[53] détaille l'utilité du SIG pour la prospection et pour la fouille, et explique en quoi un SIG intégrant à la fois des données de prospection et de fouille peut être intéressant pour les archéologues [Neubauer, 2004].

La prospection archéologique se fait le plus souvent à partir de photographies aériennes, en utilisant la photogrammétrie pour produire des cartes pouvant être très précises. Des méthodes géomagnétiques ou géoélectriques sont utilisées éga-

[53] Institut de Science Archéologique de Vienne, Service de la Prospection Géophysique, Vienne, Autriche

lement, de même que les techniques de radar GPR[54] pénétrant dans le sol pour des études géophysiques. Elles permettent d'obtenir des données sur l'intensité du champ magnétique terrestre, les résistivités apparentes du sol, ou les amplitudes de réflexion du radar, qui sont traitées par des techniques d'imagerie numérique pour visualiser les structures archéologiques invisibles ou les monuments enterrés dans le sol. On obtient donc des cartes détaillées des structures internes du site archéologique. Les interprétations archéologiques des visualisations produites (relevés photogrammétriques, images géophysiques), ainsi que toutes les autres données importantes, nécessitent des cartes et des descriptions précises qui peuvent être gérées efficacement par un SIG. Ces interprétations se basant sur la détection, la configuration et la description des structures archéologiques sont réalisées grâce au SIG en combinant toutes les données issues du travail de prospection. Le SIG peut également permettre de calculer des attributs pour les objets graphiques représentés sur les cartes, par exemple la surface d'une maison enterrée. Des analyses sur la distribution spatiale des structures détectées peuvent aussi être menées. Construire des données "SIG compatibles" à partir de tout travail de prospection est donc très intéressant pour les prospecteurs.

Concernant la fouille, l'archéologie est passée avec le temps d'un travail uniquement orienté sur les vestiges à un travail prenant en compte le contexte. Tout site archéologie est stratifié et chaque strate est unique. Le processus de fouille consiste à enregistrer chaque unité stratigraphique simple (dépôts et surfaces) avec ses attributs et relations, pour établir à partir de ces données une séquence stratigraphique, nommée communément "Matrice de Harris" [Harris, 1989]. L'analyse des témoins et des unités stratigraphiques simples, après les fouilles, permet de déterminer la structure et la chronologie de la séquence stratigraphique résultante. Les dépôts sont des volumes tridimensionnels qui sont détruits en les fouillant dans l'ordre inverse de celui dans lequel ils se sont déposés. Les témoins et les échantillons sont enregistrés dans un espace tridimensionnel en tant que points 3D, ou comme de petits volumes réduits ensuite à un ensemble de coordonnées. Les autres données relatives aux témoins peuvent être enregistrés dans une base de données (photos, dessins). Contrairement aux dépôts, les surfaces (aspects immatériels de la strate) peuvent être enregistrées intégralement. L'enregistrement des surfaces simples permet de reconstruire virtuellement le volume fouillé en trois dimensions. Il peut être réalisé par la documentation des limites de la surface et de sa topographie, ce qui la réduit à un jeu de coordonnées. Ces jeux de coordonnées, provenant des études des dépôts et des surfaces, sont les données primaires pour le SIG. Celui-ci permet alors de visualiser les surfaces comme des contours ou des réseaux triangulés (Modèles Numériques de Terrain MNT), de combiner les limites de surfaces avec les photos orthorectifiées des dépôts ou de placer des objets relevés dans les volumes modélisés représentant la séquence stratigraphique. D'autres fonctionnalités du SIG permettent la cartographie dynamique des surfaces ou la création de cartes de composition (montrant différentes phases du site, des sections

[54] *Ground-penetrating radar*

à différentes positions...). Les données secondaires comprenant les divers aspects (emplacement, matière, date...) des objets découverts sont aussi stockées dans la base de données spatiale du SIG et peuvent être combinées avec les visualisations graphiques afin d'être analysées et vérifiées.
L'intérêt de réaliser des SIG pour la gestion des données de la prospection et de la fouille est donc mis en évidence. Se servir d'un SIG unique pour gérer à la fois prospection et fouille devient alors évident. En effet, par l'interprétation archéologique des données de prospection, divers modèles archéologiques précis du site entier et du paysage environnant peuvent être faits rapidement. Ces modèles peuvent alors être utilisés pour réaliser des fouilles ciblées, afin de pouvoir ensuite condenser les informations et raffiner les modèles grâce aux modélisations précises issues des études de fouilles. La combinaison des données de la prospection et de la fouille dans un même SIG peut alors permettre au fouilleur aussi bien qu'au prospecteur de réaliser des analyses plus poussées. Cependant, pour aller plus loin dans les recherches, Neubauer indique que l'examen des opportunités de combiner systématiquement l'interprétation archéologique des données de prospection avec les données de fouilles nécessite des changements fondamentaux de la pensée archéologique. Cela pourrait remettre en cause les méthodes traditionnellement utilisées, ce qui risque d'être difficile à faire accepter. De plus, après plusieurs années de travaux sur ces deux disciplines essentielles de l'archéologie, il est clairement apparu que beaucoup d'aspects de l'héritage humain ne peuvent être rendus compréhensibles qu'en utilisant des procédures standardisées. Les fouilles ont été relativement standardisées grâce à la méthode stratigraphique (matrice de Harris...) et la prospection archéologique est en train de définir ses normes. Il reste à inclure dans les deux disciplines la compatibilité avec les SIG pour que les données résultantes puissent y être exploitées. En effet, combiner toutes les données appropriées dans un système d'information archéologique, basé sur les fonctionnalités des SIG, pourra fournir aux futurs archéologues une vaste gamme d'informations avant le début de leurs recherches. Une analyse "basée sur le SIG" des informations disponibles pourra aider à vérifier ou à remettre en question des théories existantes, aussi bien qu'à développer de nouvelles idées et à fixer des objectifs pour les recherches ultérieures. [Neubauer, 2001, Wheatley et Gillings, 2002]

1.2.4 Généralisation : Systèmes d'Information et 3D

Tous les exemples précédents ont permis d'illustrer les utilisations les plus courantes des Systèmes d'Information Géographique en archéologie. Même s'ils offrent de nombreuses possibilités de traitements pour les données spatiales issues de l'archéologie, ils ne permettent pas de couvrir tous les besoins des archéologues. En effet, des deux exemples que nous avons détaillés concernant la gestion des données "intra-site", nous pouvons relever le fait que les espaces fouillés sont tridimensionnels et que les données à traiter sont fortement hétérogènes (pas uniquement spatiales). Ces aspects sont dif-

ficiles à prendre en compte dans des SIG classiques. Pour une meilleure adéquation aux réalités archéologiques, notamment en terme de visualisation plus réaliste du site, il paraît nécessaire d'introduire la troisième dimension [Fronza et al., 2003]. De plus, les données résultant de l'exploitation d'un site archéologique sont de natures très différentes comme nous l'avons vu dans l'exemple du projet InterPARES précédemment [Pearce-Moses, 2003], et un Système d'Information plus "exclusivement" Géographique est une bonne solution pour offrir un moyen de gérer des informations qui ne seraient pas géolocalisées.
Par ailleurs, il y a peu de systèmes libres (cf. fin de 1.2.1) qui sont utilisés en archéologie ou conçus pour l'archéologie. On peut cependant citer quelques exemples ambitieux pour la gestion de données nationales, régionales ou locales :

- le *Corinth Computer Project*[55] de l'Université de Pennsylvanie, qui comprend notamment des relevés et des plans architecturaux des sites de la région, des modèles 3D filaires, des panoramas ou des vidéos accessibles sur le Web ;
- le projet JADIS *The Jordan Archaeological Database and Information System*[56] du Centre Américain de Recherches Orientales (ACOR), qui permet de conserver et de faire différents types de recherches spatiales sur les sites jordaniens, et est accessible de manière libre sur l'Internet ;
- le système *OpenArcheo* du Laboratoire d'Informatique Appliquée à l'Archéologie Médiévale (LIAAM) de l'Université de Sienne, qui est un système de management archéologique pour des relevés à l'échelle régionale jusqu'à l'enregistrement détaillé des témoins. Ce système couvre la plupart des domaines impliquant des outils numériques appliqués à l'archéologie, particulièrement les SIG "intra-site" et pour le paysage, la gestion des bases de données de tous les vestiges archéologiques, l'analyse spatiale, la production multimédia et la publication Web [Fronza et al., 2003].

Concernant la troisième dimension, elle est intéressante à introduire dans les SIG à toutes les échelles. Il faut cependant être conscient que si la culture séculaire de lecture des cartes [Jacob, 1992] est un atout majeur dans l'utilisation des SIG en archéologie, elle est aussi probablement un des obstacles à la constitution de SIG 3D. En effet, outre l'aspect représentation réaliste, la puissance d'un SIG est aussi liée à la représentation cartographique symbolique des données offrant une expression synthétique de l'analyse des données.
Malgré cela, à l'échelle du territoire, l'intégration de Modèles Numériques de Terrain (MNT) tridimensionnels permet de prendre en compte l'altimétrie du terrain pour comprendre, par exemple, l'emplacement d'un site ou les réseaux de circulation qui pouvaient y mener (vallées, dénivelées). Ces MNT peuvent être produits par photogrammétrie aérienne ou par lasergrammétrie aéroportée, techniques qui permettent d'obtenir un semis de points en trois dimensions pour réaliser, généralement par triangulation, un modèle du terrain aux alentours du site archéologique. Par exemple, la Figure 1.6 montre un MNT de l'Acropole à Athènes réalisé dans le cadre de la création d'un Sys-

[55] `http://corinth.sas.upenn.edu/corinth.html` [réf. du 20 mars 2007]
[56] `http://archaeology.asu.edu/jordan/JADISGIS.htm` [réf. du 20 mars 2007]

tème d'Information Spatiale pour le développement du site archéologique de Mycènes [Ioannidis et al., 2003]. Ce projet, réalisé dans le logiciel ArcView d'ESRI - avec son extension 3D Analyst qui contient des outils pour la visualisation 3D, l'animation et la navigation dans des modèles 3D texturés par exemple -, permet également la gestion de données diverses comme les plans 2D, le MNT et des vues 3D, des textes, des images numériques, et il contient aussi des systèmes de réalité virtuelle (promenades, survols). Ce Système d'Information propose donc une solution pour combler certaines lacunes des SIG classiques que nous avons citées plus haut.

FIG. 1.6 – Modèle Numérique de Terrain de l'Acropole [Ioannidis et al., 2003]

A l'échelle locale, pour s'intéresser au site archéologique lui-même (monument par exemple), la création de modèles 3D virtuels apporte une réelle valeur ajoutée pour la conservation et l'exploitation du site. La modélisation en 3D du monument d'après des documents anciens par exemple, peut permettre par la suite de procéder à des travaux de rénovation ou de reconstruction de l'objet patrimonial tel qu'il était. Des simulations virtuelles de ces rénovations ou reconstructions sont donc possibles avant les travaux sur site, et peuvent être une aide à la décision pour les archéologues et architectes. En plus de la conservation numérique à long terme, la production de modèles 3D a donc beaucoup d'applications concrètes. Ils peuvent également servir pour des présentations interactives et pour la muséographie autour du site archéologique (nous y reviendrons dans le Chapitre 2).
A titre d'exemple, nous pouvons citer l'application qui a été faite d'un projet de SIG tridimensionnel nommé DILAS[57] à des projets archéologiques et patrimoniaux [Wüst et al., 2004]. Les buts initiaux de ce SIG 3D étaient la génération efficace, la gestion et la visualisation de modèles 3D de paysages et de villes. Ainsi, ce SIG était fait pour la gestion d'objets 3D de géométrie généralisée, à de petites et moyennes échelles. Pour l'application à des projets archéologiques à l'échelle locale, il a fallu prendre en compte les spécificités de ce domaine, comme notamment la sémantique des objets à modéliser, la géométrie d'objets complexes et les textures photo-réalistes, l'intégration de bases de données existantes et les aspects temporels. Le support des objets 3D dans DILAS est donc basé sur un modèle de données 3D topologique orienté objet, géré dans

[57] *Digital Landscape Server*

un SGBD relationnel objet. DILAS contient un support sémantique riche au niveau de l'objet et de l'élément. Le système est construit sur la base d'une architecture SGBD spatiale (Oracle Spatial), et peut se servir de l'indexation spatiale et des fonctionnalités de requêtes disponibles dans les SIG 2D classiques. Cette architecture a été étendue pour supporter des objets 3D complexes, par exemple des bâtiments composés de leur "enveloppe" extérieure et des différents types d'objets intérieurs. DILAS a donc permis de générer par exemple un modèle 3D à haute résolution et réaliste du château de Wildenstein en Suisse (Figure 1.7), qui intègre l'intérieur et l'extérieur du château, de même que son environnement. Ce modèle a été réalisé par photogrammétrie aérienne pour l'extérieur, lasergrammétrie terrestre et tachéométrie pour l'intérieur. Le projet a révélé un certain nombre d'avantages d'un SIG 3D sur une solution à base de fichiers CAO, comme la possibilité de charger une ou plusieurs pièces ou des parties du bâtiment depuis la base de données, à partir d'une sélection de différents attributs comme l'étage, le type de pièce ou les matériaux de construction. A une échelle un peu plus étendue, un tel projet peut également permettre d'explorer et d'analyser par exemple une ville ancienne ou les conflits potentiels qu'il peut y avoir entre un site archéologique et une ville moderne qui s'y serait implantée. Cependant, pour expliquer que de tels systèmes ne sont pas encore très répandus, Wüst *et al.* soulignent que la difficulté majeure pour la réalisation de SIG 3D pour des édifices archéologiques est la complexité architecturale lorsqu'il s'agit de créer le modèle 3D.

FIG. 1.7 – Modèle 3D du château de Wildenstein [Wüst et al., 2004]

Concernant l'architecture, réaliser des modélisations tridimensionnelles du patrimoine architectural est beaucoup plus répandu que de réaliser des modèles 3D de sites archéologiques. Il y a donc plus de recherches autour de la 3D pour l'architecture que pour l'archéologie. Cependant, ces deux domaines sont proches, ils touchent tous les deux au patrimoine au sens large, et on peut donc penser qu'un certain nombre de résultats de recherches menées pour l'exploitation du patrimoine architectural peuvent

être transposés à l'exploitation du patrimoine archéologique. Notamment en terme de représentation des connaissances relatives aux édifices patrimoniaux et à leurs évolutions architecturales, des programmes de recherches sont menés depuis de nombreuses années, comme ARKIW qui est un programme de coopération et d'échanges scientifiques entre le laboratoire MAP-Gamsau (CNRS) et l'institut HAiKZ de la faculté d'architecture de Cracovie (Pologne). La problématique de ce programme est centrée sur l'analyse du corpus architectural et urbain de la ville de Cracovie et de son évolution. Les travaux qui ont été menés dans ce cadre ont été divisés en trois volets : identifier et organiser les concepts à manipuler, en représenter des instances sous la forme de maquettes numériques, gérer des bases documentaires dans lesquelles ces mêmes concepts sont présents [Blaise et al., 2001]. Les aspects de ce programme qui pourraient être transposés à un système dédié à l'archéologie concernent :

- l'intégration de toutes les données documentaires disponibles pour réaliser les modèles tridimensionnels des édifices ;
- l'idée que toute documentation architecturale est relative à un édifice, ce qui implique nécessairement au moins un lien entre eux ;
- et par conséquent la question suivante : est-ce que le modèle 3D de l'édifice peut être utilisé comme interface d'accès à la documentation architecturale ?

Ce dernier point est très important dans le sens où si l'on considère les scènes 3D comme des interfaces, de nombreux traitements et visualisations sont possibles :

- la mise en évidence de la nature hypothétique de la scène proposée ;
- la visualisation des documents qui la justifient ;
- le traitement de représentations multi-échelles ;
- ou le traitement des évolutions de l'édifice dans l'espace et dans le temps.

Les modèles 3D d'édifices, considérés comme les interprétations des connaissances des architectes, peuvent être efficaces pour retrouver des informations (documentation) sur les évolutions architecturales [Blaise et al., 2002]. Des systèmes d'information architecturale peuvent donc être conçus, qui regroupent à la fois les modèles architecturaux et les ressources qui s'y attachent [Blaise et al., 2004]. De tels systèmes d'information peuvent aussi être réalisés pour visualiser et gérer les informations relatives à un site archéologique que l'on aurait modélisé en trois dimensions. Ainsi, la notion de SIG s'étend à celle de SI quant à la gestion de documents divers non nécessairement spatialisés. De plus, l'interface d'accès aux données n'est plus seulement sous forme de requêtes et de visualisation des résultats des requêtes, mais c'est par le modèle 3D également que des requêtes peuvent être implicitement composées suivant l'endroit du modèle choisi. Le modèle 3D peut alors aussi servir de système de représentation des connaissances sur le site, par la mise en évidence du degré de certitude des éléments modélisés par exemple (nous y reviendrons dans les exemples de visualisation dans la partie 2.1.3).

Pour la gestion de données hétérogènes, d'autres chercheurs du même laboratoire de l'UMR MAP[58] ont développé des systèmes fonctionnant aussi sur la base de maquettes tridimensionnelles utilisées comme interfaces de requêtes, dédiés cette fois à l'archéo-

[58] Modèles et simulations pour l'Architecture, l'urbanisme et le Paysage

logie sous-marine [Drap et al., 2003]. En effet, si la représentation 2D suffit à rendre compte du travail archéologique en ce qui concerne une échelle urbaine ou plus petite, il n'en est pas de même quand les études sont menées à l'échelle de l'édifice ou dans ce cas du navire. Le besoin de représentation 3D est alors primordial et la compréhension globale de l'étude passe par ce type de représentation. Dans ce projet, la gestion des diverses données, problème omniprésent en archéologie, est traitée sous deux aspects : le premier purement textuel et le second dans l'optique du géoréférencement des objets archéologiques, ces deux approches étant disponibles au travers du réseau Internet[59]. Le premier aspect, plus traditionnel, permet grâce à une interface textuelle, les opérations classiques sur un SGBD. Le géoréférencement implique un point de vue étroitement lié à la connaissance que l'on a des objets manipulés. L'utilisation d'une maquette 3D comme interface au SGBD permet alors d'allier les informations purement documentaires (bibliographie, observations diverses faites lors de sa découverte, photographies) à une représentation 3D de l'objet. Cette expression graphique de l'objet s'appuie sur le contenu de la base de données (position, orientation, dimension) et sur les connaissances génériques de l'objet (forme théorique, valeurs par défaut, relations entre divers objets). La maquette 3D, générée par le système, représente le modèle générique de l'objet, défini par l'archéologue, dimensionné par une mesure photogrammétrique et à ce titre est une interface pertinente entre l'utilisateur et le SGBD [Drap, 2001]. Nous verrons dans le Chapitre 6 que le Système d'Information que nous proposons s'appuie sur certains développements réalisés pour ce projet.

Conclusion

Les SIG apparaissent comme des outils très performants dans l'aide à la recherche et à la présentation des données archéologiques, par la composante cartographique mais aussi heuristique qui apporte en outre le test progressif des interprétations. Auparavant indépendantes, les bases de données archéologiques, la topographie, la cartographie, les représentations stratigraphiques ou architecturales (tridimensionnelles) se trouvent repositionnées dans un véritable espace géographique et temporel, sous la forme d'un système d'information cohérent interrogeable par le chercheur.
A ce stade, on peut résumer ce qu'il est possible d'attendre d'un SIG. De manière très générale, un SIG se doit de répondre à un certain nombre de questions élémentaires liées à la gestion et à la relation des objets localisés dans l'espace quelque soit l'échelle du phénomène étudié [Aubry et al., 2004]. Par exemple :

- Analyse thématique : où se trouvent tous les objets d'un même type ?
- Inventaire localisé : qu'y a-t-il à cet endroit ?
- Analyse spatiale : comment ces deux types de données sont-ils liés ?
- Analyse temporelle : comment tel phénomène évolue-t-il dans le temps ?
- Modélisation : quelles seraient les conséquences si tel scénario se produisait ?

[59] On retrouve ici le besoin de système libre, car dans ce cas le travail a été fait en collaboration avec des équipes d'archéologues dispersées, et plusieurs acteurs étaient susceptibles de vouloir consulter simultanément les données, voire de les réviser.

Comme nous l'avons illustré par les différents projets présentés précédemment, ces questions sont tout à fait pertinentes pour le traitement des données archéologiques. Là où il est nécessaire d'analyser les rapports entre des données de tout type ayant des attributs spatiaux, les SIG peuvent fournir une solution efficace et rapide, et des résultats qui auraient peut-être été impossibles à obtenir d'une autre façon. En effet, les analyses requises sont souvent plus simples à mettre en œuvre visuellement et les SIG, qui permettent de visualiser des couches de données et leur intégration, sont donc des outils très puissants pour la gestion et l'analyse des données, ouvrant de nouvelles perspectives de recherche. Le SIG libère les données des contraintes de la base de données, car celle-ci devient un satellite du système qui permet alors d'accéder à tous les autres jeux de données disponibles, visuels et textuels, et fait de la carte la clé d'accès aux données enregistrées dans la base de données. Comme on l'a vu, le modèle 3D du site archéologique peut, comme la carte (et en complément d'elle), offrir un accès aux informations de toutes natures relatives au site. On peut alors produire des SI potentiellement très intéressants aussi bien pour les professionnels (archéologues, conservateurs) que pour le grand public (visiteurs des sites et des musées, Internautes).
Il faut cependant être conscient que, bien que les SIG (commerciaux et à une échelle territoriale surtout) soient depuis une dizaine d'années très utilisés pour l'analyse spatiale en archéologie et suscitent des apports incontestables, ce phénomène s'apparente également à un effet de mode face auquel les principaux acteurs de ce mouvement (notamment le réseau ISA dont nous avons parlé plus haut, cf. 1.2.2) ne cessent de mettre en garde [Barge et al., 2004]. En effet, l'accès à de puissants outils de calcul, facilité par leur disponibilité en micro-informatique avec des interfaces identiques aux logiciels bureautiques courants, donne parfois des résultats qui ne peuvent être produits que par des traitements manifestement incontrôlés. Leur usage ne constitue un progrès que lorsqu'il est maîtrisé, c'est-à-dire quand les fondements des outils utilisés sont compris et qu'il ne s'agit pas d'utilisation «presse-bouton» [Rodier, 2006].

Dans le chapitre suivant, nous aborderons plus en profondeur les notions de visualisation et de documentation des données archéologiques, car créer un Système d'Information permet de représenter ces données mais ne prend pas forcément en compte les besoins spécifiques des archéologues en terme de visualisation de leurs données et de documentation. Nous nous poserons notamment la question de la différence entre publication et documentation des données dans ce domaine particulier.

Chapitre 2

Visualisation et documentation des données archéologiques

Dans ce deuxième chapitre, nous détaillerons les notions de visualisation et de communication des données archéologiques. Plus particulièrement, nous verrons dans quels buts les modèles tridimensionnels sont utilisés actuellement en archéologie, et la manière dont les archéologues documentent leurs données au moyen de ces nouveaux outils de visualisation.

2.1 Outils de visualisation utilisés en archéologie

2.1.1 Généralités

L'un des apports majeurs de l'utilisation des moyens informatiques actuels en archéologie est certainement la possibilité de visualiser les données archéologiques de manière tout à fait différente de ce qu'il était possible de faire auparavant. Par visualisation, nous entendons toutes les exploitations de données par des moyens graphiques [Richards, 1998].

Historiquement, le premier vecteur de visualisation des informations archéologiques est l'image. Le rôle de l'image dans cette discipline est essentiel, car elle constitue un élément fondamental dans le processus de la recherche [Ginouvès et Guimier-Sorbets, 1992]. L'archéologie s'applique effectivement à l'étude des documents du passé, documents matériels qui occupent un volume dans l'espace, avec des formes, des couleurs, éventuellement un décor, toutes choses qui peuvent être représentées en images. C'est pourquoi

il est essentiel de garder le plus d'images possible d'une fouille, qui conserveront le maximum d'informations : pas simplement des photographies de chantier qui fixent un moment dans l'évolution d'une recherche complexe, mais des images qui permettront éventuellement de retrouver, après coup, des indications auxquelles on n'avait pas prêté attention sur le moment et dont l'intérêt n'apparaît que par la suite. L'image contient toujours beaucoup plus d'informations qu'une description, aussi précise soit-elle. Par exemple, la coupe stratigraphique fixe déjà un moment de la fouille, en traduisant une réalité très riche dans une image claire où s'expriment les successions de l'histoire, mais il faut en plus beaucoup de photographies sur lesquelles on trouvera éventuellement un jour ce que d'abord on n'avait pas cru utile de noter. Le rôle de l'image dans ce cas est l'enregistrement : le dessin permet de mémoriser une réalité interprétée et la photographie (dont la richesse n'a pas toujours été bien comprise) traduit une réalité plus complexe. Mais cette fonction de mémoire n'est pas la seule utilité de l'image. En effet, elle n'a d'intérêt que dans une perspective de travaux ultérieurs (datation, localisation, interprétation) et dans une perspective comparative, car la perception des ressemblances et des différences se fait plus rapidement à travers la comparaison d'images qu'à travers la comparaison de descriptions. On entrevoit ici la richesse de l'iconographie : l'image du chercheur s'applique à une image créée dans le passé, qui porte elle-même une richesse d'information considérable, non seulement par ce qu'elle représente, mais également par la manière dont elle le représente [Ginouvès et Guimier-Sorbets, 1992].

L'image peut aussi être utilisée pour représenter ce qui n'existe plus ou ce qui n'existe pas encore. Dans le premier cas, on parle d'image de restitution, représentation imaginée de l'état ancien d'un bâtiment par exemple, qui permet de tester les hypothèses faites à partir des parties conservées. Le rôle de l'image est très important dans ce cas, car une restitution est invérifiable en dehors de tout essai graphique. Dans le deuxième cas, l'image sert de représentation du projet d'une possible reconstruction matérielle du bâtiment. Aujourd'hui ces images de restitution ou de reconstitution sont le plus souvent des images de synthèse permettant la visualisation de formes complexes dans l'espace. Des techniques comme la CAO permettent de reconstituer des volumes éventuellement disparus dans l'espace et de les présenter tels qu'ils devaient apparaître à une distance et selon une perspective bien précises. La réalité virtuelle permet ensuite de circuler dans les monuments reconstitués en 3D, pour encore une fois aider les chercheurs à tester leurs hypothèses. Il faut ici faire la distinction entre image de synthèse et image 3D. D'après les définitions de Sapin en 1994 dans un numéro du "Médiéviste et l'Ordinateur" consacré à "l'informatique et l'archéologie" [Sapin, 1994] :

- une image de synthèse est la représentation informatique issue de calculs destinés à la modélisation, c'est-à-dire la construction sous forme compréhensible par l'ordinateur, des objets tridimensionnels que celui-ci va permettre de visualiser et de manipuler ;
- tandis que, si la représentation infographique en deux dimensions suppose la mémorisation d'une image plane, en 3D toutes les faces d'un objet (même invisibles à un moment donné) sont codées et mémorisées en X, Y, Z. Ainsi, il est possible de faire tourner l'objet et de le voir sur toutes ses faces.

Il faut donc veiller à ne pas confondre l'image de synthèse et l'image 3D, que l'on appelle plus communément modèle 3D. L'archéologue se sert de ces deux types d'images pour explorer les limites de la connaissance de son site, grâce à la concrétisation visuelle de ses restitutions demeurées jusqu'à présent virtuelles dans sa tête. Cependant, Sapin insiste sur le fait que la réalisation d'images virtuelles d'un site n'est une démarche intelligente que si l'archéologue ne se contente pas de suivre, mais précède et accompagne le fabriquant de l'image. Il est nécessaire que la réalité archéologique, et surtout la fragilité de cette réalité qui doit être inlassablement interrogée par rapport au terrain, soit prise en compte strictement et fidèlement dans les images de synthèse et les modélisations 3D pour que celles-ci soient le plus juste possible. Il y a donc une exigence scientifique à prendre en compte lors de la création d'images virtuelles, pour que le public sache se situer entre l'image et la réalité, et qu'il sache également se retrouver dans la réalité archéologique du terrain. L'utilisation d'images de synthèse ou 3D sur les sites archéologiques est un apport important pour aider l'archéologue à faire comprendre le site archéologique au grand public, car celui-ci voit non seulement se restituer la matière, mais également la dimension humaine avec un corps (le sien éventuellement) qui s'y déplace, mais il faut toujours traiter de la réalité scientifique et archéologique de l'image présentée. A titre d'exemple, lors de son projet sur les "talatat" d'Aménophis IV, Robert Vergnieux (Archéovision, CNRS) a été confronté au problème des restitutions virtuelles et de leur fidélité scientifique. Il a alors opté pour une solution s'attachant à introduire le minimum d'interprétation dans les restitutions, quitte à proposer parallèlement des hypothèses plus avancées mais en distinguant toujours le plus clairement ce qui est restitué à partir de traces visibles de ce qui n'est que pure conjecture [Vergnieux, 1996]. De même, Richards met en garde quant à l'adoption systématique de reconstitutions virtuelles des sites archéologiques, tout en reconnaissant qu'elles ont sans aucun doute une valeur importante dans la visualisation des sites par les archéologues et le grand public [Miller et Richards, 1995]. En effet, il est problématique de vouloir présenter le passé comme une réalité connaissable, alors que les reconstitutions sont obligatoirement faites d'hypothèses qu'il faut savoir mettre en évidence pour ne pas tromper les utilisateurs de l'image virtuelle. Il faut utiliser des mécanismes pour pouvoir représenter l'incertitude dans les visualisations proposées, par exemple par des jeux de transparence. De plus, pour des présentations muséographiques, il y a souvent dans les modèles 3D une omission de la complexité archéologique, ce qui ne permet pas de se rendre compte de la réalité du terrain dans la reconstitution virtuelle [Ryan, 1996].

L'utilisation de l'image (virtuelle ou non) en archéologie est donc variée et importante, aussi bien pour l'acquisition, la conservation et la restitution de connaissances. Elle est aussi indispensable à la diffusion des connaissances ; nous y reviendrons dans le prochain paragraphe (2.2). Cependant, même si beaucoup d'archéologues n'ont de contact avec les données tridimensionnelles que par l'intermédiaire des images fixes que les modèles 3D permettent de produire, et ne les voient que comme des outils de présentation, les modèles 3D eux-mêmes et les technologies de modélisation sont au moins aussi importants [Reilly, 1992]. En effet, un modèle 3D peut servir à voir l'objet modélisé sous toutes ses facettes, mais il peut également être un vecteur d'interactivité entre

l'archéologue et ses données (comme nous le verrons dans les exemples plus loin). De plus, les méthodes de modélisation utilisées en archéologie proviennent souvent d'autres domaines scientifiques et ne sont pas forcément adaptées aux besoins spécifiques des archéologues. Ainsi, si ceux-ci sont impliqués dans le processus de modélisation à partir de leurs sources de données, cela peut aboutir à des modèles beaucoup plus fidèles et rigoureux par rapport aux réalités du domaine. Pour rendre possible cette implication des professionnels de l'archéologie avec les professionnels de la modélisation, quelques recommandations ont là encore été rédigées pour la création et l'utilisation de la réalité virtuelle en archéologie.

2.1.2 Recommandations pour l'utilisation de la Réalité Virtuelle

Une fois encore, c'est dans la documentation réalisée par l'*Archaeology Data Service* (ADS) que l'on trouve un guide pour créer et utiliser la Réalité Virtuelle dans le domaine de la conservation du patrimoine, et plus particulièrement en archéologie [Austin et al., 2002]. Ce "Guide de Bonne Pratique" se concentre sur la réalité virtuelle accessible à tous, pouvant être distribuée et vue en ligne via le World Wide Web. Il s'intéresse à la variété des modèles de réalité virtuelle qui peuvent être produits, et à la manière dont on peut s'assurer que ceux-ci peuvent être fournis aux utilisateurs et préservés pour une réutilisation future. Il ne s'agit pas de référencer toutes les techniques pour faire de la réalité virtuelle, car les technologies évoluent très vite et de nouvelles apparaissent chaque jour, mais d'introduire celles qui sont utilisées pour la conservation du patrimoine et les standards qui émergent. Particulièrement, les stratégies d'archivage des modèles numériques sont abordées pour éviter la perte de ces modèles si les technologies changent.

La réalité virtuelle est un environnement informatique en trois dimensions (ou plus). Elle se distingue des autres systèmes de visualisation en 3D, comme les modèles issus de la CAO et des SIG, car elle inclut l'interactivité (comme nous l'indiquions plus tôt). L'utilisateur de la réalité virtuelle peut donc se déplacer dans l'espace tridimensionnel et peut être amené à interagir avec les objets qu'il y voit. Pour ce faire, il peut être "immergé" dans le monde virtuel de différentes manières : complètement, partiellement ou de manière "augmentée". Cette dernière façon consiste à accéder à une combinaison d'éléments réels et virtuels, en superposant l'information graphique et le monde réel (nous verrons un exemple par la suite). Comme nous l'indiquions plus haut, les deux principales applications de la réalité virtuelle sont la modélisation tridimensionnelle du monde réel, et la visualisation synthétique interactive avec de grandes quantités d'informations.
Lorsqu'il s'agit de réaliser des projets incluant de la réalité virtuelle, il y quelques aspects théoriques à prendre en compte. Ces considérations peuvent être divisées en deux points : (1) l'un concerne le besoin d'un niveau et d'un style de contenu approprié aux attentes de l'utilisateur, (2) l'autre touche au besoin d'utiliser un logiciel et les

mécanismes de diffusion correspondants. Le développeur de modèles de réalité virtuelle doit donc considérer à la fois l'information initiale et la technologie, pour adapter son travail aux besoins de l'utilisateur auquel le modèle est destiné.

(1) Concernant le premier aspect, pour passer de la donnée à l'information :

- il faut veiller à ce que le modèle de réalité virtuelle ne corresponde pas seulement aux besoins du développeur, mais qu'il remplisse également les exigences de l'utilisateur final ;
- il ne faut pas se laisser dérouter par des questions technologiques ou des perspectives centrées sur le développement du modèle, mais plutôt mener une analyse formelle des attentes de l'utilisateur ;
- il faut réaliser un système destiné à communiquer différents degrés d'information à l'utilisateur ;
- il s'agit de prendre un ensemble de données non-intelligibles (points, faces) et de les présenter sur un écran sous une forme interprétable par l'utilisateur ;
- il faut donc effectuer le processus de transformation de la donnée à l'information suivant : donnée + interprétation = information + utilisateur final (l'interprétation et l'utilisateur étant liés).

Ainsi, les images de réalité virtuelle, comme toutes les illustrations graphiques, sont des vecteurs pour élucider ou clarifier l'information pour l'utilisateur. Cette clarification n'implique pas forcément le réalisme ou la précision, car le but principal d'une illustration est de répondre aux besoins de l'utilisateur auquel elle est destinée. La clarification de l'information doit donc être faite avec le niveau d'abstraction et la manière appropriés à l'audience visée.

Ensuite, concernant l'information graphique plus particulièrement :

- il faut être conscient que l'interprétation des données graphiques est subjective (différentes personnes interprètent la même chose de différentes manières), et qu'il faut donc placer l'information dans un contexte approprié à chaque utilisateur ;
- il est très important de réaliser des systèmes se rapprochant de la manière naturelle dont l'homme interprète et communique les informations, pour que la perception de l'utilisateur soit améliorée (si l'utilisateur trouve plaisante l'interaction avec le système, alors la navigation et la recherche d'information seront plus efficaces) ;
- pour faire de la modélisation en réalité virtuelle comprenant des animations vastes et totalement tridimensionnelles et des systèmes de survol, il peut y avoir un problème de coût en terme de temps et d'argent pour la création, mais aussi en terme de temps de téléchargement et de pré-requis techniques pour l'utilisateur.

Ce sont donc les exigences et les moyens de l'utilisateur qui devraient guider toute conception graphique des modèles de réalité virtuelle, y compris la résolution des problèmes touchant à la technologie.

(2) On arrive ici au deuxième point des considérations théoriques à prendre en compte, c'est-à-dire l'utilisation de la technologie pour informer :

- il est facile de penser que la seule solution pour résoudre un problème informatique est d'avoir le dernier matériel, le dernier logiciel ou la meilleure expertise. Mais en réalité, les utilisateurs potentiels du modèle de réalité virtuelle n'auront pas accès au même matériel et au même logiciel que le développeur. Il faut donc que

le produit fourni corresponde aux moyens matériels de son utilisateur final ;
- les développeurs peuvent aussi être séduits par les capacités de plus en plus impressionnantes des logiciels graphiques, et penser que la "réalité" du modèle est quantifiée par sa proximité, en apparence et en mouvement, avec son homologue dans le "monde réel". Mais la réalité virtuelle est essentiellement un vecteur ou un intermédiaire graphique, dont la qualité ne dépend pas du "réalisme" mais de la capacité à faire passer le message souhaité.

Ainsi, il n'est pas nécessaire de tout montrer le mieux possible (ce qui est peu pratique et cher), mais il faut se conformer strictement (ni plus ni moins) à l'utilisation qui va être faite du modèle.
Pour finir, les mécanismes de livraison de la réalité virtuelle à l'utilisateur final sont également à considérer. Il faut comprendre les limitations techniques des utilisateurs, mais aussi le manque de formation à des outils informatiques complexes. En effet, les utilisateurs devront installer des modules externes ou "plugin" pour visualiser les modèles, ceux-ci pouvant être difficiles à trouver ou à installer (ce dont les développeurs ne sont souvent pas conscients). En outre, le modèle lui-même doit être téléchargé, le "plugin" peut ne pas être compatible avec la version du navigateur ou le système d'exploitation utilisé, et les capacités graphiques ou les installations de l'ordinateur de l'utilisateur peuvent donner un rendu de l'image inexact voire aucun rendu.
Pour conclure sur ces considérations pratiques, il faut donc s'assurer que les exigences techniques de la réalité virtuelle se conforment aux capacités d'utilisateurs "standard", même si elles n'y sont pas totalement incluses. La compréhension et la considération de l'utilisateur sont la clé du succès de tout projet basé sur la réalité virtuelle.

Concernant les "bonnes pratiques" pour créer des projets de réalité virtuelle pour le patrimoine, il s'agit de se poser deux questions : (1) pourquoi utiliser la réalité virtuelle (cela ne doit pas être systématique), et (2) comment définir son projet efficacement.
(1) Pourquoi utiliser la réalité virtuelle ?
Pour la restitution archéologique par exemple, l'utilisation de la réalité virtuelle pourrait être inopportune si elle induit en erreur, évoque une certitude qui n'existe pas ou interdit la ré-interprétation en suggérant qu'une reconstitution est figée. Comme nous l'avons indiqué précédemment, la réalité virtuelle peut ne pas être appropriée si les personnes auxquelles elle est destinée n'ont pas accès à la technologie requise pour la voir, ou s'il leur manque les compétences informatiques nécessaires pour manipuler le modèle. De plus, il faut toujours considérer le gain qui peut découler de l'utilisation de la réalité virtuelle. Si le retour n'est pas significatif par rapport à ce que l'on peut obtenir en utilisant les techniques traditionnelles, alors l'investissement nécessaire pour passer à la réalité virtuelle n'est pas valable. Cela dit, un projet de réalité virtuelle bien planifié, bien documenté et bien exécuté permet de communiquer des informations tridimensionnelles complexes de manière beaucoup plus efficace et profitable que les médias traditionnels. La réalité virtuelle ne peut donc être considérée comme une solution que si son utilisation sert les intérêts et répond aux objectifs des utilisateurs efficacement et mieux que les autres technologies.

(2) Comment définir son projet efficacement ?
Si on choisit d'utiliser la réalité virtuelle pour mener à bien le projet, il faut avoir une approche systématique. Pour commencer, il faut bien sûr préparer un cahier des charges détaillé ou une bonne description du monde que l'on souhaite créer. Ceci permet de concentrer sur papier les idées que l'on a pour le projet, les caractéristiques qu'il devra avoir et les types d'interactions qui doivent être offertes à l'utilisateur. De plus, il faut préparer :

- une analyse des exigences des utilisateurs ;
- une définition des objets, textures, animations, voire sons, qui vont composer le monde ;
- une documentation pour expliquer la conception du modèle et comment il fonctionne sur le système considéré ;
- une définition des plate-formes sur lequel le projet sera exécuté ;
- un test d'utilisation et un programme de maintenance ;
- une projection de la durée de vie prévue du modèle de réalité virtuelle.

Si ceci est fait scrupuleusement, l'utilisation, en archéologie par exemple, d'une plateforme incluant de la réalité virtuelle est possible efficacement et avec une réelle valeur ajoutée par rapport à l'utilisation de moyens traditionnels de visualisation des données.

D'autres recommandations contenues dans le guide de l'ADS concernent la notion d'archivage des projets de réalité virtuelle. L'archivage est nécessaire pour espérer pouvoir utiliser les modèles au-delà de leur durée de vie immédiate, pour garantir l'accès et la réutilisation des ressources de réalité virtuelle. Il s'agit de conserver un enregistrement permanent pour le futur. Le problème majeur est que les projets sont souvent vus comme des expérimentations transitoires, et que peu d'attention est apportée à leur réutilisation et à leur place dans l'histoire de la réalité virtuelle. Pourtant, quand on examine cette histoire, on constate que beaucoup de projets ont disparu ou ont été interrompus pour des raisons physiques (en terme d'équipements) et digitales (en terme de fichiers).
Le meilleur moyen de préserver la réalité virtuelle pour le futur est peut-être de considérer le problème de l'archivage dès le début du projet et plus uniquement lorsqu'il est terminé. Archiver la réalité virtuelle consiste non seulement à préserver les fichiers qui composent le monde, mais aussi les fichiers de données originaux et la documentation comme les rapports de projet. La meilleure stratégie est que toutes ces données numériques soient systématiquement rassemblées, maintenues et rendues accessibles à des utilisateurs travaillant dans des environnements informatiques très différents. L'archivage numérique est en fait la préservation d'informations indépendamment des médias sur lesquels les informations sont stockées. En effet, les disques et autres médias magnétiques ou optiques se dégradent rapidement, et les logiciels et le matériel informatique sont rapidement obsolètes. Il faut donc que les données archivées soient transférables d'un média à un autre, et qu'elles puissent être exploitées avec de nouvelles générations de matériels et de logiciels.
Concernant les stratégies d'archivage, la "migration de données" est la plus recommandée. Lorsque les données sont enregistrées dans des formats standards (ASCII pour les

textes, TIFF pour les images, VRML ou X3D pour les modèles[1]), la migration de données peut être bénéfique pour préserver les données pour une utilisation future. Cette stratégie implique quatre activités principales :

- le "rafraîchissement" de données, qui consiste à copier l'information d'un média à un autre plus récent, quand le premier approche de sa fin de vie ;
- la migration de données, qui consiste à copier les fichiers de données d'un format ou structure à un(e) autre. Dans certains cas cela peut améliorer l'accès à l'information, car les nouvelles versions de logiciels peuvent permettre d'accéder à des nouvelles fonctionnalités. Certains formats ont été identifiés comme des standards internationaux ou ouverts (comme ISO) et permettent de transférer les fichiers de données sur de nouvelles générations de logiciels. Ces formats standard sont publiés et constamment implémentés par différents fournisseurs de logiciels. Ils sont nécessaires, car les données conservées dans des formats "propriétaires" sont vulnérables et peuvent être perdues si le logiciel "parent" n'est plus disponible ou cesse d'être maintenu ;
- la documentation, qui aide les archivistes à comprendre complètement la structure de la donnée et comment ses différentes parties sont reliées entre elles ;
- la gestion de données, dont les outils aident les archivistes à planifier leurs travaux, à tester et à exécuter la préservation des données originales.

L'archivage de la réalité virtuelle se développe donc avec la technologie. Il présente des défis techniques et il est difficile de prévoir les futures stratégies d'archivage. Si les chercheurs veulent préserver la réalité virtuelle pour l'avenir, la meilleure stratégie est en tout cas d'adopter des formats standard.

Pour conclure cette partie sur les recommandations, il faut ici encore (comme pour les bases de données et les SIG) considérer l'utilisation des métadonnées. Dans le domaine des mondes de réalité virtuelle, les métadonnées peuvent aider les utilisateurs à les trouver, à y accéder et à les exploiter. En effet, la réalité virtuelle est utilisée dans beaucoup de domaines (musées, arts, tourisme, patrimoine) et parfois disponible sur Internet, donc ses utilisateurs sont divers et de plus en plus nombreux. Les métadonnées sont importantes pour la réalité virtuelle car :

- elles aident les développeurs de réalité virtuelle à découvrir des travaux ayant été entrepris en utilisant des techniques particulières, et elles permettent la recherche dans les techniques de réalité virtuelle ;
- elles permettent aux spécialistes du sujet (archéologues par exemple) de considérer les méthodes d'interprétation et de reconstitution de sites dans des mondes virtuels ;
- elles permettent aux professionnels des musées et des médias d'évaluer les méthodes de médiation et de présentation des informations ;
- elles aident les artistes à explorer les utilisations de la réalité virtuelle dans leurs travaux ;
- elles supportent l'utilisation de modèles de réalité virtuelle dans l'enseignement

[1] Nous expliquerons ces formats dans la partie 5.3

dans les écoles et les universités.
L'accès et la réutilisation de toutes sortes de données sont importants parce qu'ils aident à soutenir leur conservation. Plus les données sont utilisées, plus elles ont de chances de survivre au-delà de la durée de vie immédiate du projet dans le cadre duquel elles ont été créées. Les métadonnées permettant de décrire et de documenter les mondes de réalité virtuelle contribuent donc à leur diffusion à un public de plus en plus large.

Comme nous le verrons plus loin, nous avons choisi en accord avec ce guide d'utiliser également des formats standard pour la diffusion et la conservation de nos représentations 2D et 3D. Nous avons aussi essayé de prendre en compte au maximum les besoins et les moyens des utilisateurs auxquels les systèmes de visualisation sont destinés.
Dans la section suivante, nous montrons des exemples de réalisations de systèmes de visualisation et de projets de reconstitutions, appliqués au patrimoine et plus particulièrement à l'archéologie.

2.1.3 Exemples de projets de visualisations et de reconstitutions

Pour commencer, l'intérêt de la visualisation de données archéologiques à l'aide de maquettes tridimensionnelles a été souligné depuis longtemps [Reilly, 1991]. Depuis, ceci a été largement étudié [Barcelò, 2000] et on peut distinguer deux aspects essentiels dans les systèmes de visualisation des données archéologiques : la représentation simple de données provenant de relevés ou d'images (sans interprétation), et la reconstitution qui consiste à produire des images ou modèles complets et finis à partir d'un minimum de données [Fletcher et Spicer, 1992].

2.1.3.1 Représentation

Pour le premier aspect, l'image est la base de la visualisation. Par exemple, on peut utiliser l'orthophotographie[2], qui est un document sans interprétation, et y insérer de la connaissance pour qu'elle ait une valeur ajoutée pour l'archéologue. La visualisation des données archéologiques peut alors être faite à travers des graphiques vectoriels bidimensionnels, éventuellement faits à partir des orthophotos et permettant l'interactivité, pour que l'utilisateur puisse choisir les données qu'il veut voir en cliquant sur le graphique. L'avantage est alors que tous les acteurs du relevé peuvent vérifier la cohérence des données, grâce aux points mesurés sur les photographies par exemple. Ce principe a notamment été utilisé pour la visualisation de données d'archéologie sous-marine [Seinturier et al., 2005b]. Les orthophotos servent aussi souvent pour la cartographie et la gestion des fouilles. Les photos sont prises pour tous les niveaux de la fouille avant que

[2]Photographie rectifiée permettant d'avoir une vue de face de la scène qui, si elle est mise à l'échelle, permet de faire des mesures sur la photographie pour avoir des renseignements sur l'objet.

les objets ne soient bougés, puis elles sont orthorectifiées dans le but de cartographier les strates. Le principal problème de ces relevés est le stockage et le traitement de ces nombreuses images, mais des travaux sont menés pour transformer toutes les images individuelles en une grande image virtuelle considérée comme une grande orthophoto, à partir de laquelle il est alors possible de générer automatiquement des Modèles Numériques de Terrain (MNT) ou d'extraire les géométries des objets par un processus global (on traite toutes les orthophotos en même temps) [Pateraki et al., 2002].
Exceptées les orthophotos et leurs applications, les photographies prises sur le site peuvent bien sûr aussi servir pour la réalisation de modèles 3D du site (MNT), des bâtiments ou des ruines. De nombreux travaux sont menés pour extraire automatiquement les modèles 3D à partir des photographies, sans connaissances *a priori* et avec le moins de contraintes possibles par rapport à la prise des clichés. En effet, il est préférable que les archéologues puissent réaliser eux-mêmes les relevés photogrammétriques sans avoir besoin de l'assistance d'un expert du domaine. Notamment les recherches de Pollefeys font référence dans le domaine : il propose des outils pour extraire automatiquement les modèles 3D à partir des photos avec différents niveaux de détails pour les modèles (des modèles de stratigraphies aux MNT) [Pollefeys et al., 1999]. Les avantages sont que le temps d'acquisition des données sur le site est réduit, que la construction des modèles est automatique donc relativement rapide même si des vérifications sont toujours nécessaires, et que les modèles générés sont obligatoirement réalistes puisque basés sur les photographies du site qui font la texture du modèle. De plus, des détails comme les pierres manquantes sur un monument, les imperfections (murs non plans), les structures symétriques sont préservées, et les modèles 3D peuvent être utilisés comme des modèles à l'échelle sur lesquels on peut mesurer comme sur les orthophotographies en 2D. La Figure 2.1 montre une partie du modèle 3D des bains du site romain de Sagalassos, situé au sud-ouest de la Turquie, et la séquence de photographie ayant permis de le réaliser.

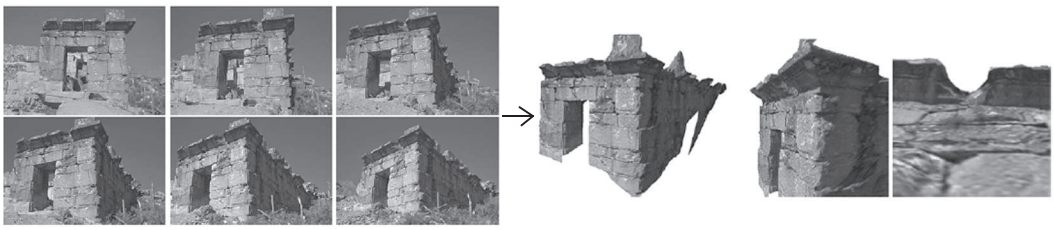


FIG. 2.1 – Modèle 3D réalisé par extraction automatique à partir de photographies. Bains du site de Sagalassos [Pollefeys et al., 1999]

C'est probablement pour les fouilles que les modèles tridimensionnels sont aujourd'hui les plus utilisés en archéologie. Un intérêt particulier est porté sur les processus de représentations informatiques pour construire des modèles visuellement compréhensibles des réalités fouillées. Le but étant bien sûr que ces modèles soient utilisés par ceux

pour qui ils sont faits. Barcelò propose pour ce faire de décomposer l'espace archéologique en terme de modifications physiques (structures) et d'accumulations différentielles (dépôts), pour comprendre comment cet espace a été formé et transformé par les actions humaines et les processus naturels [Barcelò et al., 2004]. L'idée est alors de modéliser les processus de formation du site en terme de variabilité spatiale structurelle et d'accumulation des items. Trois niveaux de visualisation des données archéologiques sont alors possibles :

- niveau macro : placement du site dans un territoire ou un paysage (intégration dans un MNT global) ;
- niveau semi-micro : représentation de la géologie du site ;
- niveau micro : représentation des composants du site ou des unités sédimentaires comme des volumes entre deux surfaces de contact, c'est-à-dire représentation "en épaisseur" des matériels accumulés entre les couches.

Une attention particulière est portée aux objets fouillés, car ils permettent de préciser la chronologie des dépôts. La distribution des composants est donc représentée par des surfaces discrètes, contiguës et irrégulières, et les composants eux-mêmes par des volumes (Figure 2.2). Les buts de cette analyse spatiale proposée par Barcelò sont de créer une carte 3D des discontinuités observables et d'analyser les variables archéologiques dans la séquence volumétrique des discontinuités.

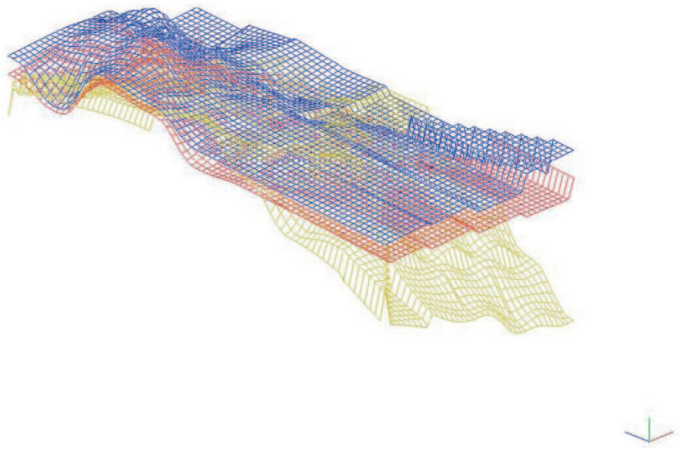


FIG. 2.2 – Surfaces de contacts. Les matrices stratigraphiques classiques ont été substituées par des représentations 3D des composants de contacts du site [Barcelò et al., 2004]

A part les fouilles de sites enfuis, le travail de l'archéologue implique aussi la conservation et la compréhension d'ensembles monumentaux encore existants en élévation. Pour ce faire, une visualisation en trois dimensions du site est très intéressante et permet d'avoir une vue synthétique attractive de toutes les connaissances rassemblées sur l'objet archéologique. Pour prendre l'exemple d'un des sites archéologiques les plus connus du monde, l'Institut Oriental de l'Université de Chicago s'occupe depuis de nombreuses

années de la cartographie et de la modélisation filaire et volumique du Plateau de Gizeh en Egypte et de ses fameuses pyramides. Les modèles 3D extérieurs et intérieurs des pyramides et du plateau ont été faits à partir des cartes publiées, des relevés et des rapports de fouilles[3]. La Figure 2.3 montre des exemples des modèles qui ont été réalisés.

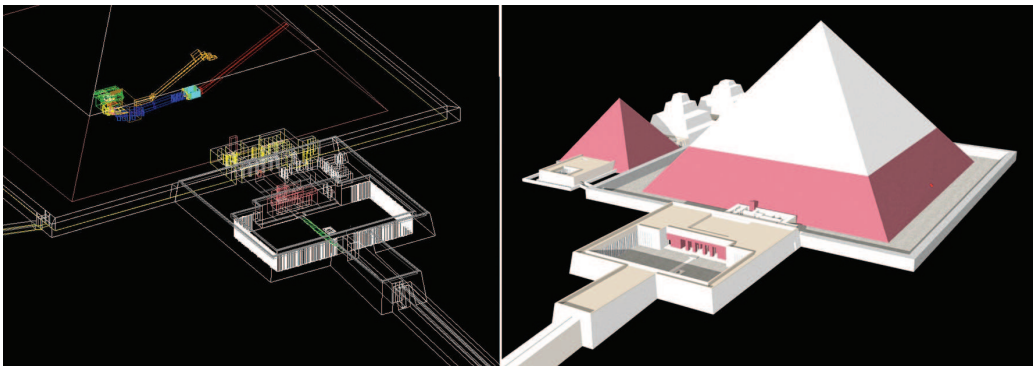


FIG. 2.3 – Modèle filaire de l'intérieur du temple mortuaire de la pyramide de Mikérinos, vue du sud-ouest [`http://oi.uchicago.edu/i/Giza_Model2_G3-mtse.gif` [réf. du 01 mai 2007]] (à gauche) et modèle volumique du complexe de la pyramide de Mikérinos, vue du nord-est [`http://oi.uchicago.edu/i/Giza_Model2_G3-ne1a.gif` [réf. du 01 mai 2007]] (à droite)

Par ailleurs pour le relevé des sites existants, à part les photographies dont nous avons parlé précédemment, il y a aujourd'hui les scanners laser qui permettent d'obtenir des modèles tridimensionnels précis et exhaustifs de l'existant. Ceci implique l'utilisation de suites de logiciels sophistiqués et puissants pour traiter les quantités de données résultant du scannage (nuages de milliers de points très volumineux qui sont difficiles à traiter par les outils de CAO traditionnels). On obtient alors des modèles 3D exploitables informatiquement du site complet ou de détails de celui-ci (Figure 2.4), et des machines de prototypages rapides permettent d'en faire une reproduction à échelle réduite en trois dimensions.

FIG. 2.4 – Relief scanné (vues de face et de côté pour se rendre compte des volumes) [Ioannides et Wehr, 2002]

[3] `http://oi.uchicago.edu/research/projects/giz/comp_model2.html` [réf. du 01 mai 2007]

De nombreux organismes, laboratoires, entreprises ou instituts se consacrent aux relevés et aux visualisations virtuelles en 2D et en 3D de l'archéologie, notamment à l'aide des nouvelles technologies comme les scanners laser.
Des projets sont par exemple menés par le groupe EPOCH[4] (que nous avons déjà cité dans la partie 1.1.2), dont le projet nommé Newton a pour but de réduire les manques dans le traitement numérique du patrimoine culturel sur la base d'outils existants et d'outils développés en interne. Un des outils qu'ils développent, baptisé Imodelaser, a par exemple pour but d'améliorer la qualité et la fiabilité de l'acquisition des données et de leur traitement en photogrammétrie et vision par ordinateur, en travaillant à l'intégration d'images et de données de relevés laser pour la modélisation 3D.
D'autres projets sont conduits plus particulièrement au niveau européen, comme le projet QVIZ[5] (*Query and context based visualization of time-spatial cultural dynamics*) qui a pour but la visualisation et l'interrogation des ressources culturelles archivées dans différents pays et différentes unités administratives. L'idée est de créer une interface spatio-temporelle basée sur des cartes et des structures de connaissances émergentes, comme les relevés par photo- ou lasergrammétrie. Ce projet doit conduire à améliorer le partage d'informations et la création de connaissances, en fournissant un accès plus simple aux ressources, dans un contexte adapté à tout type d'utilisateurs, et des moyens innovants pour explorer et visualiser les données à travers le temps. En effet, il y a un dilemme commun pour les institutions chargées du patrimoine européen : l'organisation et la présentation des informations d'archives si complexes qu'elles empêchent un accès simple aux données, et il faut donc proposer des systèmes pour tenter de le résoudre.
Des instituts se consacrent aussi au traitement et à la dissémination des données archéologiques par les nouvelles technologies. Par exemple, l'institut INSIGHT[6], pour l'étude et l'intégration de techniques graphiques pour le patrimoine, est composé d'une équipe de spécialistes en archéologie et en informatique graphique, qui travaille à la conception et à la diffusion d'outils numériques appropriés pour la visualisation et la documentation des données archéologiques de terrain. Il a été fondé pour étendre les capacités de visualisation des archéologues et pour favoriser la formation sur le patrimoine numérique, notamment en adaptant les méthodes de documentation numérique d'autres domaines (photographies numériques, scanner laser, modélisation informatique) à l'utilisation en archéologie. Le but est d'étendre la gamme d'outils de visualisation disponibles pour les archéologues et d'offrir un accès à des expertises techniques et archéologiques, ou à une formation aux techniques numériques pour accélérer la documentation de sites en danger par exemple. L'institut supporte également l'utilisation de l'ordinateur pour la présentation d'informations complexes directement au grand public, dans les musées ou sur les sites. Il participe donc à de nombreux projets de valorisation du patrimoine culturel, grâce aux systèmes de visualisation et de modélisation que nous avons décrits précédemment.

[4] `http://www.epoch-net.org/` [réf. du 01 mai 2007]
[5] `http://www.qviz.eu/` [réf. du 01 mai 2007]
[6] *Institute for Study and Integration of Graphical Heritage Techniques*, `http://www.insightdigital.org/` [réf. du 01 mai 2007]

Les travaux de tous ces organismes contribuent le plus souvent au processus de "muséalisation" des données, auquel on attribue la double signification de conservation et de diffusion du patrimoine culturel à travers les possibilités sans fin offertes par l'informatique et Internet, comme les représentations virtuelles, les modèles photoréalistes et les animations ou l'intégration dans différents médias. En faisant une bonne utilisation de ces nouveaux médias, les musées ont désormais de grandes possibilités [Economou, 2003] :

- fournir plus d'informations sur le contexte (métadonnées) lié aux artéfacts présentés ;
- tracer des liens conceptuels entre différents artéfacts de la collection du musée ou avec d'autres collections (notamment avec les outils de SIG) ;
- fournir des représentations 3D virtuelles des objets qui sont trop fragiles pour être exposés ou qui sont exposés dans d'autres musées (mais font partie de la même collection) ;
- rendre des phénomènes complexes plus clairs et compréhensibles pour une audience non spécialiste, car les représentations numériques ou les vues stéréoscopiques dans des environnements de réalité virtuelle sont beaucoup plus abordables et attractives que des panneaux textuels explicatifs ;
- susciter l'intérêt de visiteurs pas forcément intéressés par l'archéologie (en particulier les enfants qui sont habitués aux jeux vidéos et au Web) ;
- visualiser différentes théories interprétatives des professionnels et des chercheurs (non y reviendrons dans le prochain paragraphe).

Ceci est valable aussi bien pour les musées physiques que pour les musées virtuels qui se développent de plus en plus. Pour ces derniers, des groupes de recherche développent également des outils pour la mise en ligne des collections. Par exemple, on peut citer un outil éducatif nommé VLMA[7] *The Virtual Lightbox for Museums and Archives*, proposé par le JISC[8] *Joint Information Systems Committee*, l'Université de Reading et l'Institut Max Planck. C'est un applet pour rassembler et réutiliser d'une façon structurée le contenu en ligne de musées et d'archives avec des composants visuels. Il permet de parcourir et chercher dans des collections, de se construire ses propres collections, de les exporter dans un format standard, de les annoter, les comparer ou les échanger avec d'autres utilisateurs de l'outil. Celui-ci est bien sûr disponible en ligne pour pouvoir être utilisé par le plus grand nombre, à des fins d'éducation notamment. Chaque catalogue est composé des images de l'objet et des métadonnées attachées pour avoir le plus d'informations possibles et favoriser les liens avec d'autres objets du même type (Figure 2.5). Cet outil offre encore un moyen supplémentaire pour visualiser les données issues de sites archéologiques.

Une approche intégrée pour la présentation de toutes les données d'un site archéologique, de la documentation tridimensionnelle détaillée de l'état présent du site à l'enrichissement du musée local, en passant par la création d'un SIG archéologique destiné

[7] `http://lkws1.rdg.ac.uk/vlma/` [réf. du 01 mai 2007]
[8] `http://www.jisc.ac.uk` [réf. du 01 mai 2007]

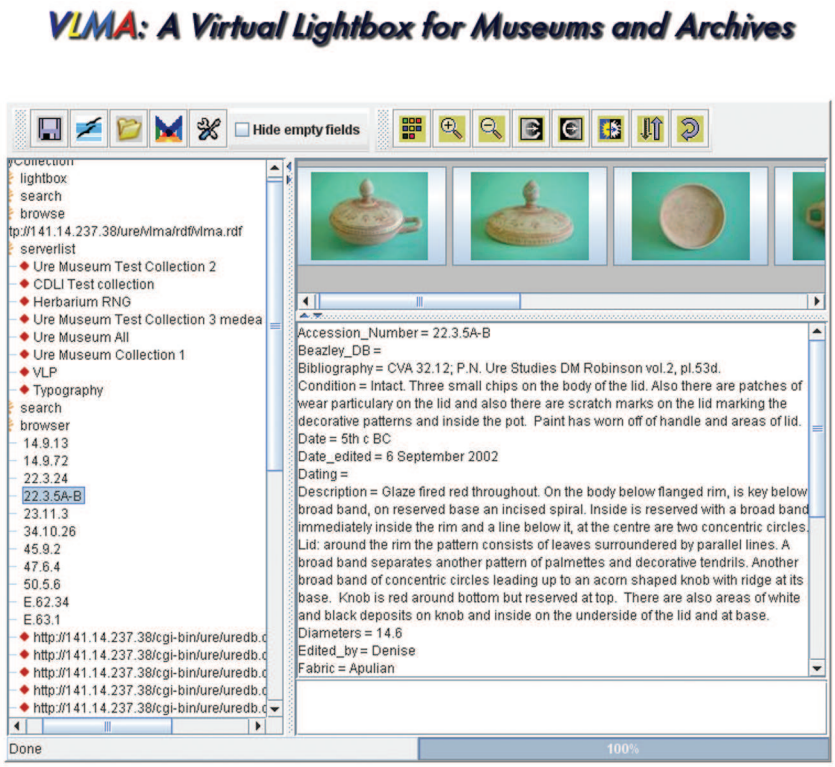


FIG. 2.5 – L'outil VLMA pour la visualisation de collections de musées [`http://lkws1.rdg.ac.uk/ure/js/test2.html` [réf. du 01 mai 2007]]

aux professionnels et au grand public, offre donc de nouvelles possibilités très importantes pour la compréhension et les analyses menées sur le site. Cependant, cette mise en évidence des apports de la réalité virtuelle pour l'archéologie ne serait pas complète si l'on ne mentionnait pas l'aspect le plus profitable : le test des hypothèses de l'archéologue par rapport à l'aspect passé du site archéologique sur lequel il travaille.

2.1.3.2 Reconstitution

Comme nous le mentionnions en introduction de cette partie, la reconstitution est le deuxième aspect que l'on peut distinguer dans les systèmes de visualisation des données archéologiques. En effet, les développements de la visualisation par ordinateur fournissent des outils puissants pour modéliser les aspects multi-dimensionnels des données trouvées sur les sites et de leur contexte souvent disparu. Ceci ouvre de nouvelles perspectives qui peuvent améliorer notre compréhension de l'environnement dans lequel nos ancêtres vivaient. Si les images statiques sont utiles pour fournir des impressions sur un site, un aperçu beaucoup plus large peut être obtenu en permettant à l'utilisateur de

naviguer dans une représentation 3D. De plus, cette expérience peut encore être améliorée si l'on crée un modèle photo-réaliste incluant par exemple des effets d'illumination ou des facteurs environnementaux, et si l'on offre un système de navigation interactif répondant immédiatement aux directives de l'opérateur. La combinaison des expertises des archéologues et des spécialistes en informatique graphique rend désormais possible la création de tels modèles tridimensionnels, qui présentent des restitutions 3D ou des visualisations photo-réalistes interactives des sites archéologiques. Cela peut permettre aux archéologues d'évaluer leurs hypothèses sur le fonctionnement rituel, l'utilisation du site, sa structure, son contenu, son développement et son évolution temporelle. Il est aussi possible de représenter le site à différents stades de son développement. Dans ce cas, l'outil de visualisation en 3D peut alors être vu comme un outil de recherche pour établir la structure architecturale d'un site dans lequel des activités avaient lieu, et pour visualiser différents scénarios hypothétiques qui requièrent une interprétation archéologique. Cet examen des hypothèses peut être fait aisément par l'utilisateur s'il est capable de changer de paramètres dans la scène et de visualiser les résultats, dont la valeur est augmentée par la qualité photo-réaliste du modèle[9] et par la rapidité de réponse [Chalmers et al., 1997].

Différentes méthodes de reconstitutions sont possibles, principalement à partir de tous les documents réalisés pendant et après les travaux sur le site. Des organismes ou laboratoires y travaillent comme pour les représentations simples. Par exemple, on peut citer l'organisation à but non lucratif baptisée *"The Museum of Reconstructions"*[10], qui agit pour le développement et la distribution gratuite de restitutions archéologiques générées par ordinateur, avec le soutien de musées, fondations et particuliers. Elle construit des modèles précis et complets basés sur des dessins métriques et des publications archéologiques et architecturales, qui permettent aux étudiants, aux scolaires et au grand public d'apprécier visuellement tout ce qui est connu de l'apparence originelle du site archéologique reconstitué. Les modèles créés sont distribués gratuitement à des fins éducatives à travers des expositions, publications, émissions de télévision et sur Internet. Des centaines de dessins ont été intégrés pour obtenir des modèles dimensionnels précis, qui ne sont donc pas de simples interprétations de ce qui est connu du site, mais des visualisations précises des traces quantitatives et qualitatives collectées par des générations d'archéologues et d'architectes. Ainsi, cette organisation propose la visualisation d'informations techniques complexes grâce à des modèles précis et complets réalisés à partir de dessins, de photographies, de textes et descriptions illustrées compréhensibles du site, et des conclusions des professionnels ayant fouillé le site (Figure 2.6). Malheureusement, l'offre disponible sur Internet ne comprend pas les modèles eux-mêmes mais juste des images virtuelles de ceux-ci (il n'y a donc pas d'interactivité possible contrairement à ce qui pourrait être souhaité comme nous l'indiquions plus haut).
Au contraire, le Centre d'Analyses Spatiales Avancées du Collège Universitaire de Londres[11] propose des modèles 3D, plus "bas de gamme" mais navigables sur le Web, des recons-

[9] pour se rapprocher des modèles de l'existant faits par photogrammétrie par exemple
[10] `http://www.reconstructions.org/` [réf. du 01 mai 2007]
[11] *CASA Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London*

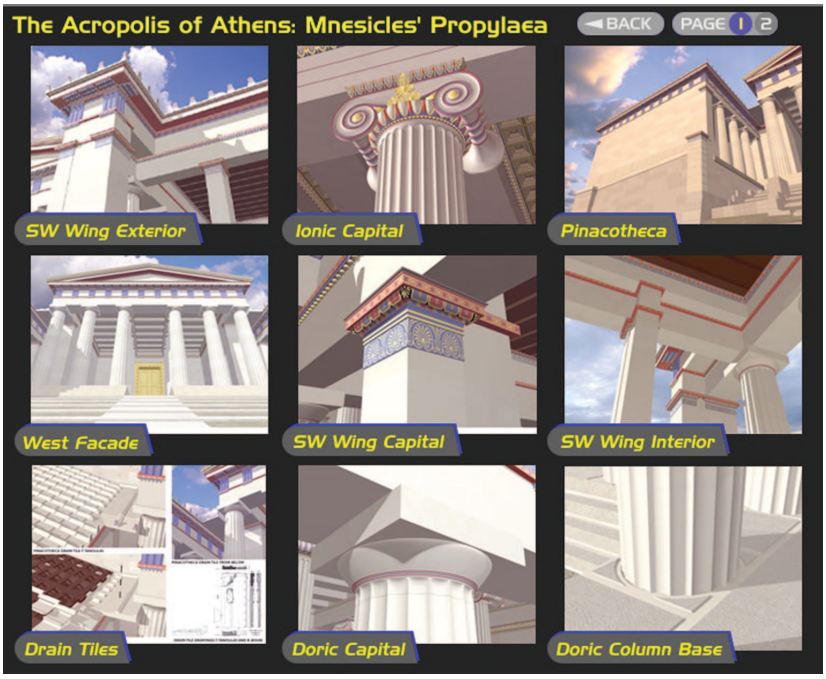


FIG. 2.6 – Modèles de l'Acropole d'Athènes fait par l'organisation *"The Museum of Reconstructions"* [`http://www.reconstructions.org/mor/pages/frames/mor_propylaea_gallery/mor_propylaea_frame.html` [réf. du 01 mai 2007]]

titutions supposées du labyrinthe de la pyramide d'Hawara en Egypte. Les modèles présentent deux types de restitutions de ce labyrinthe proposées dans la littérature (le site étant entièrement détruit aujourd'hui). Le but est là aussi la formation, avec la possibilité de le faire en ligne. Des modèles intérieurs sont disponibles, ainsi que des modèles des objets trouvés sur le site et de la pyramide jouxtant le labyrinthe (Figure 2.7). L'interactivité avec le modèle est possible dans ce projet : on peut naviguer dans les modèles sur Internet (format VRML) et combiner des objets de différentes collections dans la même reconstution [Shiode et Grajetzki, 2000].

Pour aller plus loin dans l'interactivité et la souplesse des modèles 3D pour la reconstitution, on peut citer un projet mené pour aider des personnes non spécialistes en informatique à formuler et à représenter dans des modèles 3D des hypothèses archéologiques [Blaise et al., 1999]. Ce projet est plus particulièrement axé sur les besoins de conservation et de reconstruction de l'héritage architectural. En effet, celui-ci est souvent partiellement ou totalement détruit à cause du temps, des incendies ou inondations, des guerres, de l'ignorance ou de l'irresponsabilité. De plus, la documentation détaillée qui pourrait donner des informations sur la forme et la structure de l'objet disparu est souvent manquante. Ainsi, si l'on souhaite faire un modèle du bâtiment disparu, il faut obligatoirement baser le travail de reconstruction ou d'adaptation des vestiges sur des

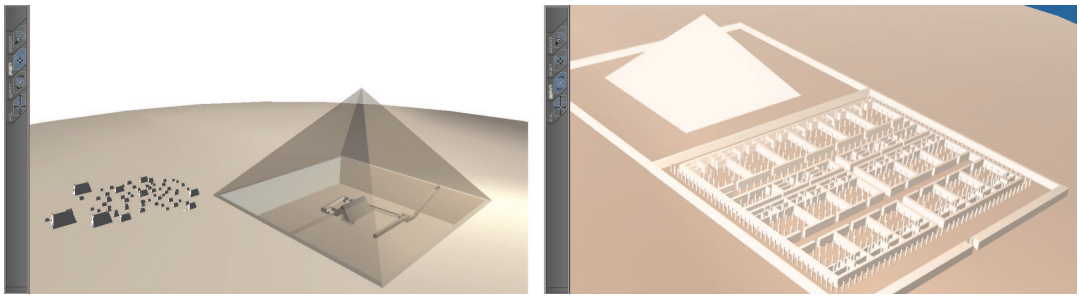


FIG. 2.7 – Modèles 3D navigables du complexe d'Hawara [Shiode et Grajetzki, 2000]

comparaisons et des analogies. Puis, quand le temps vient pour les auteurs des hypothèses d'en favoriser une, une estimation comparative visuelle joue un rôle essentiel. Il y a donc un travail cyclique à faire entre une première estimation visuelle, la création des hypothèses et la visualisation concrète de celles-ci dans des modèles 3D navigables. Les auteurs de ce projet proposent donc de fournir aux chercheurs des outils basés sur la connaissance, qui peuvent aider à l'authentification, à travers l'étape de visualisation, du processus entier des hypothèses de reconstitution. Techniquement, des modèles théoriques sont formalisables facilement par l'utilisateur grâce à une interface Web, où un compilateur d'interface donne la possibilité de choisir, modifier ou créer un script dans lequel le bâtiment est décrit suivant les hypothèses faites. Puis, l'interface donne un accès direct aux instances générées par le processus, et un mécanisme de message permet à l'utilisateur de visualiser la représentation en 3D ou d'obtenir des informations sur les données d'instance du modèle. Il est donc possible de tester différentes hypothèses de reconstitutions en choisissant directement ce que le modèle doit représenter, pour pouvoir évaluer visuellement la proposition.

Par ailleurs, pour pouvoir exploiter plus en profondeur les modèles tridimensionnels, il faut dépasser leur valeur visuelle pour se demander s'ils peuvent avoir une valeur informative. En effet, les résultats visuels de la réalité virtuelle ne peuvent en aucun cas être considérés comme des éléments informatifs dans un processus de recherche, s'ils ne sont pas mis en relation avec une documentation qui les authentifie, les valide et explique chaque arrangement particulier des formes architecturales (par exemple) de la restitution proposée [Dudek et Blaise, 2003]. Pour faire cette mise en relation, l'idée est de considérer la représentation 3D comme une interface entre un champ d'investigation (site, édifice) et les connaissances hétérogènes qui s'y rattachent. La maquette 3D utilisée en tant qu'interface peut alors être considérée, d'après [Blaise et al., 2005] dans un projet dédié à l'architecture, comme :

- un outil de visualisation de connaissances ;
- un outil de navigation dans le jeu de données ;
- un support de la phase d'interprétation de connaissances générales et de données particulières, permettant de figurer sous la forme de symboles graphiques l'état

d'avancement d'un travail d'investigation sur le patrimoine architectural.
La forme architecturale devient alors un médiateur, un filtre efficace pour accéder à des informations spécifiques ou générales. La maquette doit être une représentation interprétative et symbolique n'ayant avec la réalité observée ou déduite que des liens géométriques. Elle doit aussi s'astreindre à une lisibilité qui est celle de la carte, support de connaissances à l'échelle du territoire, même si elle est empreinte d'une grande ambiguïté, car la production de modèles de réalité virtuelle n'est pas encore codifiée comme la réalisation d'une carte. Il faut donc veiller à ce que la représentation ne devienne pas un outil de séduction qui, loin d'éclairer sur la logique de constitution ou d'évolution de l'édifice, en fournit une image globale aussi confuse que la réalité elle-même.
Dans le projet que nous décrivons ici [Blaise et al., 2005], les auteurs proposent, pour pallier ces difficultés, un système de multi-représentations dans des dispositifs permettant d'interroger la maquette numérique tridimensionnelle à différentes échelles et sur différents aspects (datation, types de documentation attachée, etc.). Le système de visualisation comprend donc une plate-forme dans laquelle la représentation est adaptée à une échelle, dans laquelle elle est construite dynamiquement pour refléter un moment dans l'étude de l'édifice, et dans laquelle elle est pilotée en terme d'apparences par l'analyse de la documentation (Figure 2.8).
Il y a quatre problèmes principaux qui se présentent lorsque l'on souhaite créer interactivement ce genre de modèles (qui apportent beaucoup plus d'informations qu'uniquement la forme de l'édifice ou les essais de reconstitution) :

- la représentation à différentes échelles (qui n'est pas unique) ;
- la codification de la représentation pour mettre en évidence des incohérences dans le modèle (par des attributs qualifieurs), pour figurer des niveaux de certitude ou des hypothèses de restitution incomplètes ;
- le choix à opérer entre maquette réaliste et maquette interprétative, car montrer tout ne facilite pas la compréhension alors que montrer ce que l'on sait de l'objet est déjà une interprétation d'une connaissance à un moment donné ;
- la nécessité de construire dynamiquement ("à la volée") des représentations de l'objet à une date précise ou des évolutions architecturales de celui-ci.

Pour ce dernier point, les représentations construites "à la volée" sont des réponses à des requêtes formulées directement par l'utilisateur. Il choisit donc dynamiquement sa visualisation (comme pour les hypothèses précédemment). Deux types de scènes sont proposées à ce moment là : une scène d'analyse pour représenter l'objet à un moment donné, et une scène dite "timeline" qui montre les évolutions dans le temps de l'édifice. Un curseur interactif figurant une ligne de temps permet alors de naviguer dans les transformations morphologiques successives de l'édifice dans une seule et même scène 3D. Les représentations créées dans ce projet présentent donc autant ce qui est ignoré que ce qui est su. Ce n'est donc plus seulement une fin, mais un moyen de rassembler autour de la forme architecturale de l'édifice, l'ensemble des paramètres qui la caractérisent. Considérer la visualisation comme une interprétation enrichit donc l'utilité des modèles tridimensionnels qui se basent alors plus sur la sémantique que sur le rendu. Sinon, la scène 3D est uniquement une représentation, et non un outil pour une visualisation scientifique [Kantner, 2000].

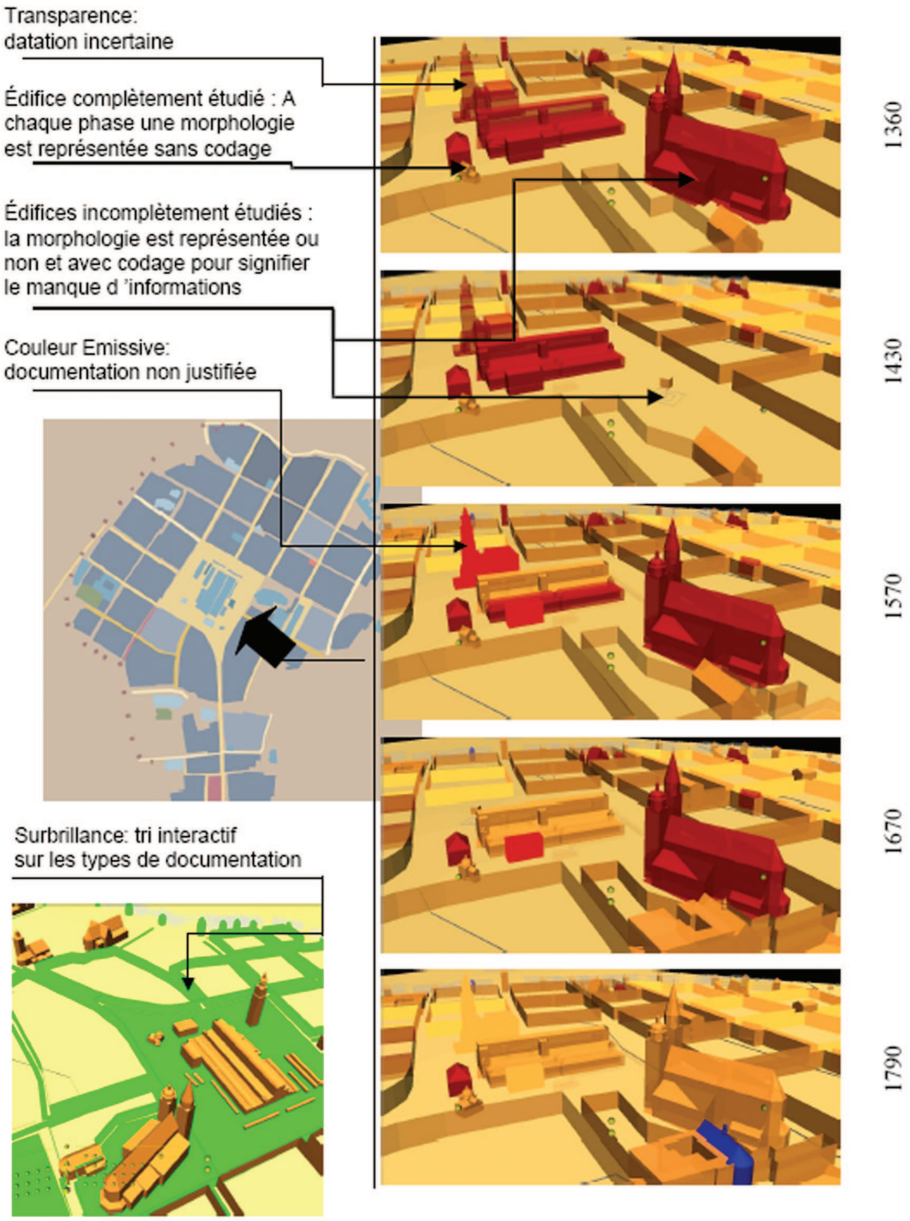


FIG. 2.8 – Codages graphiques dans des scènes 3D [Blaise et al., 2005]

Conclusion

Les derniers projets que nous avons présentés ont été menés dans un contexte architectural, mais les principes énoncés pour enrichir les systèmes de visualisation sont applicables à l'archéologie (comme nous le verrons avec certains outils que nous avons

développés pour notre Système d'Information, cf. Chapitre 8). Nous avons vu beaucoup de possibilités de visualisation des diverses données archéologiques, ainsi que pourquoi et comment sont utilisés les modèles de réalité virtuelle le plus souvent dans ce domaine. Ce qui est remarquable est l'utilité depuis toujours de l'image et de la photographie, mais également les apports très importants de l'informatique et des possibilités de réalisation de représentations en trois dimensions. Cela est profitable dans tous les domaines de l'archéologie, de la fouille à la reconstruction d'édifices ou de sites disparus. Les recommandations indiquées, comme pour les autres domaines (bases de données et SIG), sont un guide pour éviter de proposer aux professionnels des reproductions ou des reconstitutions qui ne correspondraient pas à leurs besoins. Ces attentes sont d'ailleurs ce qui doit conduire tout projet incluant des outils de visualisation des données archéologiques. Comme nous le verrons dans nos développements, nous avons listé les besoins des archéologues en terme de visualisation et surtout d'interaction avec des représentations en 2D et en 3D, et les outils développés suivent au mieux les recommandations énoncées. Nous y reviendrons dans le bilan de l'Etat de l'Art et dans les propositions que nous formulerons dans la deuxième partie de ce mémoire.

Nous pouvons désormais étudier la façon dont les archéologues se servent des outils de visualisation dont ils disposent, mais aussi des bases de données et des Systèmes d'Information, pour publier et/ou documenter leurs données.

2.2 Publication ou documentation ?

2.2.1 De la publication traditionnelle à la publication électronique

Comme pour la visualisation des données archéologiques, l'image joue un rôle important dans la diffusion des connaissances. En effet, on ne peut concevoir l'enseignement de l'archéologie sans un recours continuel aux images, et on ne peut concevoir la circulation de l'information entre spécialistes sans les images des publications et des études. Pour les chercheurs comme pour le grand public ou le public scolaire, les images permettent de voir les réalités matérielles de l'Antiquité à travers des figures qui reconstituent le passé avec beaucoup de précision [Ginouvès et Guimier-Sorbets, 1992]. Les textes, dessins, photographies et plans sous forme de projections orthogonales sont donc la base des publications traditionnelles dans les livres ou les monographies.

Cependant, utiliser les méthodes traditionnelles de publication des données archéologiques signifie omettre certaines données et illustrations, et compresser tout le reste du matériel de façon à réduire le manuscrit à une taille acceptable par les éditeurs. Des informations importantes sont donc omises, et l'utilité de telles publications s'en trouve également diminuée. Ce n'est pas rendre justice aux recherches menées pendant des mois ou des années de travaux de fouilles ou d'analyses que de publier un ou deux

articles dans des journaux. De plus, de telles publications mettent en lumière les résultats de recherche répondant aux objectifs personnels de l'auteur. Le lecteur peut donc uniquement évaluer la recherche et ses résultats avec la structure fournie par l'auteur, ce qui ne lui permet pas de se faire sa propre opinion sur les découvertes. Ceci pose le problème de la consultation des informations primaires contenues dans les nombreux documents de recherche : il faudrait que des copies soient déposées dans des institutions, ce qui n'est pas fréquent. En effet, si elles étaient rendues disponibles, d'autres archéologues pourraient faire leurs propres recherches et obtenir des résultats différents à partir des mêmes données, qu'ils pourraient comparer et contraster en détail par la suite [Karega-Munene, 1992].

Ainsi, la grande majorité des informations que l'archéologue de terrain collecte ne sont pas accessibles pour ses collègues et pour le grand public, car les formes traditionnelles de publication sont incapables d'accommoder facilement et pratiquement les formes complexes des données visuelles et techniques générées par les archéologues d'aujourd'hui. En effet, il y a un manque de moyens adéquats pour transformer les nouvelles formes de données (modèles 3D, cartes satellites, reconstitutions architecturales, interactions environnementales dynamiques) en images bidimensionnelles ou en textes publiables. Ainsi, chaque année le ratio entre le matériel disponible et le matériel publié est de plus en plus bas et, sans une nouvelle approche de la publication archéologique, des années d'investissements et de volumes de données irremplaçables seront perdus pour toujours [UCLA, 2000]. Cependant, l'avènement de l'informatique permet d'entrevoir de nouvelles formes de publication des informations archéologiques (CD-ROM, DVD), même s'il faut alors faire face à la résistance des éditeurs traditionnels [McAdam, 1995]. Particulièrement, le développement de l'utilisation d'Internet commence à répandre d'autres formes alternatives de publication des informations archéologiques. La forme la plus classique est la publication en ligne sous forme de journaux électroniques, comme *Internet Archaeology*[12] journal électronique international à comité de lecture, développé au Royaume-Uni grâce au soutient financier du *United Kingdom's Higher Education and Further Funding Council* (HEFCE) dans le cadre d'un programme pour la mise en place de bibliothèques électroniques (*e-Lib*) [Heyworth et al., 1995, Heyworth et al., 1996]. Mais, il va falloir un changement culturel considérable en archéologie pour que la publication électronique soit largement acceptée et compte autant que la publication papier [Richards, 1998]. Par contre, le Web permet de nouvelles formes de publications qui révolutionnent la diffusion des informations archéologiques, car un rapport archéologique électronique n'est pas uniquement un transfert du papier en numérique. Par exemple, les avantages de l'hypertexte pour la structuration des archives archéologiques ont été soulevés depuis l'apparition du Web [Rahtz et al., 1992] et des expérimentations ont été entreprises pour la publication de sites complets [Banning, 1993, Wolle et Shennan, 1996]. Au départ, le Web était statique : l'utilisateur accédait à des informations qui avaient été préparées comme les pages d'un livre ; mais aujourd'hui, il est dynamique et agit finalement comme un système d'information conventionnel : l'utilisateur formule des re-

[12] `http://intarch.ac.uk/` [réf. du 08 mai 2007]

quêtes pour trouver les informations requises parmi une grande quantité trop complexe à présenter entièrement [Ryan, 2004]. Le Web offre l'opportunité de lier des ressources distribuées et de rendre largement disponible du matériel non publié jusqu'ici, en effaçant la traditionnelle division entre publication et archive [Ryan, 1995]. A travers les outils multimédia et Internet, il devient alors possible d'accéder à toutes les sortes de données nouvelles (modèles 3D, visualisations complexes, vidéos...) qui viennent compléter la publication traditionnelle [Rahtz et Sinclair, 1994, Smith, 1992]. Cela soulève cependant des questions particulières par rapport à l'accès à la connaissance et à la propriété des données [Huggett, 1995], ainsi que le problème du contrôle de la qualité et de la fiabilité des données publiées sur le Web.
A titre d'exemple de publication en ligne, on peut citer un projet nommé ETANA[13], en cours actuellement et regroupant de nombreuses équipes académiques, des bibliothèques, des organisations américaines, qui collaborent pour le partage de ressources intellectuelles et techniques sur le Web, par l'intermédiaire d'un site Internet compréhensible dédié à l'étude du Proche Orient Ancien. Le but est de gérer de façon permanente les archives de toutes les étapes de la connaissance archéologique (rapports de fouilles, éditions de textes anciens et modernes, monographies de base, dictionnaires, journaux, rapports du domaine public), leur génération et leur diffusion. Pour ce faire, ce projet propose la mise en place d'un portail Web de toutes ces ressources, d'un outil numérique commun pour que les professionnels sur le terrain puissent partager les données et les images, et d'un effort de publication électronique de tous les textes anciens scannés qu'il faut conserver dans une seule et même base de données. Ainsi, le site Internet de ce projet propose la consultation de données principalement par l'intermédiaire de pages spécifiques à chacun des sites archéologiques traités, et d'une bibliothèque électronique (nommée ETANA-DL) comprenant des outils de navigation et de recherche de données puissants. La Figure 2.9 montre la navigation dans les données par site, par type d'objet archéologique et par période, et un résultat pour un site choisi nommé Lahav.

La publication traditionnelle des informations archéologiques est donc aujourd'hui insuffisante pour rendre compte des nombreuses spécialisations de l'archéologie et de la richesse des données de types très divers, qui résultent des traitements informatiques que nous avons expliqués dans les parties précédentes (bases de données, systèmes d'information, outils de visualisation). La publication électronique sous forme de journaux en ligne est un moyen de diffusion de la connaissance à un public plus large, mais ne résout pas le problème de l'accès aux données primaires servant de base à l'écriture des rapports finaux présentant les résultats des travaux de fouilles. Par contre, offrir la possibilité d'accéder à toutes les données secondaires, qui représentent en réalité les archives des travaux, est un grand avantage des nouveaux outils multimédia et du réseau Internet pour documenter totalement les sites archéologiques.

[13] `http://www.etana.org/` et `http://etana.dlib.vt.edu/` [réf. du 09 mai 2007]

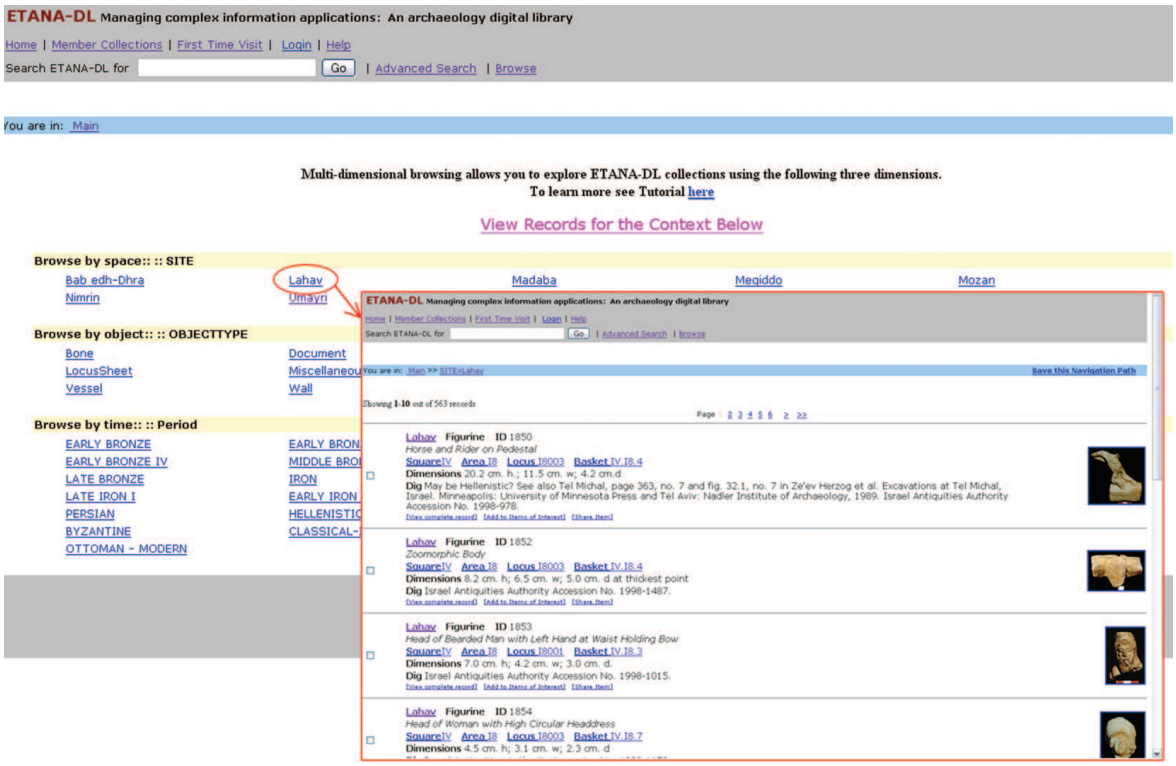


FIG. 2.9 – Recherche de données dans la bibliothèque électronique ETANA-DL [`http://digbase.etana.org:8080/etana/servlet/BrowseInterface` [réf. du 09 mai 2007]]

2.2.2 De l'archive à la documentation numérique

Depuis toujours, la documentation des événements, structures significatives, contextes divers (religion, culture) autour d'un site archéologique est essentielle pour les études à mener et la préservation du site. Toutes ces informations constituent les archives du site qui, comme nous le disions plus haut, sont rarement publiées ou mises à disposition pour d'autres recherches. Pour constituer ces archives, d'après l'Institut de Conservation du Getty GCI (*Getty Conservation Institute*) que nous avons déjà cité précédemment (cf. 1.1.2), les archéologues devraient fouiller et écrire simultanément des rapports provisoires plutôt que d'entreprendre le travail long et laborieux du rapport final. Ils semblent ignorer, malgré les signes apparents de danger, le fait que tout site non publié est détruit complètement, et que l'enregistrement sur le terrain ne peut jamais être remplacé [GCI, 2003]. Pour le GCI, le terme publication devrait inclure des actions spécifiques pour préserver aussi bien les enregistrements de terrain que les évidences issues de la fouille. En effet, pour que la conservation fasse partie intégrante de tout travail de recherche archéologique, il faudrait qu'une publication complète de tous les travaux de terrain soit effectuée avant toute autre fouille ou relevé. Sans aller jusqu'à la publication,

la constitution des archives du site, c'est-à-dire la documentation, doit être considérée comme une étape incontournable dans le planning, l'analyse, l'intervention et les phases de contrôle des travaux de conservation et des travaux archéologiques. Ainsi, le GCI souhaite promouvoir la documentation pour qu'elle joue un rôle central dans le management efficace du patrimoine, car il est impossible de gérer et de protéger ce que l'on ne comprend pas entièrement.

Le mot documentation a donc une place fondamentale dans la conservation en archéologie. La documentation constitue de l'information, et en conservation elle prend différentes formes. Par exemple, la documentation d'une peinture peut être une description méticuleuse de sa condition présente, des indications sur la conservation passée, la restauration, l'analyse et les diagnostics, ou encore un enregistrement narratif de tous les travaux faits sur la peinture. Dans le même esprit, la documentation d'un site archéologique peut être un relevé cartographique de la géographie locale, un relevé photographique et topographique des structures et de leurs détails, une description des matériels trouvés, les modèles tridimensionnels présentant des restitutions, ou encore un rapport sur la condition des objets exposés. Réaliser la documentation complète d'une ressource culturelle peut donc être comparé à faire un examen médical de l'objet ou du lieu, elle donne des informations qui servent de base pour la comparaison avec les contrôles précédents ou pour des interventions de tout type [Mac Lean, 1996]. Préserver et protéger une ressource culturelle est impossible sans informations fiables sur sa condition et sans la possibilité d'entreprendre des changements, ce qui requiert donc une documentation complète. La stratégie à mettre en œuvre pour la réaliser doit se baser sur les besoins des personnes à qui elle est destinée : il faut se poser la question de la manière dont toutes ces informations seront utilisées par la suite. Les principaux buts de la documentation à des fins de conservation sont :

- décrire l'état de conservation d'un monument pour avoir une base pour les analyses et diagnostics des causes de détérioration ;
- renseigner les interventions de conservation ;
- servir d'outil de suivi et de contrôle.

Ces objectifs sont ceux de la documentation graphique traditionnelle, qui se transfèrent bien sûr à la documentation numérique qui peut désormais être réalisée. Au départ, la documentation numérique était expérimentale dans un contexte de recherche, mais les systèmes développés (notamment au GCI) et les travaux collaboratifs entre institutions rendus possibles grâce à Internet font qu'elle est de plus en plus répandue. Les valeurs ajoutées de l'informatisation de la documentation sont nombreuses, notamment [Bishop et al., 1998] :

- la capacité de capturer un niveau très élevé d'informations accessibles dynamiquement : des logiciels comme les SIG rendent possible l'élucidation de relations non apparentes lisiblement dans une documentation statique ;
- la simplicité de visualisation et de présentation permises par les systèmes numériques : enregistrer et documenter l'objet "à taille réelle" est une description spatiale fidèle et permet de mieux comprendre la documentation ;
- le modèle obtenu peut être reproduit à l'infini comme l'original et à l'échelle, pour

pouvoir l'afficher et l'analyser dans son ensemble ;
- les relations significatives entre les classes d'information et les calculs précis nécessaires peuvent seulement être réalisés avec des systèmes informatiques ;
- les différentes catégories d'informations composant la documentation peuvent être mieux organisées, gérées, contrôlées en utilisant un système de gestion numérique.

L'utilisation des technologies informatiques peut donc aider à réaliser le but premier de la documentation : la reproductibilité et la faculté à être partagée, ce qui était beaucoup plus délicat à obtenir avec les archives traditionnelles.

Hormis la conservation des sites, cette documentation, si elle est diffusée, peut servir à la comparaison et au partage de travaux entre professionnels. De plus, il est important pour la préservation du patrimoine de parler directement au public, de lui permettre d'accéder aux informations en communiquant une documentation la plus complète possible des projets. Via les systèmes multimédia dans les musées et surtout grâce au Web, ceci est désormais possible à grande échelle.

2.2.3 Difficultés et recommandations pour de nouvelles formes de documentation

La variété des données géographiques, environnementales, culturelles, économiques, sociales qu'il est nécessaire de collecter et d'organiser pour construire une documentation de base et la communiquer requiert donc des systèmes de gestion de données complexes, qui ne peuvent être qu'informatiques. Cependant, il y a des barrières à une adoption étendue des systèmes de documentation numérique par les archéologues ou les conservateurs.
La première est la formation informatique : beaucoup d'archéologues ne sont pas encore très à l'aise avec les nouveaux outils informatiques, et il faut donc leur proposer des systèmes permettant par exemple de personnaliser des logiciels qu'ils ont l'habitude d'utiliser. Dans cette optique, [Bishop et al., 1998] proposent de nouveaux menus à intégrer dans le logiciel AutoCAD® (logiciel de CAO très utilisé en archéologie) pour offrir une interface simple d'utilisation permettant de faire des dessins destinés à la conservation par exemple. Cette interface constitue alors un pont entre l'utilisateur moyen et le système vectoriel complexe. De plus, pour la simplicité, il est profitable de proposer des systèmes permettant d'entrer directement toutes les informations de conservation avec une seule procédure, et de les mettre en relation sur des critères simples comme la localisation. A ce moment là, une requête sur un point physique appelle des informations graphiques, photographies, textuelles, analytiques venant d'une base de donnée sous-jacente au système, et permet de voir et présenter les données dans leur contexte. Ce genre de système de gestion de l'information permet donc de présenter simplement les données par leurs relations avec d'autres données appropriées sous forme d'un outil de planification et de gestion.
La deuxième difficulté relative à la documentation et à la publication numérique des

données archéologiques est que cela demande de considérer à la fois la nature particulière des informations archéologiques et le problème du transfert à de nouveaux formats. En effet, les données archéologiques peuvent être de natures très différentes et le vocabulaire employé pour les décrire est particulier à chaque domaine de la discipline (suivant la période ou la civilisation étudiée par exemple). Un travail collaboratif entre archéologues et éditeurs pour développer des standards et des guides pour ceux qui souhaitent documenter leurs travaux en ligne est donc nécessaire. Il faut développer des formes compatibles d'enregistrement et de présentation des informations, sinon chacun travaille indépendamment, et la documentation disponible devient alors inconsistante et difficile à utiliser, surtout pour les professionnels qui voudraient se resservir de certaines données dans leurs projets. En effet, si les archéologues adoptent un modèle de données qui est le même pour tous (dans lequel ils convertissent simplement leurs données), cela peut rendre la documentation enregistrée plus accessible et réutilisable, et ainsi assurer sa préservation [Schloen, 1999].

Pour pallier ces difficultés, un groupe de travail composé des acteurs les plus influents dans le domaine de la conservation patrimoniale et des standards (l'ADS, le Getty, l'Institut Oriental de l'Université de Chicago, l'Institut d'Archéologie de l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA), le *Council for British Archaeology*...) a été mis en place afin de développer un prototype de gabarit pour faciliter la création de publications archéologiques. Ce projet, engagé en 2000, intitulé *The Digital Imprint*[14] a pour but de développer des standards pour les techniques et les contenus qui doivent permettre à terme de rendre les publications numériques cohérentes, pratiques, multi plate-formes, de grande qualité et faciles à utiliser [UCLA, 2000]. En accord avec ce que nous avons énoncé plus haut, la publication numérique de la documentation complète rend possible d'inclure d'innombrables photographies de qualité, des diagrammes, des cartes, des épreuves, mais aussi des vidéos, des documents audiovisuels, des bases de données, des animations, des modèles tridimensionnels ou des reconstitutions architecturales. Ceci enrichit et clarifie les interprétations et conclusions qui composent la monographie archéologique traditionnelle. Les acteurs du projet se sont donc rassemblés pour proposer un prototype de publication qui pourra être utilisé comme un modèle pour la préservation et la présentation des informations archéologiques visuelles et techniques sous forme électronique. Les buts finaux sont :

- de rendre les données archéologiques primaires et secondaires plus accessibles ;
- de préserver les composants visuels et techniques du matériel archéologique de terrain ;
- de développer avec l'aval de la communauté archéologique les standards cohérents et consistants dont ils ont besoin pour réaliser des publications numériques complètes de qualité.

Le modèle sera évalué par les archéologues et les éditeurs dans une série de conférences, mis à disposition sous forme de gabarit couvrant tous les domaines archéologiques, et accompagné d'un manuel permettant la transformation des données conformément au

[14] `http://www.sscnet.ucla.edu/ioa/labs/digital/imprint/imprint.html` [réf. du 10 mai 2007]

gabarit. A la fin du projet, l'Institut d'Archéologie de l'UCLA passera en revue d'une façon critique la valeur et l'utilité de ces travaux, et s'il détermine que ce programme de publication est très important et a une réelle valeur ajoutée par rapport à ce qui se fait jusqu'à présent en terme de documentation numérique, les développements les plus importants seront conservés et mis en valeur pour que la profession adopte la publication numérique comme une nouvelle façon fiable de communiquer ses recherches.

D'autres solutions sont proposées reposant notamment sur l'idée qu'une architecture de données facilement modifiable peut permettre une intégration simple et progressive des informations archéologiques dans des systèmes de traitement et de documentation. Par exemple dans le projet *OpenArcheo*, dont nous avons déjà parlé dans la partie SIG et 3D (cf. 1.2.4), les auteurs croient en la possibilité de solutions informatiques de documentation qui s'appliqueraient à différents contextes archéologiques, sur la base d'outils facilement exportables [Fronza et al., 2003]. En effet, les sujets vastes et interdisciplinaires, les améliorations et les progrès constants de la méthodologie, ainsi que les particularités de chaque contexte étudié, font qu'il est impossible de maîtriser complètement dès le départ toutes les variables et tous les jeux de données possibles qu'il va falloir gérer et documenter. Les auteurs suggèrent donc qu'un système souple et une architecture de données paramétrable par chacun peut être une solution pour la gestion et la documentation numérique de toutes sortes de données archéologiques (des objets jusqu'aux produits multimédia) dans une architecture intégrée et "inter-reliée". Ils proposent alors des outils faciles d'utilisation (relativement au problème de formation des archéologues) pour accomplir les principales fonctions de collection, d'analyse et de publication de données archéologiques.

Par contre, on s'éloigne avec des propositions de ce type de l'idée d'un besoin de standard pour l'échange d'informations. En effet, si chacun réalise son propre modèle de données et donc son propre mode de documentation et de publication numérique, cela réduit les possibilités de partage. En revanche, cela est moins contraignant de proposer des outils ouverts et paramétrables selon les besoins de chacun, que de devoir se conformer à un gabarit particulier. Pour le moment, chacun se décide pour l'un ou l'autre système selon ses intérêts, en pensant plus ou moins à la communication et au partage à grande échelle.
Pour ce partage, hormis les standards, de nombreux projets comme le *East Mediterranean Pottery Project* [Louhivuori, 1996] développent des mécanismes pour la liaison de plusieurs bases de données connectées à Internet. Ceci permet de lier des projets, même si les modèles de données sont différents (ce qui peut faire un bon compromis entre l'adoption de standards contraignants et l'utilisation de systèmes ouverts indépendants). Des systèmes basés sur les métadonnées sont alors développés pour permettre le partage de ressources à travers une vaste gamme de disciplines [Wise et Miller, 1997]. Dans ce cas, les métadonnées permettent l'identification d'éléments clés d'indexation qui peuvent être incorporés dans les informations d'en-tête des documents mis en ligne et ainsi indexés par des moteurs de recherche, par exemple dans le modèle *Dublin Core* que nous avons décrit dans la partie 1.1.2. L'idée des projets menés dans ce sens est

que si un moyen efficace est trouvé pour l'indexation et la localisation des publications numériques disponibles en ligne, alors cela permettra d'ouvrir une voie majeure pour l'expansion des publications archéologiques sur le Web [Richards, 1998].

Concernant les recommandations, l'ADS fournit, dans son guide sur la Réalité Virtuelle[15], des conseils pour bien documenter les projets utilisant la réalité virtuelle dans le domaine de l'archéologie [Austin et al., 2002]. Nous allons résumer ce qu'ils conseillent car, comme les outils de visualisation et les modèles 3D font de plus en plus partie des documents générés dans le cadre de travaux archéologiques, il est important de savoir ce qu'il est nécessaire d'enregistrer pour pouvoir les conserver efficacement. En général, la publication d'un projet est un rapport final présentant l'histoire, les techniques utilisées et les résultats du projet. Dans le domaine de la réalité virtuelle, il y a beaucoup d'intervenants, les données proviennent de plusieurs médias et les mondes sont créés pour un public. Il faut donc conserver des informations additionnelles par rapport à un travail classique, pour rendre compte des facteurs ayant influencé le développement et pour donner des indications sur la maintenance ou les réutilisations possibles du monde. Il s'agit de préparer une documentation technique sur le monde qui soit mise à jour constamment et qui décrive notamment :

- les étapes de création ;
- les formats de fichiers qui sont dans l'archive ;
- les logiciels et modules externes utilisés pour la création et la visualisation ;
- les langages de programmation et de script ;
- les utilisateurs visés ;
- les codes utilisés dans les fichiers ;
- les types et niveaux d'interactivité ;
- les personnes responsables de la création et de la gestion des fichiers numériques.

Pour les mondes présentant des reconstitutions, il est également important d'enregistrer et de renseigner quels éléments sont basés sur des éléments réels et quels éléments sont des interprétations historiques ou artistiques [Miller et Richards, 1995, Eiteljorg, 2000]. Une documentation de ce type, c'est-à-dire une description efficace, pour les ressources de réalité virtuelle est un pré-requis essentiel à tout dépôt du projet dans une archive ou à toute mise en ligne des données virtuelles.

Les difficultés, propositions de solutions et recommandations que nous venons de détailler permettent d'entrevoir dans quelle optique il faut développer les systèmes destinés à la documentation numérique de données archéologiques, pour qu'ils soient utilisés et profitables pour les professionnels de la discipline.

[15] dont nous avons détaillé certains aspects dans la partie 2.1.2

Conclusion

L'intitulé de cette partie pose la question de la publication ou de la documentation des données archéologiques. Nous avons vu que ces deux termes ne représentent pas la même chose :

- traditionnellement, publication signifie communication des principaux résultats d'une recherche, que celle-ci se fasse par le biais de livres ou de journaux électroniques ;
- alors que documentation signifie l'archivage de tous les documents et informations ayant permis ces recherches, que celui-ci se fasse avec les documents physiques ou numériques désormais.

Mais les nouveaux outils informatiques et l'émergence d'Internet induisent un effacement de cette distinction entre publication et documentation. En effet, la gestion numérique par des Systèmes d'Information de toutes les données archéologiques produites, que ce soit des bases de données, des modèles 3D, des visualisations de tout type (images, photos, modélisations par laser, vecteurs), autorise désormais la communication de toutes ces informations à un public de plus en plus large par l'intermédiaire du Web. Ainsi, le but de la publication traditionnelle qui était de communiquer les résultats de recherches est toujours rempli, mais en plus, d'autres professionnels peuvent profiter de tous les documents produits sans exception (pas uniquement ceux publiés), pour faire d'autres recherches ou pour faire des recoupements avec leurs propres travaux.

Ainsi, en promouvant l'utilisation de systèmes standards pour normaliser les publications en ligne, ou en créant des outils pour relier les systèmes de gestion d'information de différentes institutions, il deviendra possible à terme de publier les recherches archéologiques sous forme de système documentaire informatisé au même titre (avec le même crédit et le même impact) que l'on publiait ces résultats dans un livre auparavant. Pour aboutir à cela, les problèmes induits par l'utilisation d'Internet (propriété des données, contrôle de la qualité et de la fiabilité des données) doivent avoir été intégrés dans tout développement d'un système de documentation (par l'enregistrement de métadonnées très complètes renseignant toutes les caractéristiques de la donnée par exemple). Par ailleurs, il faut également prévoir des systèmes d'indexation efficaces ou des représentations claires de tous les documents gérés, pour que l'utilisateur trouve l'information recherchée aussi aisément qu'il la trouvait dans le livre.

Si toutes ces conditions sont remplies, alors la publication sous forme papier pourra être supplantée[16], ou en tout cas complétée, par une documentation numérique très riche (comprenant tous les matériels créés par les recherches archéologiques menées) communiquée grâce au Web, et donc accessible à tous, de n'importe où dans le monde et sans limitations même pour les personnes extérieures au domaine archéologique. L'espoir est que l'accès à l'information sera facilitée par de tels systèmes (les publications traditionnelles étant parfois relativement confidentielles), amenant une plus grande conscience du patrimoine culturel et des activités des institutions en charge de le préserver.

[16] sans compter les réticences des personnes qui n'intègrent pas l'utilisation de l'informatique dans leurs travaux, ou les réticences des éditeurs ou des archéologues les plus traditionnels

Dans le dernier chapitre de cet État de l'Art, nous pouvons désormais présenter quelques projets intégrant tous les aspects que nous avons développés jusqu'à présent (bases de données, Systèmes d'Information, systèmes de visualisation et de documentation). Ces exemples nous permettront de situer précisément le Système d'Information que nous proposons par rapport aux travaux d'autres universités ou organismes. En effet, nous faisons des propositions dans les quatre domaines informatiques appliqués à l'archéologie que nous avons abordés dans les deux chapitres précédents, et il faut donc que nous nous positionnions par rapport à des projets intégrant également ces quatre aspects.
Ensuite, nous ferons un bilan sous forme de tableau synthétique de la manière dont ces quatre aspects informatiques sont utilisés (ou devraient l'être) en archéologie, de manière à introduire nos propositions et nos développements.

Chapitre 3

Gestion et représentation de données archéologiques : projets globaux et bilan

Dans ce dernier chapitre bibliographique, nous détaillerons cinq projets utilisant à la fois la technologie des bases de données, les Systèmes d'Information et des techniques de visualisation avancées, pour permettre différents types de communication des données archéologiques. Puis, nous ferons le bilan de l'Etat de l'Art que nous avons dressé dans les chapitres précédents.

3.1 Quelques projets représentatifs des recherches actuelles

3.1.1 3D Murale

3D Murale est un projet européen intitulé "Mesure 3D et Reconstruction Virtuelle des Mondes Antiques Perdus d'Europe"[1]. C'est un ensemble d'outils de relevé sur le terrain à moindre coût, simples d'utilisation et portables pour l'enregistrement :

- des évidences stratigraphiques des sites, car les travaux archéologiques détruisent ce genre d'informations ;
- des artéfacts pour le catalogage et la représentation ;
- des sculptures et des bâtiments pour des besoins de restauration et de visualisation.

[1] `http://dea.brunel.ac.uk/project/murale/` [réf. du 20 mai 2007]

Le but final est de modéliser le terrain du site en trois dimensions, car ces données topographiques donnent des informations importantes aux archéologues et elles sont essentielles pour une visualisation réaliste. De plus, les anciens concevaient leurs villes en harmonie avec leur environnement, en adaptant le tracé de la ville à la géographie physique. Une base de données multimédia a été conçue pour conserver et récupérer la stratigraphie, les artéfacts, les sculptures, les bâtiments et les tracés des zones de peuplement. Cette base de données :

- contient des informations sur toutes les couches stratigraphiques fouillées, sur tous les artéfacts, les sculptures et les ensembles de bâtiments relatifs à chaque couche ;
- comprend des informations sur la provenance des pièces faisant partie de la reconstruction des scènes et à quelle période elles appartiennent ;
- sert de dépôt utilisable par les archéologues pour classifier les objets trouvés, préparer les restaurations et garder des traces des statistiques ;
- peut être utilisée comme ouverture pour le grand public et les autres archéologues en rendant le plus d'informations possibles disponibles sur Internet ;
- suit le modèle standard CIDOC pour représenter les artéfacts pour les musées numériques.

Des techniques ont été développées pour utiliser les modèles 3D de fouilles des objets ou de leurs parties avec des outils multimédias, qui permettent une représentation virtuelle ou une anastylose des bâtiments ou des artéfacts. Elles donnent la possibilité de faire une reconstruction virtuelle de toutes les phases de la fouille et de la stratigraphie. A terme, on obtient le modèle intégral en 3D du paysage, des bâtiments et des artéfacts, et ce pour différentes ères montrant les reconstructions pour ces périodes ou montrant l'état actuel. D'autres techniques multimédias ont également été développées pour visualiser le site en Réalité Virtuelle de sorte à pouvoir naviguer dedans[2], et pour faire des expériences visuelles incluant la "recréation" des fouilles en montrant les différentes couches une par une. Ceci peut être une aide pour les futurs archéologues intéressés par le site, pour pouvoir le revisiter en Réalité Virtuelle et faire leurs propres interprétations des découvertes.

Le flux des processus archéologiques dans le projet 3D Murale est donc basé sur l'enregistrement, la reconstruction, la base de données et la visualisation, comme l'illustre la Figure 3.1.
L'architecture du système comprend un ensemble d'outils associés par une structure de base de données commune. Ces outils sont des logiciels commerciaux ou non, associés éventuellement avec des applications développées spécifiquement dans le cadre du projet. Ils sont de différents types :

1. Outils de relevé :
   ils ont pour but l'obtention des formes du terrain et des objets à partir de techniques comme la lumière structurée, les couples stéréoscopiques, les vidéos, la

[2] ce qui pose des problèmes par rapport aux niveaux de détails des modèles et qui implique souvent de les créer à moindre résolution pour pouvoir y naviguer

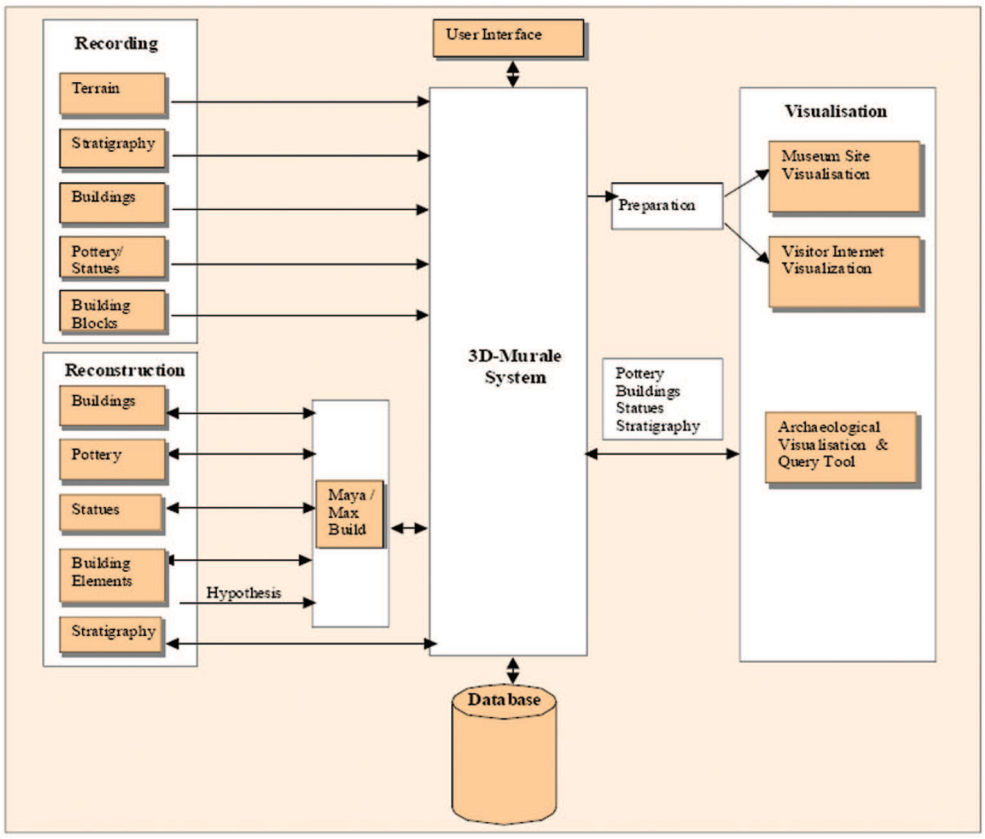


FIG. 3.1 – Flux des processus archéologiques dans 3D Murale [Cosmas et al., 2001]

tachéométrie associée aux outils de CAO, le scanner laser ; le tout associé avec un générateur automatique de textures à partir de photos.

2. Outils de reconstruction :
   ils dépendent du type d'artéfact à reconstruire, ils sont basés sur les correspondances de formes et le logiciel Maya® est utilisé pour modéliser les parties de bâtiments, de statues ou de poteries. Pour reconstruire la stratigraphie, un outil spécifique nommé STRAT a été créé : il permet l'enregistrement des couches stratigraphiques ainsi que des artéfacts qui y ont été trouvés, puis donne un modèle 3D des différentes couches incorporant les évidences (Figure 3.2). Ceci permet de faire des tests précis des hypothèses sur les relations entre les couches stratigraphiques (position relative, séquence chronologique) [Green et al., 2001]. Il est également possible d'annoter les objets pour donner des justifications de leur positionnement par exemple : ces annotations sont enregistrées dans la base de données et il est possible de les visualiser et d'y accéder par l'intermédiaire de symboles 3D placés dans les strates.
3. Outils de visualisation :

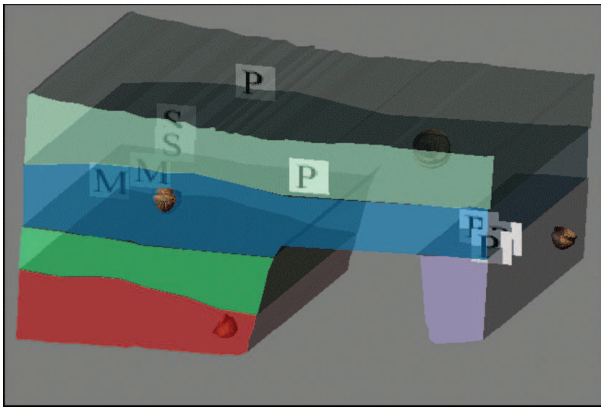


FIG. 3.2 – Perspective 3D de la stratigraphie montrant les artéfacts incorporés [Cosmas et al., 2001]

devant à la fois satisfaire les archéologues et le grand public, ils ont été conçus pour fonctionner sur Internet pour rendre le site virtuel accessible de partout. Ils sont composés d'un "plugin" personnalisé offrant des fonctionnalités nécessaires au grand public (visualisation complète du site reconstruit) et aux archéologues spécifiquement, notamment grâce à un curseur temporel qui permet de visualiser des périodes chronologiques pour faire des recherches précises (visualisation de bâtiments à deux époques différentes sur la même image ou transformations architecturales graduelles et environnement pendant différentes périodes d'occupation). Pour le fonctionnement sur Internet, il est nécessaire de réduire la charge de données à transférer sur l'ordinateur de l'utilisateur depuis la base de données au minimum : l'outil de visualisation s'adapte donc automatiquement aux performances graphiques de l'ordinateur de l'utilisateur, pour éviter des retards ou des sauts dans la navigation.

4. Outils de muséologie :
   ils offrent des visualisations adaptées et interactives, avec la possibilité de survoler ou de se déplacer dans le site de manière très naturelle. Ils proposent des "tours" prédéfinis suivant différents thèmes pour que l'utilisateur ne se sente pas perdu dans les modèles 3D complexes. A part les modèles du site, d'autres informations multimédias sont disponibles (photos, films, animations 3D, images panoramiques, informations textuelles) et peuvent être inclues dans les présentations. Elles sont par exemple accessibles par des "spots" placés dans la scène.

Le projet 3D Murale a donc permis la création d'un jeux d'outils multimédias à moindre coût pour le relevé, la reconstruction, l'encodage, la visualisation de bâtiments, statues, poteries, stratigraphies, terrains, matériel de texturage dans une base de données permettant un stockage approprié et la récupération des données. Cet ensemble d'outils peut être considéré comme un concept multimédia complet pour l'archéologie. [Cosmas et al., 2001]

3.1.2 3D Knowledge 3DK : Acquisition, Représentation et Analyse

3D Knowledge est un projet du laboratoire PRISM de l'Université de l'Etat d'Arizona aux Etats-Unis[3]. C'est un projet interdisciplinaire pour développer l'acquisition, la représentation, le questionnement et l'analyse de connaissances tridimensionnelles, dans un environnement distribué pour permettre à des chercheurs de différentes disciplines, dont l'archéologie, d'exploiter entièrement le potentiel d'objets et de phénomènes 3D. Il s'agit d'améliorer l'acquisition de données 3D, de proposer des méthodes de requêtes innovantes et des outils plus efficaces pour la quantification et l'analyse, car cela peut aider les recherches archéologiques, promouvoir de nouvelles collaborations interdisciplinaires et augmenter les moyens d'apprentissage des étudiants. Pour rendre les objets 3D et autres données disponibles pour des analyses dans différents champs disciplinaires, il faut s'intéresser à la représentation, au stockage, à la récupération, à l'enrichissement sémantique, à l'extraction de caractéristiques spécifiques et au développement d'un système de requête visuel.
Les propositions de ce projet sont donc :

- de développer un prototype d'environnement distribué de connaissances 3D fonctionnant sur le Web, qui est utilisé par les archéologues pour la saisie, le stockage, le questionnement et la récupération des données 3D ;
- de développer la compréhension de la manière dont les archéologues construisent de la connaissance dans un tel environnement en recueillant des statistiques d'utilisation et des réactions.

Le système créé permet l'accès à des données 3D archivées à différents niveaux d'abstraction, et sa puissance réside dans sa capacité à accepter des requêtes posées sous diverses formes et à des hauts niveaux d'abstraction, et à retourner des résultats sous forme de visualisations avancées des objets et phénomènes 3D. Le but est que les chercheurs soient capables d'importer leurs données dans le système et d'extraire des informations géométriques interactivement. Pour la vaisselle trouvée sur les sites archéologiques particulièrement, les données 3D permettent des comparaisons évolutives visuelles et quantitatives des courbes, de la volumétrie et de la proportionnalité pour l'étude des traditions des poteries préhistoriques.

Pour l'archivage et l'indexation des données dans le système, une méthode a été développée pour chercher et récupérer de manière précise et successive les données de formes des objets 3D. Elle requiert des outils fiables d'extraction des caractéristiques des objets, des descriptions de ces caractéristiques pour cataloguer les jeux de données, des outils de transformation algébrique des formes, et une indexation basée sur un Système de Gestion de Bases de Données (SGBD). Cette indexation est structurée grâce à une base de données relationnelle objet pour l'archivage des données 3D et à des indices déterminés par des interactions continuelles avec des spécialistes en archéologie.

[3] `http://3dk.asu.edu/home.html` [réf. du 20 mai 2007]

Une interface visuelle graphique permet ensuite aux utilisateurs de saisir, analyser, raffiner et limiter leurs recherches. Les modes de requêtes sont par exemple textuels, graphiques vectoriels ou par l'intermédiaire de modèles 2D et 3D interactifs. Cette interface inclut donc des capacités de visualisation interactives rapides des surfaces et des volumes, et des outils de quantification permettant l'extraction de courbes, volumes, échelles, dimensions linéaires de chaque jeu de données. Le survol en temps réel de l'environnement 3D est également possible avec la capacité d'identifier des zones spécifiques, des éléments ou des caractères spatiaux pour faire des requêtes et des analyses s'y rapportant. Des données temporelles sont également intégrables pour permettre des comparaisons et des analyses des changements des objets dans le temps. [Razdan et Farmer, 2002]
Toutes ces fonctionnalités sont résumées dans la Figure 3.3.

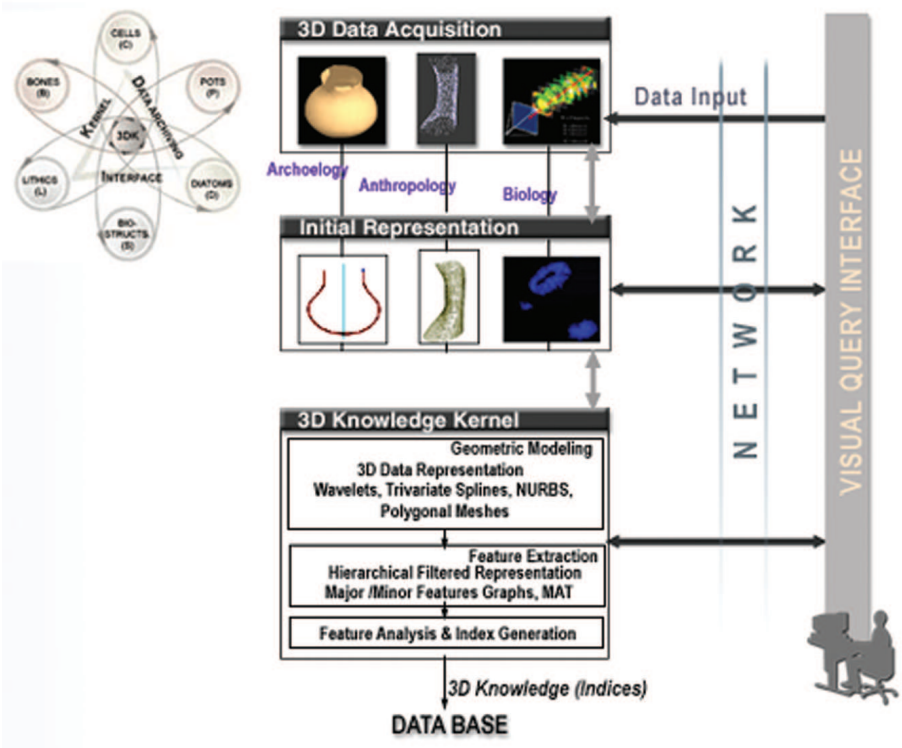


FIG. 3.3 – Vue d'ensemble schématique du projet 3DK [Razdan et Farmer, 2002]

Applicable à plusieurs domaines différents (archéologie, anthropologie, biologie), le système développé dans le cadre du projet *3D Knowledge* offre des possibilités étendues pour l'exploitation des données 3D qui sont aujourd'hui à la disposition des professionnels de ces domaines. Pour l'archéologie, nous avons déjà cité l'intérêt de la troisième dimension et de l'interactivité des modèles 3D que l'on peut désormais réaliser. De tels systèmes permettent d'en tirer le maximum de connaissances.

3.1.3 SCULPTEUR

SCULPTEUR est un projet européen (2002-2005), regroupant dix partenaires de trois pays, qui a pour but "une exploitation multimédia sémantique et à base de contenu pour un bénéfice européen"[4] des données patrimoniales. Il se base sur un partenariat multidisciplinaire regroupant les secteurs industriel et académique, la recherche, et la culture[5].
Des centaines d'archives patrimoniales européennes d'intérêt scientifique ou culturel sont conservées dans des petits ou des grands musées dispersés à travers tout le territoire. Il est nécessaire de les préserver et les protéger pour des consultations et des études, tout en les rendant disponibles pour les scientifiques, les chercheurs, les conservateurs, les historiens et le grand public. Les librairies numériques interopérables sont aujourd'hui communes pour partager les métadonnées textuelles. Elles augmentent la qualité, la disponibilité et la diversité de l'information, mais la communauté des musées est plus intéressée par les items et les artéfacts de leurs collections que par des textes uniquement. Il est donc nécessaire de leur proposer des modèles 3D sophistiqués et autres objets multimédias pour les représenter. Ceci additionné au besoin croissant d'extraction intelligente de l'information et de présentation de ressources distribuées induit une forte demande d'innovation dans les moyens d'organisation, de stockage et de récupération des informations multimédias. Une contrainte actuelle à l'adoption large de bibliothèques numériques est la quantité limitée de métadonnées structurées disponibles dans de tels systèmes. Mais il existe aujourd'hui une grande quantité d'informations appropriées disponibles sur le Web, et avec l'émergence de l'approche "Web sémantique"[6] pour la structuration des informations, il y a de nombreuses nouvelles possibilités pour enrichir les informations sur les collections multimédias par l'échange d'informations avec d'autres dépôts d'archives ou d'autres musées.
L'approche adoptée est la suivante :

- collecte des représentations 3D existant dans les musées, agrémentées avec des objets 3D créés avec des techniques innovantes comme la multi-stéréoscopie, la reconstruction à partir de silhouettes ou le scanner laser. Ces représentations sont alors stockées dans une base de données relationnelle avec des objets multimédias qui enrichissent l'information associée aux objets culturels. Les objets 3D sont retrouvés dans la base de données grâce à des algorithmes de recherche d'objets, qui exploitent les caractéristiques extraites des séquences d'images 2D, la géométrie et la texture des modèles 3D ;
- implémentation d'une couche sémantique (ontologie[7]) et d'outils innovants pour l'examen, la récupération et la navigation à l'aide du contenu intégré et de re-

[4] *semantic and content-based multimedia exploitation for European benefit*
[5] `http://www.sculpteurweb.org/` [réf. du 20 mai 2007]
[6] Ensemble des technologies visant à rendre le contenu des ressources du World Wide Web (WWW) accessible et utilisable par les programmes et agents logiciels, grâce à un système de métadonnées formelles, en utilisant la famille des langages développés par le WWW Consortium (W3C).
[7] Ensemble des connaissances relatives à un domaine : objets, concepts, relations et propriétés; ainsi que les termes les dénotant. Système de connaissances.

quêtes basées sur des concepts. Un prototype appelé "examinateur de concepts" a été développé et structuré sur l'ontologie standard CIDOC-CRM (cf. 1.1.2), pour permettre aux utilisateurs d'accéder aux données des musées partenaires collaborant dans le projet ;
- création de bases de connaissances sémantiques ciblées par les musées partenaires à partir de la couche sémantique spécifiquement conçue et des techniques développées. Ils contribuent ainsi au développement de l'ontologie avec leurs exigences et leurs évaluations ;
- développement de produits d'apprentissage en ligne qui exploitent les bases de connaissances sémantiques et montrent comment elles peuvent être exploitées comme objet d'étude adaptatif réutilisable.

Les divers utilisateurs du système ont ainsi accès à des modèles 3D des artéfacts de musées, à des images, photographies, vidéos, clips audio, descriptions textuelles, et à des jeux compréhensibles de métadonnées pour les professionnels.

Ce projet a donc permis le développement de technologies et d'expertises pour aider à la création, la manipulation, la gestion et la présentation de ces archives culturelles, en exploitant la technologie du Web sémantique, et la mise à disposition de ces données pour le public européen et mondial. L'enchaînement de l'utilisation de ces différentes technologies est illustré par la Figure 3.4. [Goodall et al., 2004, Tangelder et Veltkamp, 2004]

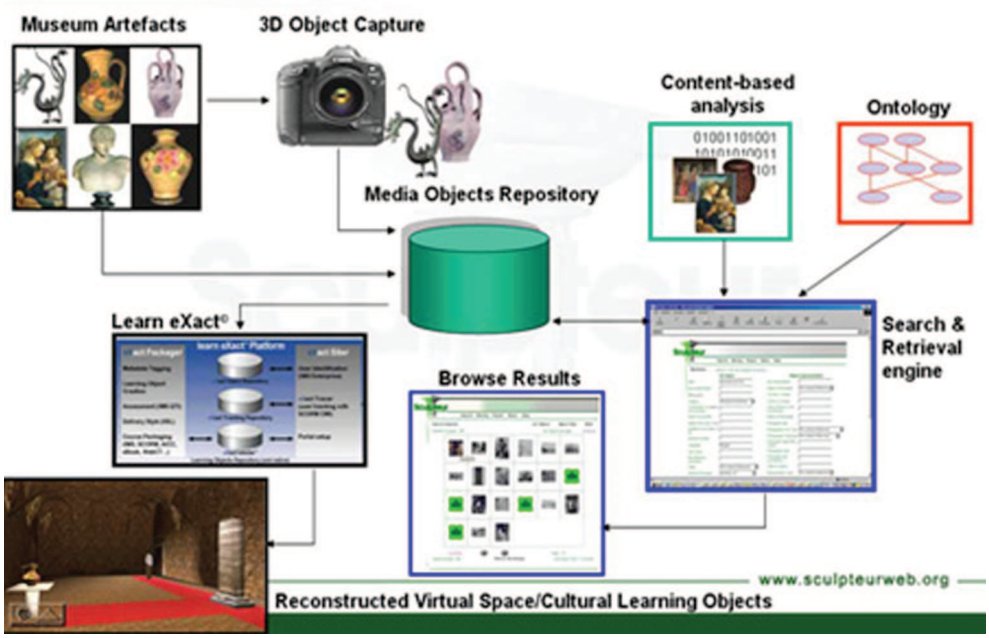


FIG. 3.4 – Fonctionnement du système SCULPTEUR [Goodall et al., 2004]

3.1.4 Nabonidus

Nabonidus est une application fonctionnant sur le Web développée pour le stockage, le partage, la manipulation et l'analyse de données de fouilles archéologiques[8]. Le but est de révolutionner la manière dont les archéologues collectent, analysent et interprètent les données de fouille.
Les avantages de cette application sont :

- une collecte simple : toutes les données de fouille peuvent être enregistrées simplement et facilement dans la base de données, qui peut être accessible tout le temps, de n'importe où dans le monde avec une connexion Internet ;
- une protection complète : toutes les données sont enregistrées avec un haut niveau de sécurité et les archéologues peuvent marquer leurs données comme privées ou publiques ;
- des résultats immédiats : le système développé donne des résultats significatifs immédiatement après y avoir entré des données (visualisation des tableaux de données, des photographies ou des matrices de Harris) ;
- des analyses croisées des fouilles : un moteur de recherche puissant permet de réaliser simplement des analyses croisées entre plusieurs fouilles ;
- une configuration simple de la fouille : l'utilisateur a un contrôle total sur la nature et les attributs des données de sa fouille qu'il souhaite enregistrer ;
- une application gratuite : pour toute fouille faite par une université ou une organisation à buts non lucratifs. Il est juste nécessaire dans ce cas de s'enregistrer dans l'application et de s'authentifier ensuite pour pouvoir ajouter les données contextuelles de la fouille en moins de cinq minutes.

Cette application Web est en cours de développement ("version Beta" disponible actuellement sur le Web) par une équipe composée de chercheurs de plusieurs universités, et elle n'a pas encore fait l'objet de publications importantes. Par contre, elle nous donne des indications par rapport aux besoins des archéologues en terme d'application Web pour la gestion des données, car elle est réalisée par des archéologues et non par des informaticiens. Les informations enregistrables pour le moment sont basées sur le contexte archéologique de la fouille. Ce sont des descriptions textuelles des artéfacts (poteries), des typologies, des dessins, des élévations, des photographies, des échantillons, des interprétations et des relations. Il est aussi possible de construire des matrices de Harris de la fouille pour la gestion de la stratigraphie de la fouille. Il n'y a pas de possibilités pour gérer des modèles 3D pour le moment.

Sur le site Internet, une démonstration est accessible pour consulter les données de différentes fouilles et tester les fonctionnalités de l'application. Des services Web sont accessibles pour donner la possibilité aux utilisateurs d'exposer les données enregistrées dans la communauté archéologique à travers des moteurs comme *OpenContext*[9] ou *Ar-*

[8] `http://www.nabonidus.org/` [réf. du 21 mai 2007], supporté par *Microsoft Research*
[9] `http://www.opencontext.org/` [réf. du 21 mai 2007]

chaeology Online UK[10]. Il y a également des possibilités de publications numériques par l'intermédiaire de la génération de fichiers .pdf contenant des données choisies par l'archéologue.
Une version allégée pour PC de poche est prévue pour permettre aux archéologues d'enregistrer leurs données en temps réel sur le terrain, par l'intermédiaire d'une "version bureau" fonctionnant hors ligne. Il est planifié également d'étendre les fonctionnalités de recherche et de gestion, pour pouvoir importer le plus de fouilles possibles dans cette application. Pour finir, les concepteurs de l'application réfléchissent à l'enregistrement des données dans un système standard comme CIDOC ou MIDAS (que nous avons déjà cités en 1.1.2) pour un échange de données facilité et une conservation peut-être plus pérenne. [Wood et Wood, 2007]
La Figure 3.5 montre comment accéder aux informations sur les contextes du site de Troie en Turquie.

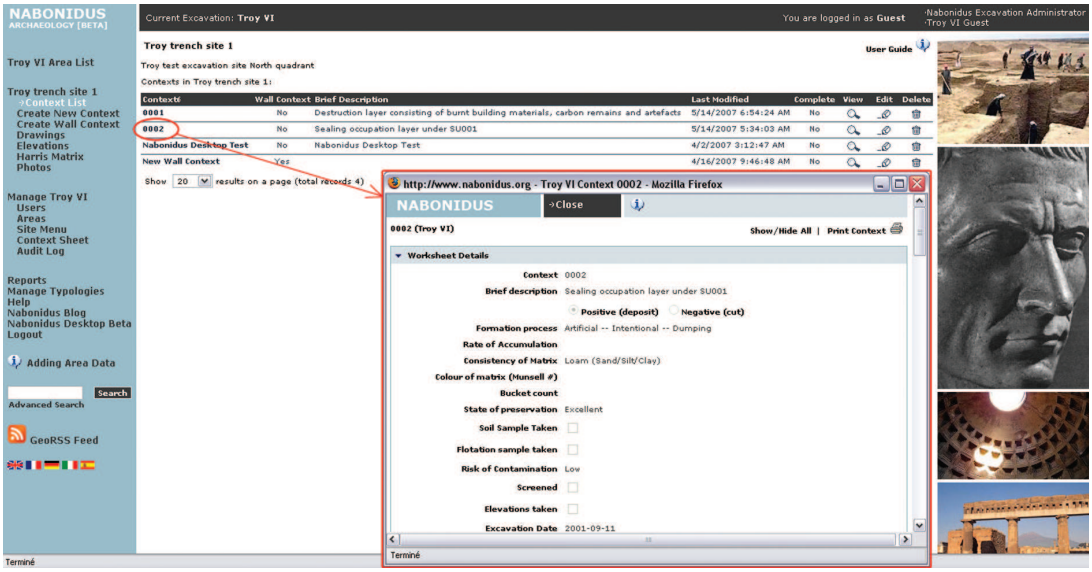


FIG. 3.5 – Accès aux informations sur les contextes dans Nabonidus [`http://www.nabonidus.org/areaDisplay.aspx?siteID=2&areaID=16` [réf. du 21 mai 2007]]

3.1.5 Silchester : un VRE pour l'archéologie

Ce projet a pour but de montrer les nouvelles directions dans lesquelles l'archéologie peut se développer en employant la recherche en ligne sur Internet. Il est mené par l'Université de Reading au Royaume-Uni et le *York Archaeological Trust* (YAT). Il permet de faciliter la réalisation de conférences en ligne à plusieurs intervenants, pour

[10] `http://archaeology.blogspot.com/` [réf. du 21 mai 2007]

aider les archéologues à communiquer en temps réel avec des experts d'autres disciplines, sans tenir compte de leur emplacement géographique. Les processus de recherche itératifs et les flux d'idées seront ainsi améliorés. Le VRE[11] comprend la collecte de données sur site et leur numérisation, ainsi que le stockage interdisciplinaire et la recherche de toutes les données ainsi rassemblées.

Les objectifs du projet sont la saisie, le stockage et la manipulation de données d'une fouille archéologique à long terme (en cours depuis 1997) de la ville romaine de Silchester dans l'Hampshire (qui est un des plus grands sites romains d'Angleterre)[12]. Les données comprennent une grande variété de fouilles liées à ce site et des rapports de fouilles qui sont stockés dans la "Base de Données Archéologiques Intégrée" IADB[13] du YAT. Les types de données gérées par le système sont divers : numismatiques, plans des sites, informations matricielles (Harris), ainsi qu'une grande variété de données sur les types d'évidences trouvées et leur distribution sur le site. Le VRE développé pour ce site archéologique est l'outil de base pour l'analyse des données "post-fouilles" du site qui est complexe et très stratifié, le but étant de rendre accessibles sur le Web tous les rapports de fouilles et les découvertes, et d'utiliser les enregistrements faits dans la IADB comme sources principales de toutes les publications, aussi bien imprimées que numériques.

Un tel système est nécessaire, car tous les ans le site est fouillé pendant huit semaines, ce qui implique une récolte d'informations intensive avec un personnel et un temps limités. Par conséquent, les équipes de fouilles ont reconnu un besoin pour un réseau d'expertises humaines plus fluide et plus accessible. Beaucoup d'experts sont dispersés géographiquement, entre eux, du site et des informations pertinentes qui sont à différents endroits. Les échanges d'idées et d'interprétations sont donc très compliqués, alors qu'ils sont essentiels pour mener des recherches efficaces. Ceci est un des plus grands problèmes reconnu depuis longtemps en archéologie, auquel le projet Silchester

[11] VRE ou *Virtual Research Environment* est un terme qui a été introduit par le JISC (dont nous avons déjà parlé en 2.2.3) qui soutient un programme pour le développement d'"Environnements de Recherche Virtuels" (`http://www.jisc.ac.uk/whatwedo/programmes/programme_vre.aspx` [réf. du 21 mai 2007]). Le but de ce programme est d'aider les chercheurs dans toutes les disciplines (notamment l'archéologie) qui gèrent une gamme de plus en plus complexe de tâches impliquées dans l'exécution de recherches. Un VRE fournit une structure de ressources pour soutenir les processus sous-jacents de la recherche tant à petite qu'à grande échelle, particulièrement pour les disciplines qui ne sont pas bien desservies par les infrastructures actuelles. Un VRE ajoute de la valeur aux processus de recherche à travers toutes les disciplines, en traitant les ressources existantes et en étant flexible et adaptable à des exigences changeantes. L'approche est basée sur une architecture qui est extensible et supporte les ressources dont on besoin des équipes de recherche individuelles ou des groupes de recherche. Le concept de VRE est évolutif et l'intention du programme du JISC n'est pas de produire un VRE complet, mais de définir et d'aider au développement d'une structure commune et de ses standards associés, et d'encourager d'autres à travailler dans cette structure pour développer et diffuser les VREs avec des applications, services et ressources appropriées à leurs besoins.

[12] `http://www.silchester.reading.ac.uk/index.html` [réf. du 21 mai 2007]

[13] *Integrated Archaeological DataBase* `http://www.suat.demon.co.uk/iadb/iadb.htm` [réf. du 21 mai 2007]

se propose de fournir la base d'une solution virtuelle.

L'idée maîtresse est de développer un système pour faciliter le développement rapide et la recherche archéologique itérative en synchronisant les trois processus suivants : recueil d'informations, coordination d'expertises et gestion du jeu de données résultant. Les objectifs spécifiques résultant de cette idée sont les suivants :

- établir une interopérabilité totale entre différents jeux de données de l'IADB, où qu'ils soient stockés ;
- améliorer la collecte des données en temps réel sur le site, en faisant une évaluation de l'utilité des ordinateurs de poche (PDA) connectés sans fil (Wifi) ou par l'intermédiaire d'un téléphone portable (GPRS) ;
- développer un mécanisme structuré pour classifier des domaines de recherche spécifiques, qui fonctionneront à travers des serveurs ou des projets ;
- développer une structure pour la réalisation de conférences en ligne en temps réel impliquant autant des chercheurs travaillant sur des projets sur site que en-dehors, ainsi que des spécialistes éloignés.

Pour le grand public, un site Web a été conçu pour l'accès et la visualisation de tous les types de données enregistrés dans la IADB : descriptions textuelles, plans, photographies, et plans interactifs pour la navigation dans différents lieux de la ville (le clic permet d'accéder aux pages descriptives des lieux) et pour visualiser les périodes de fouilles (Figure 3.6). Un explorateur de matrices de Harris est également disponible

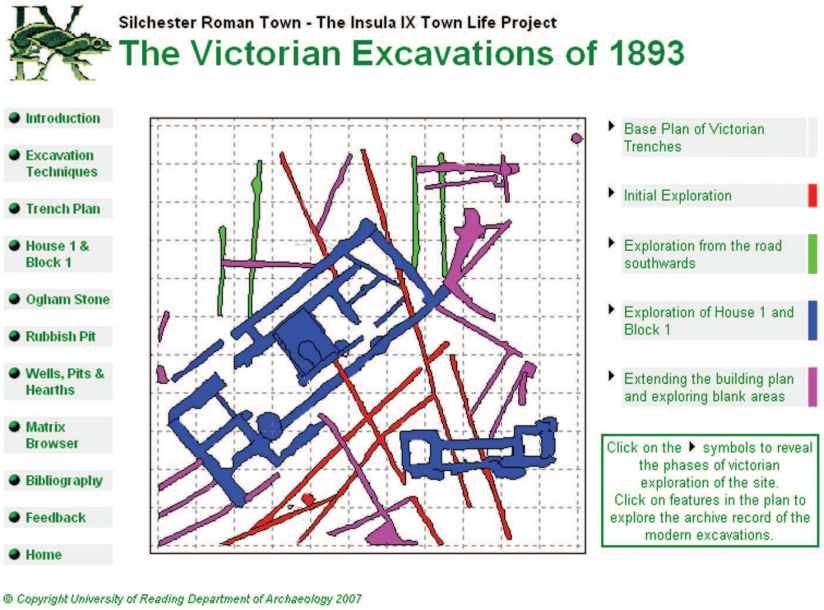


FIG. 3.6 – Visualisation des périodes de fouilles du site de Silchester [`http://www.silchester.rdg.ac.uk/victorians/clickmap.php` [réf. du 21 mai 2007]]

pour visualiser la stratigraphie du site, et utiliser les données de la matrice comme des indices d'accession à l'archive complète de la strate fouillée choisie. Ce moyen d'accès aux données est appelé dans le système "matrice stratigraphique" (Figure 3.7) ; il est complété par un diagramme structurel de la fouille (Figure 3.8) et par un guide interactif (Figure 3.9). Ce sont les trois interfaces privilégiées d'accès aux données dans le VRE consacré à Silchester. [Stewart et al., 2004]

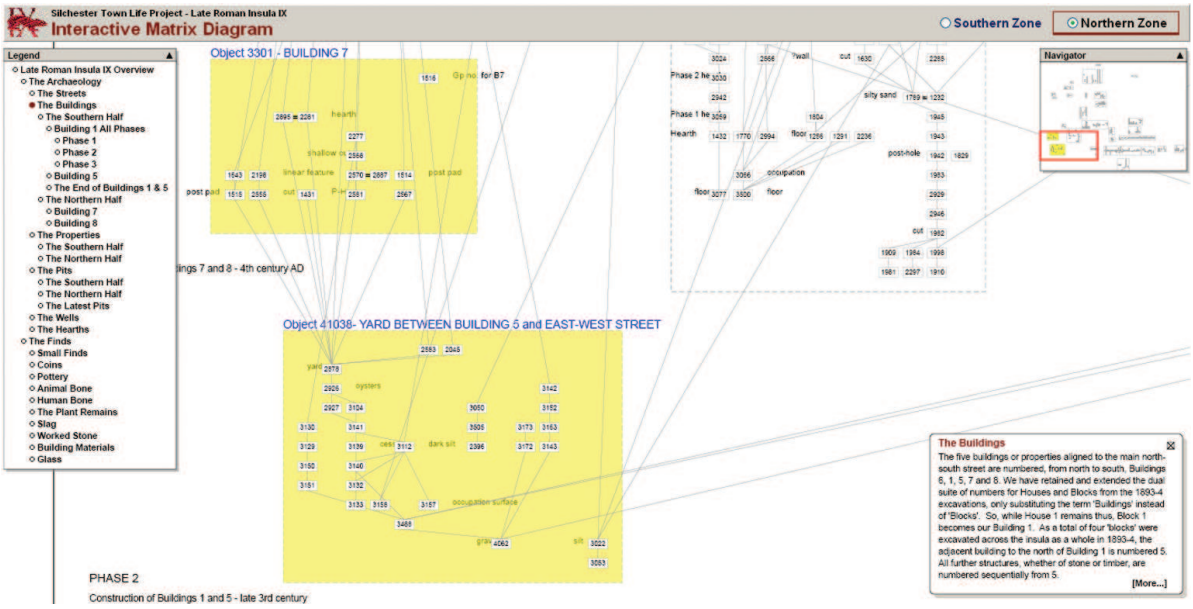


FIG. 3.7 – Diagramme matriciel interactif du site de Silchester [`http://www.silchester.rdg.ac.uk/later/matrix.php` [réf. du 21 mai 2007]]

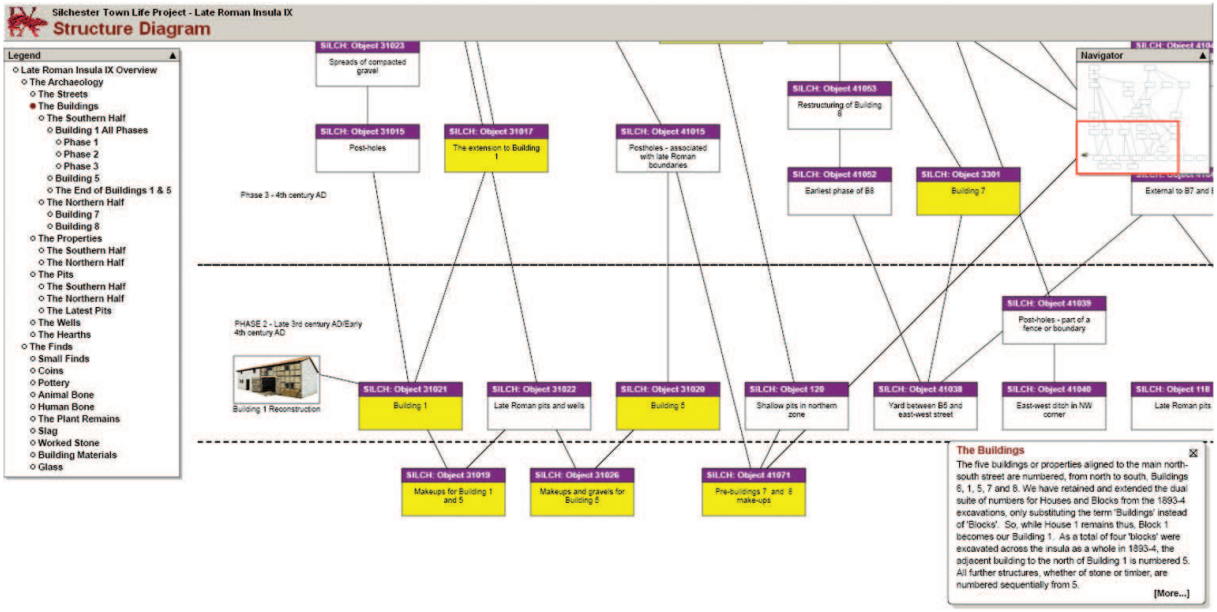


FIG. 3.8 – Diagramme structurel du site de Silchester [`http://www.silchester.rdg.ac.uk/later/structure.php` [réf. du 21 mai 2007]]

Il est difficile de communiquer et de référencer les données archéologiques de terrain en dehors du champ des personnes qui sont concernées par la fouille ou qui la financent. Par conséquent, il est difficile d'engager un large public dans la compréhension de la nature de l'archéologie et dans l'écriture de son histoire, par l'intermédiaire de preuves matérielles et environnementales. Le projet de VRE sur Silchester a donc été mené pour améliorer l'accès par divers moyens aux données de cette fouille archéologique bien établie et à long terme. On peut cependant se poser la question de la reproductibilité d'un tel système pour d'autres fouilles importantes, ce qui est essentiel pour les comparaisons et les interactions qu'il serait alors possible d'établir.

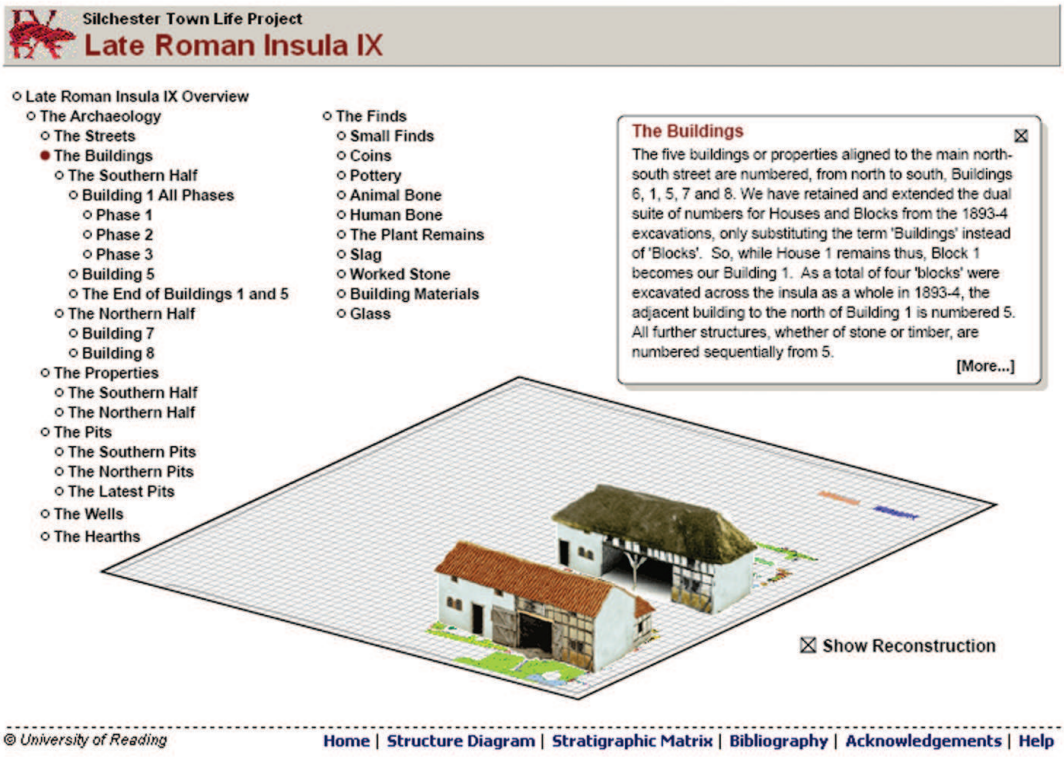


FIG. 3.9 – Guide interactif du site de Silchester [`http://www.silchester.rdg.ac.uk/later/siteplan.php` [réf. du 21 mai 2007]]

Conclusion

Les projets de recherche que nous avons détaillés nous montrent les approches adoptées actuellement pour créer des systèmes de gestion et de représentation complexes des données archéologiques, que ce soit des données de muséologie (archives culturelles), des données de fouille ou des modèles 3D spécifiquement[14]. Le principal point commun de ces exemples est qu'ils soulignent tous l'intérêt de communiquer les données archéologiques sur Internet, que ceci ait été fait dès le départ ou que les équipes y aient songé à la fin de leurs développements. En effet, comme nous l'avons souligné dans la partie 2.2, permettre à la communauté archéologique ainsi qu'au grand public d'accéder librement à des sites archéologiques complètement documentés favorise l'échange de connaissances et accroît l'intérêt du public pour la préservation du patrimoine. De plus, offrir des systèmes ouverts permet d'éviter à l'archéologue d'être contraint d'acheter un système qui risque d'être obsolète un jour, et qui l'empêche en général de documenter ses données exactement comme il le souhaite.

[14] le projet 3DK nous donne des indications quant à une exploitation optimale des données 3D comme base de connaissances

Ces exemples donnent surtout un aperçu de l'orientation des recherches actuelles en terme de gestion et de représentation de données pour la documentation archéologique. Ils nous permettent de situer nos recherches au confluent de ces réflexions, comme nous le verrons dans les propositions du Chapitre 4. Mais avant de les formuler, il faut désormais conclure cette étude bibliographique qui nous a permis de définir les besoins des archéologues, et qui par conséquent a guidé notre réflexion pour la mise en œuvre d'un Système d'Information (SI) pour la documentation du patrimoine.

3.2 Bilan de l'Etat de l'Art

L'étude contextuelle très large que nous avons menée nous permet de comprendre l'intérêt d'utiliser et de développer des outils informatiques avancés pour l'archéologie, et également de dégager les attentes des professionnels du patrimoine par rapport à un nouvel outil qui pourrait leur être proposé pour les assister dans la documentation et le partage de leurs travaux.
Le Tableau 3.1 résume ces intérêts et ces besoins dans les domaines de la saisie (bases de données) et de la visualisation des données (domaines sous-jacents à la conception d'un SI), puis pour le Système d'Information lui-même et la documentation.

	Intérêts	Besoins
Saisie	- les structures relationnelles permettent l'enregistrement de données très hétérogènes et de leurs relations - les bases de données permettent la conservation informatisée et organisée de données irremplaçables	- réaliser une analyse conceptuelle en accord avec le contexte des données pour dégager des informations pertinentes - SGBD souple, évolutif, adaptable aux préoccupations de chaque professionnel - standards dans les systèmes d'enregistrement pour assister la création et la diffusion des informations - compatibilité entre bases de données - enregistrement des données primaires (brutes) et secondaires (contexte, documents, analyses...), donc de métadonnées en plus des données - enregistrement de données spatiales et temporelles - standards pour les métadonnées (pour savoir quoi enregistrer à propos de quoi) pour structurer et permettre les recherches - schémas pour les métadonnées correspondants aux différentes disciplines archéologiques - conformité avec les standards nationaux ou internationaux - mise en ligne sur le Web pour l'accessibilité et le partage avec un maximum d'utilisateurs

	Intérêts	Besoins
Visualisation	- création d'images, de photographies, d'images de synthèse, de modèles 3D pour la restitution, la reconstitution, la représentation, et comme aide pour la compréhension du public - comparaisons d'hypothèses de reconstitution - transformation de données en informations par des interprétations adaptées aux utilisateurs - un modèle 3D peut être vecteur d'interactivité et permet d'examiner entièrement l'objet modélisé - un modèle 3D donne une représentation synthétique de grandes quantités d'informations - un modèle 3D peut être un outil de visualisation des connaissances, un outil de navigation dans un jeu de données, un support pour les phases d'interprétation des connaissances - la réalité virtuelle montre les aspects multidimensionnels des données trouvées sur le site	- représenter la fragilité de la réalité archéologique, distinguer ce qui est hypothétique de ce qui est réel - impliquer l'archéologue dans la conception du modèle 3D - guider la conception graphique par les exigences et les moyens techniques de l'utilisateur - adapter la conception de la réalité virtuelle aux besoins de l'utilisateur destinataire - faire un système de visualisation qui se rapproche de la manière naturelle d'interpréter et de communiquer des informations - adopter des formats libres et standards si possible (éviter les formats propriétaires) - bien documenter la conception des modèles de réalité virtuelle grâce à des métadonnées - se soucier de l'archivage et de la réutilisation des modèles ultérieurement - mise en ligne sur le Web pour la communication visuelle des données et la navigation dans les modèles
Système d'Information	- contient les données et les méthodes de traitement - capacité de traitement de grandes quantités de données hétérogènes - prise en compte de l'ensemble des données et de leurs relations - inclut la saisie, la gestion, l'analyse et la représentation des données - aspects thématiques et interactifs qui permettent la multiplicité des possibilités de requêtes - dimensions spatiales et temporelles - tests progressifs d'hypothèses et d'interprétations	- flexibilité - SI à l'échelle du site archéologique - standards pour la saisie, la description, le transfert de données, correspondants aux besoins des archéologues et diffusés pour une adoption large - schéma de conception flexible et souple tout en respectant un format standard - mise en ligne sur le Web, ou conception grâce à des applications Web - intégration de modèles 3D et utilisation comme interface entre les données et le monument ou le site - s'inspirer des travaux en architecture pour modéliser les évolutions temporelles du site
Documentation	- amélioration du ratio entre matériel disponible et matériel publié - conservation et accès dans un seul système à tous les documents produits - partage et communication des informations entre professionnels et avec le grand public	- gestion sur le Web pour effacer la distinction entre publication et archive - simplicité d'utilisation du système servant à la documentation : une seule procédure pour enregistrer tous les types de données, et possibilité de requêtes sous-jacentes - souplesse dans l'architecture des données pour gérer le vocabulaire particulier de toutes les disciplines - solution applicable à plusieurs sites - métadonnées pour les éléments d'indexation des documents - visualisation du corpus des données - représentation schématique de l'organisation des documents entre eux (aide les utilisateurs pour la navigation)

TAB. 3.1 – Récapitulatif des intérêts et des attentes des archéologues par rapport à un Système d'Information pour la documentation

Compte tenu de ces constatations, nous pouvons désormais définir notre problématique de recherche pour la conception d'un Système d'Information dédié à la documentation du patrimoine.

Deuxième partie

Présentation de l'approche

Chapitre 4

Vers un Système d'Information pour la documentation patrimoniale

4.1 Problématique

L'étude bibliographique que nous avons réalisée, nous a permis de constater que la documentation du patrimoine archéologique requiert des systèmes informatiques complexes (en termes de conservation et de visualisation des données), flexibles et ouverts. Elle nous permet d'isoler quatre préoccupations distinctes pour la définition de notre approche de documentation patrimoniale.

Utilisation d'Internet. Le développement des technologies dédiées au réseau Internet et l'avènement du Web participatif (Web 2.0) induisent la possibilité de réaliser des Systèmes d'Information directement à l'aide de ces technologies. La mise en ligne sur Internet de ressources archéologiques est un facteur d'accessibilité et de partage entre professionnels. De plus, cela permet de les communiquer visuellement de manière attractive pour le grand public, par exemple par l'intermédiaire de modèles tridimensionnels de fouilles ou de reconstitutions virtuelles. La mise à disposition de toutes sortes de données archéologiques sur le Web permet d'effacer la traditionnelle distinction entre publication et archive, ce qui induit la documentation complète des travaux réalisés.

Conservation des données. La nature hétérogène des données archéologiques implique leur enregistrement dans des bases de données relationnelles, évolutives et adaptables aux préoccupations de chaque archéologue. Il est important de conserver à la fois les données primaires et les données secondaires, ainsi que des métadonnées s'y rapportant, pour avoir des jeux de données les plus complets et les

plus documentés possibles.

Gestion des données. La gestion efficace des ressources archéologiques implique la possibilité de faire des liens entre toutes ces données, notamment aux niveaux spatial et temporel, mais également entre un type de donnée et un autre. De plus, cela permet alors de proposer différents types d'accès aux données, aussi bien thématiques qu'interactifs. Il est notamment intéressant de proposer des modèles tridimensionnels réalisés à partir des données, pouvant ensuite servir d'interface d'accès à ces informations.

Représentation des données. La visualisation des données conservées passe par l'exploitation des données d'imagerie ou par la conception de modèles 3D donnant une représentation synthétique de grandes quantités d'informations. Il peut aussi être intéressant de proposer la visualisation du corpus des données, la création de vues thématiques paramétrables ou la génération "en temps réel" de représentations originales choisies par l'utilisateur.

La nécessité d'utiliser des formats standardisés pour la conservation et la visualisation des données est une préoccupation commune qui a guidé nos choix pour les différents aspects du Système d'Information que nous proposons. De même, nous avons gardé à l'esprit le besoin d'un système de documentation simple d'utilisation et souple, de sorte qu'il puisse être utilisé dans différents contextes par différentes personnes.

En accord avec notre sujet de recherche, la question centrale que nous nous posons alors est *de savoir si la conception d'un Système d'Information sur Internet, combinant des données relevées et restituées, peut assister les archéologues pour la documentation et le partage de leurs travaux avec d'autres professionnels et avec le grand public.*

4.2 Structure de l'approche

Pour commencer, nous traiterons dans le prochain chapitre la première préoccupation que nous avons isolée : l'**environnement de développement** du Système d'Information. Nous décrirons le principe du Web participatif, ainsi que la suite logicielle libre que nous avons utilisée comme base de notre Système d'Information. Nous définirons également l'**échelle** à laquelle nous avons choisi de travailler pour développer notre proposition.

Puis, nous présenterons des travaux ayant été menés par des collègues du laboratoire Gamsau (Marseille) de l'UMR CNRS MAP (UMR à laquelle notre laboratoire est également rattaché). En effet, comme nous l'indiquions à la fin de la section 1.2.4, les développements informatiques sur lesquels nous avons fondé notre Système d'Information

ont été réalisés par des collègues de ce laboratoire dans le cadre d'un projet pour la gestion sur Internet de données de l'archéologie sous-marine [Drap, 2001, Drap et al., 2003]. Nous expliquerons ce projet et les fonctionnalités des outils développés, afin de montrer pourquoi certains aspects de ce système ont pu nous servir de **base pour la conception** de notre Système d'Information.

Enfin, dans la troisième grande partie de ce mémoire, nous ferons des propositions pour un modèle de Système d'Information dédié à la documentation du patrimoine. En conformité avec les problématiques énoncées, notre approche est organisée en trois phases :

Un principe de conservation des données basé sur les types de données qu'il faut enregistrer pour réaliser une documentation complète. Nous verrons comment nous avons formalisé ces données pour pouvoir conserver les métadonnées indispensables à la conservation de leur contexte. Puis nous expliquerons les processus de saisie et de révision des données dans le Système d'Information.

Des outils de gestion des données reposant sur les liaisons qui peuvent exister entre les différents types de données documentaires, objets, spatiales et temporelles. Nous expliquerons comment nous avons réalisé ces liaisons, puis nous détaillerons les aspects thématiques et interactifs de notre Système d'Information qui permettent de multiples possibilités de requêtes sur les données. Particulièrement, nous détaillerons la création de représentations interactives en 2D et en 3D destinées à être des supports privilégiés de navigation et d'interaction avec tous les autres documents conservés dans le Système d'Information.

Des moyens de représentation des données permettant à l'utilisateur d'avoir une vision synthétique des informations conservées dans le Système d'Information. Nous expliquerons un outil permettant d'accéder rapidement aux corpus des métadonnées de toutes les instances de données suivant leur type. Puis nous verrons comment réaliser des vues des données dans des tableaux thématiques et synthétiques. Pour finir, nous détaillerons la génération de représentations 2D et 3D originales par l'intermédiaire de requêtes spatiales et/ou temporelles sur les données 2D et 3D initiales.

Nous terminerons par la présentation de la modélisation globale du Système d'Information développé. Celle-ci peut être considérée comme un **métamodèle** de SI permettant à d'autres d'implémenter un système équivalent, éventuellement avec des technologies différentes, mais poursuivant les mêmes buts pour répondre au mieux aux besoins des professionnels du patrimoine.

Chapitre 5

Environnement de développement et échelle de travail

5.1 Utilisation de logiciels libres pour une implémentation sur Internet

Nous avons choisi de concevoir le Système d'Information à l'aide de technologies en accès libre sur Internet. En effet, le fait de devoir acheter un logiciel pour la gestion de leurs données est souvent un frein pour les archéologues qui souhaiteraient informatiser cette tâche. De plus, ils redoutent souvent d'être prisonniers d'un format propriétaire qui pourrait les empêcher d'échanger des informations avec d'autres collègues. Ainsi, proposer un système gratuit, permettant la conservation et la représentation des données dans des formats standardisés, et donnant en plus la possibilité de les communiquer sur Internet si l'archéologue le souhaite, peut être une réelle valeur ajoutée par rapport à des systèmes commerciaux figés et nécessitant souvent une formation approfondie pour pouvoir être utilisés de manière optimale. De plus, nous permettons la gestion, la visualisation et l'accès dans un seul système à tous les documents produits.

Réaliser un Système d'Information sur Internet induit la possibilité pour l'utilisateur d'ajouter ou de modifier du contenu dans des pages Web, car celles-ci sont générées à partir d'une base de données sous-jacente. Ce principe de création de contenu sur le Web est une des caractéristiques de ce que l'on appelle le Web participatif ou Web 2.0[1]. Ce terme a été introduit en 2004 lors d'une conférence de travail entre deux sociétés pionnières du Web (O'Reilly et Medialive International), et est souvent utilisé pour désigner ce qui est perçu comme une transition importante du World Wide Web passant d'une

[1] `http://web2rules.blogspot.com/2006/01/what-is-web-20-par-tim-oreilly-version.html` [réf. du 28 mai 2007]

collection de sites Web à une plate-forme informatique à part entière, et fournissant des applications Web aux utilisateurs.
Les données sont la base du fonctionnement du Web participatif, surtout lorsqu'elles sont susceptibles d'être entretenues par un réseau d'utilisateurs. Elles sont le composant essentiel de systèmes dont l'infrastructure est largement *open source*[2] ou tout du moins collaborative. La gestion de bases de données est au coeur des métiers des sociétés du Web 2.0, à tel point que l'on donne parfois à leurs applications le nom d'*infoware* plutôt que *software* ("infogiciel" plutôt que logiciel). Des langages de script tels que Perl, Python, PHP et maintenant Ruby jouent un rôle important dans les entreprises du Web 2.0. Ces langages dynamiques (souvent appelés langages de script) sont un outil de choix aussi bien pour les administrateurs réseaux et systèmes, que pour les développeurs d'application élaborant des systèmes dynamiques en perpétuel changement. De même, le fait de proposer des "contenus actifs" à l'intérieur du navigateur procure une richesse d'interface également caractéristique de cette nouvelle génération du Web. Il y a de plus en plus d'innovations dans l'interface au fur et à mesure que les développeurs deviennent capables de réaliser des applications Web aussi riches que les applications locales classiques.
En combinant les forces du Web avec une approche ergonomique proche des interfaces de logiciels commerciaux habituels, la réalisation d'applications s'inscrivant dans les concepts du Web 2.0 permet de révolutionner la manière dont Internet est perçu. C'est ce que nous souhaitons montrer par notre proposition de Système d'Information patrimonial conçu à partir de technologies disponibles librement sur Internet. Nous verrons par la suite que notre système correspond bien à l'esprit du Web 2.0 que nous venons de décrire.

D'un point de vue technique, les composants de base nécessaires pour concevoir un Système d'Information sur Internet sont un serveur Web, un serveur de base de données et un langage de script.
Un serveur informatique est un ordinateur ou un programme informatique qui rend service aux ordinateurs et logiciels qui s'y connectent à travers un réseau informatique (les clients). Ce service peut consister à stocker des fichiers, transférer le courrier électronique ou héberger un site Internet. Il est possible pour un ordinateur d'être client et serveur en même temps. Ces termes client et serveur viennent du fait qu'un client est demandeur d'un service et qu'un serveur rend ce service. On parle souvent d'architecture client-serveur pour désigner un mode de communication entre des logiciels. Un logiciel envoie une requête à un logiciel serveur qui lui répond, le tout suivant un protocole de communication. Un serveur Web est un serveur informatique particulier sur lequel fonctionne un logiciel serveur HTTP. Ce logiciel sert des requêtes respectant le protocole de communication client-serveur HyperText Transfer Protocol (HTTP), qui a été développé pour le World Wide Web (pratiquement la totalité des pages Web sont servies avec ce protocole).

[2]Les principaux critères pour un logiciel *open source* sont la libre redistribution, un code source disponible et des travaux dérivés possibles.

Un serveur de base de données est un Système de Gestion de Bases de Données (SGBD, cf. 1.1.1) libre et partageant ses données avec d'autres ordinateurs ou d'autres logiciels par l'intermédiaire d'un réseau.
Un langage de script est un langage de programmation permettant de raccourcir le processus traditionnel de développement d'un programme (édition/compilation/édition). A la base, un script servait principalement à lancer et coordonner l'exécution de programmes. Dans sa version la plus simple, un script n'est qu'une suite de programmes à exécuter dans l'ordre. La possibilité d'y employer des variables, des paramètres ou des structures de contrôle (répétition, exécution conditionnelle) fait des langages de scripts de véritables langages de programmation. Communément, on appelle langage de script tout langage de programmation interprété (en opposition avec les langages compilés)[3].

Il existe des suites logicielles libres incluant ces trois types de composants pour une utilisation simple de ces technologies dans un environnement intégré. Elles sont souvent désignées comme des *middleware* ou intergiciels. Ce terme désigne une couche logicielle située entre les couches basses (systèmes d'exploitation, protocoles de communication) et les couches hautes (applications) dans un système informatique. Le but est de faciliter le développement des applications, en masquant l'hétérogénéité des systèmes sous-jacents et les détails de leurs mécanismes, et en fournissant des interfaces normalisées de haut niveau. Par exemple, il y a beaucoup d'intergiciels qui relient un SGBD et un serveur Web, ce qui permet aux utilisateurs de retrouver des données de la base de données en utilisant des formulaires affichés dynamiquement sur un navigateur Web. Un des ces intergiciels les plus populaires est nommé LAMP, ce qui désigne :

- Linux, le système d'exploitation ;
- Apache, le serveur Web ;
- MySQL, le serveur de base de données ;
- PHP à l'origine, puis Perl ou Python, les langages de script.

Nous avons choisi d'utiliser cette suite logicielle pour concevoir notre Système d'Information, car n'étant pas des informaticiens, nous avons apprécié sa simplicité d'installation et d'utilisation. Nous travaillons sur le système d'exploitation Windows, pour lequel le pendant de LAMP s'appelle WAMP. Les rôles des quatre composants de WAMP sont les suivants :

- Apache est le serveur web "frontal" : il est "devant" tous les autres et répond directement aux requêtes du client Web (navigateur) ;
- le langage de script sert la logique ;
- MySQL stocke toutes les données de l'application ;
- et Windows assure l'attribution des ressources à ces trois composants.

Tous les composants de cette plate-forme de développement Web peuvent être situés sur une même machine ou sur deux machines (généralement Apache et le langage de script d'un côté, et MySQL de l'autre). L'articulation de ces composants est schématisée sur

[3]Un programme écrit en langage interprété est converti en instructions directement exécutables par la machine au moment de son exécution, alors qu'un programme écrit en langage compilé est traduit en instructions lisibles par la machine une fois pour toutes.

la Figure 5.1.

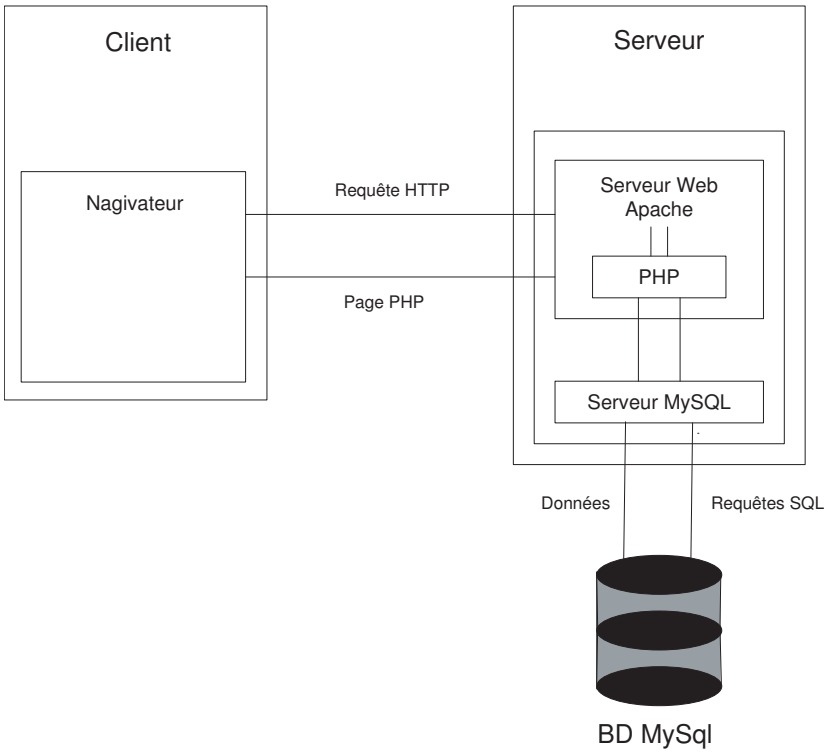


FIG. 5.1 – Architecture client-serveur dynamique

Comme langage de script, nous avons choisi le langage de base de la suite, c'est-à-dire PHP. Le nom de ce langage mis au point en 1994 provient de *Personal Home Page*, car il avait permis à son concepteur de conserver la trace des utilisateurs venant consulter son CV sur son site, grâce à l'accès à une base de données, et de créer des applications dynamiques et simples pour le World Wide Web. Le langage PHP est principalement un langage de programmation Web côté serveur, ce qui veut dire que c'est le serveur (et non la machine client) qui va interpréter le code PHP et générer du code qui pourra être interprété par un logiciel. Le plus souvent, le code généré est le HTML (*HyperText Markup Language*) afin d'être lu par un navigateur, mais il peut être utilisé pour d'autres langages ou formats (comme nous le verrons dans le Chapitre 9).
Nous avons choisi ce langage car il a été conçu pour permettre la création d'applications dynamiques, le plus souvent dédiées au Web. Comme l'induit la suite WAMP, PHP peut être installé sur les principaux serveurs Web du marché comme Apache. Ce couplage permet de récupérer des informations issues d'une base de données, d'un système de fichiers (contenu de fichiers et de l'arborescence) ou plus simplement des données envoyées par le navigateur afin d'être interprétées ou stockées pour une utilisation ultérieure. Libre, gratuit, simple d'utilisation et d'installation, ce langage nous a semblé

une bonne solution pour pouvoir implémenter les fonctionnalités de notre système.

Enfin, l'utilisation de WAMP implique le stockage des données dans un SGBD libre appelé MySQL. MySQL est un serveur de bases de données relationnelles SQL[4] développé dans un souci de performances élevées. Il est multi-processus et multi-utilisateurs. C'est un logiciel libre développé sous double licence en fonction de l'utilisation qui en est faite dans un produit libre (*open-source*) ou dans un produit propriétaire. Associé à PHP, un outil d'administration nommé PhpMyAdmin permet de gérer les bases de données créées dans MySQL. Nous verrons dans le détail la création de bases de données dans MySQL par l'intermédiaire de PhpMyAdmin dans le chapitre traitant de la conservation des données (Chapitre 7).

Maintenant que notre plate-forme de développement Web est définie, nous pouvons introduire les terrains d'expérimentation sur la base desquels nous avons développé notre SI. Particulièrement, nous indiquerons à quelle échelle (territoriale ou locale, cf. 1.2.3) nous avons choisi de travailler, car cela a conditionné le choix des applications du système.

5.2 Choix de l'échelle de travail

Nous avons discuté longuement dans la partie 1.2 de l'utilisation classique des Systèmes d'Information Géographique en archéologie, et des difficultés qui existent dans leur application à une échelle locale. De plus, réaliser un système pour la documentation patrimoniale en général implique la gestion de données qui ne sont pas nécessairement "spatialisables", donc qui sont difficiles à intégrer dans les SIG proposés actuellement. Nous avions également indiqué en 1.2.4 que la réalisation de Systèmes d'Information généraux (en opposition avec des systèmes géographiques purs) peut être une bonne solution pour offrir un moyen de gérer les informations très hétérogènes résultant des travaux archéologiques.
Partant de ces constatations, nous avons décidé de nous concentrer sur l'exploitation de toutes sortes de documents provenant de sites patrimoniaux. Les expérimentations que nous présenterons ont donc été réalisées sur la base de documents concernant des sites archéologiques particuliers. Nous ne nous situons pas dans le champ des SIG destinés principalement à la gestion de données spatiales à l'échelle d'un territoire ou d'un pays. Les données que nous enregistrons dans notre base de données ne sont pas les données classiquement gérées par les SIG (points, lignes, surfaces) qui sont ensuite représentées à partir des enregistrements de la base de données. Au contraire, nous gérons la documentation du site archéologique, c'est-à-dire aussi bien les artéfacts, que les plans réalisés par l'archéologue lors de ses fouilles ou les modélisations tridimensionnelles du

[4] *Structured Query Language*, déjà évoqué dans le paragraphe 1.1.1

site qui ont pu être réalisées pour sa mise en valeur.

Pour pouvoir développer nos propositions pour un Système d'Information dédié à la documentation de sites archéologiques, il fallait que nous puissions avoir accès à des données documentaires classiques (rapports et plans de fouilles, photographies, monographies, descriptions textuelles, croquis d'objets archéologiques...) mais également à des données issues de modélisations virtuelles. En effet, nous avons souligné en 1.2.4 l'avantage de fournir des modèles 3D en plus des données classiques, car cela permet de mieux comprendre et appréhender le site archéologique, et cela améliore la communication avec le grand public notamment.

Au sein du laboratoire CRAI de l'Ecole d'Architecture de Nancy auquel je suis rattachée, il s'est avéré que des travaux étaient menés depuis plusieurs années pour la modélisation des évolutions historiques du Château de Vianden situé au Luxembourg. En effet, dans le cadre de la valorisation des fouilles archéologiques et de la communication du travail historique effectué sur ce monument, il était prévu la réalisation de documents multimédia présentés au public visiteur du nouveau musée du château. Parmi les dispositifs didactiques mis à la disposition du public, on trouve des panneaux d'information, un document audio-visuel, un programme interactif de réalité virtuelle. Certains de ces dispositifs sont plus particulièrement consacrés à l'histoire architecturale du site, son évolution, ses transformations, mais également aux méthodes d'investigation archéologique. Les moyens techniques utilisés nécessitent la réalisation d'images de synthèse, d'animations virtuelles et de reconstitutions virtuelles diverses, car ils permettent de nombreux effets irréalisables par des techniques plus traditionnelles. Des modèles 3D des différentes phases architecturales du château ont donc été réalisés (Figure 5.2) et mis à notre disposition. De plus, il a été possible d'accéder aux documents ayant permis de les produire, et à toutes les autres données issues des travaux réalisés sur ce château, qui est géré par le Service des Sites et Monuments Nationaux du Luxembourg depuis la fin des années 70. Ce site a donc été un premier terrain d'expérimentation idéal pour le développement de notre Système d'Information. Nous donnons des précisions sur le site du Château de Vianden dans l'Annexe A.

Puis pour tester le Système d'Information avec des données provenant d'un site différent, nous nous sommes naturellement tournés vers un autre site géré par le Service des Sites et Monuments Nationaux du Luxembourg, pour lequel le CRAI a également réalisé des modélisations : la villa gallo-romaine d'Echternach. Dans ce cas, le travail était de réaliser des reconstitutions destinées à être utilisées comme composantes d'une muséographie. En effet, lorsque le Service des sites et monuments nationaux du Luxembourg entreprit les fouilles sur ce site en 1975-76, les différents relevés, stratigraphies, fragments, fournirent quantité d'informations qui furent ensuite analysées et rassemblées en 1981 dans l'ouvrage de référence traitant de ce site : *Ausgrabungen in Echternach* [Zimmer et al., 1981]. Au fil des ans, le site archéologique fut quelque peu délaissé, puis une remise en valeur fut décidée dans le cadre de l'aménagement du pôle touristique environnant. Elle se caractérise principalement par la construction d'un mu-

FIG. 5.2 – Modèles 3D de l'évolution du Château de Vianden réalisés au CRAI

sée aux abords mêmes des vestiges. L'idée centrale de ce musée est de présenter aux visiteurs une approche de la vie quotidienne dans ce palais-villa à la fin du 1er siècle après J.C. : maquettes, ambiances, objets, présentations des différentes pièces d'habi-

tation et occupations qui s'y déroulaient. La mission du CRAI dans ce cadre a été la réalisation de tous les documents numériques devant être présentés au public, que ce soit dans le musée ou sur des panneaux "in situ", permettant aux visiteurs de faire un rapport immédiat entre ce qui subsiste et les hypothèses de reconstitution. Ainsi, pour ce site également, nous disposions des documents réalisés lors des fouilles et rassemblés dans le livre cité ci-dessus, mais également des reconstitutions virtuelles (Figure 5.3) et des modèles 3D. Nous nous sommes donc servi de ces données pour tester nos développements et valider le fait que notre Système d'Information est utilisable pour la documentation de tout type de sites patrimoniaux. Nous donnons une description de la villa d'Echternach et des travaux réalisés par le CRAI dans l'Annexe B.

Ainsi, sur la base de données issues de ces deux sites patrimoniaux, nous avons pu dans un premier temps procéder au développement des fonctionnalités que notre Système d'Information devait intégrer pour pouvoir documenter le site d'une manière innovante, et dans un deuxième temps nous avons pu tester la capacité du Système d'Information à être utilisé pour la documentation de n'importe quel site, sachant que chaque entité peut induire des types de données à gérer très différents.
Dans la suite de ce mémoire, nous montrerons le fonctionnement des outils de conservation, de gestion et de représentation des données sur la base de ces deux sites.

Auparavant, nous détaillerons dans le prochain chapitre le projet sur la base duquel nous avons travaillé. En effet, nous avons pu bénéficier de certains outils de gestion de données sur Internet développés par des collègues de la même UMR pour démarrer notre travail sur le Système d'Information. Ceci nous a permis de profiter des recherches de ces collègues et des programmes faits par des informaticiens de cette équipe pour avoir une base informatique solide à partir de laquelle nous avons ensuite développé nos propres applications.

FIG. 5.3 – Images virtuelles de la villa d'Echternach réalisées réalisés au CRAI

Chapitre 6

Fondements informatiques

Dans ce chapitre, nous présentons des travaux qui ont été réalisés par Pierre Drap et son équipe au sein du laboratoire MAP-Gamsau de l'Ecole d'Architecture de Marseille. Ces travaux ont été commencés en l'an 2000 et certains aspects sont poursuivis encore aujourd'hui. Nous avons pu bénéficier de certaines applications développées dans le cadre de ces travaux à l'issue d'une rencontre organisée en été 2005[1]. Les éléments qui suivent sont tirés des nombreux articles écrits par P.Drap et son équipe durant ces dernières années [Drap, 2001, Drap et al., 2002, Drap et al., 2003, Drap et al., 2005a, Drap et al., 2005b, Drap et al., 2005c, Seinturier et al., 2005a].

6.1 Contexte

Le projet s'articule autour d'une collaboration entre le MAP-Gamsau et le DRASSM[2] pour l'étude et le relevé d'une épave Etrusque profonde, sous la responsabilité scientifique de Luc Long. Ce travail suit un objectif de synthèse, d'analyse et de diffusion des connaissances au travers de la production d'une interface Web centralisant l'état du savoir sur la fouille à un moment donné. L'originalité du système proposé réside principalement dans l'articulation dynamique au sein d'un site Web, de trois composantes primordiales de cette fouille : un Système de Gestion de Base de Données (SGBD), un module de visualisation tridimensionnelle et un outil de photogrammétrie numérique. Le lien entre ces trois outils est réalisé, d'un point de vue conceptuel, par la formalisation et la modélisation à l'aide d'outils informatiques fondés sur l'approche objet d'un

[1] P. Drap avait déjà travaillé auparavant avec notre directeur de thèse P. Grussenmeyer pour le développement d'un outil photogrammétrique sur le Web nommé ARPENTEUR que nous citerons plus loin.

[2] Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines

corpus de données manipulées par l'archéologue. Cette approche informatique est fédératrice des échanges entre les diverses formes d'expression des objets étudiés et assure la cohérence entre ces expressions diverses (représentation tridimensionnelle, textuelle, gestion au sein du SGBD et assistance à l'utilisateur lors de la phase de mesurage photogrammétrique).

6.2 Développements initiaux

Le principe du projet mené sur l'épave étrusque est basé sur la couverture photographique numérique du navire pour mémoriser son état actuel, et permettre l'élaboration d'un plan du site et sa reconstruction en trois dimensions en utilisant conjointement les données observées et les sources et hypothèses archéologiques. Un outil de photogrammétrie numérique sur le Web a été développé pour permettre le relevé de l'épave à partir des photographies dans le cadre d'un projet nommé ARPENTEUR (pour *ARchitectural PhotogrammEtry Network Tool for EdUcation and Research*). Réalisé conjointement avec le MAP-PAGE (dont nous faisons partie), ce projet a aboutit à la réalisation d'un ensemble d'outils logiciels permettant de faire des relevés photogrammétriques en réseau ou sur le Web [Drap et Grussenmeyer, 2000, Grussenmeyer et Drap, 2001, Drap et al., 2004]. Cet outil a été totalement intégré dans la chaîne de traitement, depuis les photographies numériques jusqu'aux résultats finaux comme la visualisation 3D dans des logiciels de CAO. Les travaux réalisés sur l'épave à partir des photographies aboutissent donc dans un premier temps à des documents de relevés, des fichiers dédiés à la visualisation ou des corpus destinés à la base de données. On obtient alors un Modèle Numérique de Terrain des alentours du navire, la situation des amphores numérotées et remontées à la surface, et la position du sous-marin lors des prises de vue.

Puis, le système de gestion documentaire proposé repose sur l'hypothèse de l'existence d'un modèle théorique des objets architecturaux étudiés. Depuis les amphores jusqu'au navire, il est possible de proposer un modèle théorique pour ces objets. Ce modèle a pour vocation de décrire, d'une part une typologie d'objet, d'autre part un ensemble de relations décrivant le comportement et l'agencement de ces objets entre eux. Une classification des amphores a donc été élaborée puis utilisée dans le système. Ceci a été fait en étroite collaboration avec les archéologues, ce qui a permis d'organiser ces connaissances relatives aux amphores et de les formaliser dans la base de connaissances liée à l'ARPENTEUR. Les relations complexes qui peuvent exister entre les amphores au moment de leur découverte dans le navire ont également été formalisées et enregistrées. Elles font partie intégrante du modèle. Cela confère un comportement dynamique aux objets modélisés, qui donne la possibilité de générer des représentations graphiques dans divers formats à l'aide d'interfaces communes.

La base de données contient alors l'objet principal de ce modèle : l'amphore. Les don-

nées enregistrées à propos de chacune des amphores sont : des données d'identification (nom, numéro, identificateur de fouille, numéro d'inventaire, description, localisation), des mensurations (hauteur, masse, volume, différents diamètres, nombre de fragments, mesures sur la lèvre) et des données photogrammétriques (origine, points mesurés, phi, omega, kappa[3]). Elle contient également les relations existant entre ces amphores ou entre elles et le navire. Cela permet la création automatique d'un modèle 3D représentant ces données : MNT, structure du bateau, position des amphores. Puis, il est possible de formaliser des hypothèses archéologiques sur l'organisation initiale des amphores dans le navire, qui peuvent alors également être visualisées sur le modèle 3D. Ensuite, le modèle 3D étant généré à partir des données de la base de données, il est possible de l'utiliser pour interroger la base de données sur les objets représentés et sur les types de relations qui existent entre eux.

La Figure 6.1 montre le schéma synoptique du système que nous venons de décrire et les langages utilisés (nous expliquerons le format VRML dans le Chapitre 8). Nous pouvons déjà constater que le SGBD utilisé est MySQL et que le langage de script est PHP, formats que nous avons choisi également.

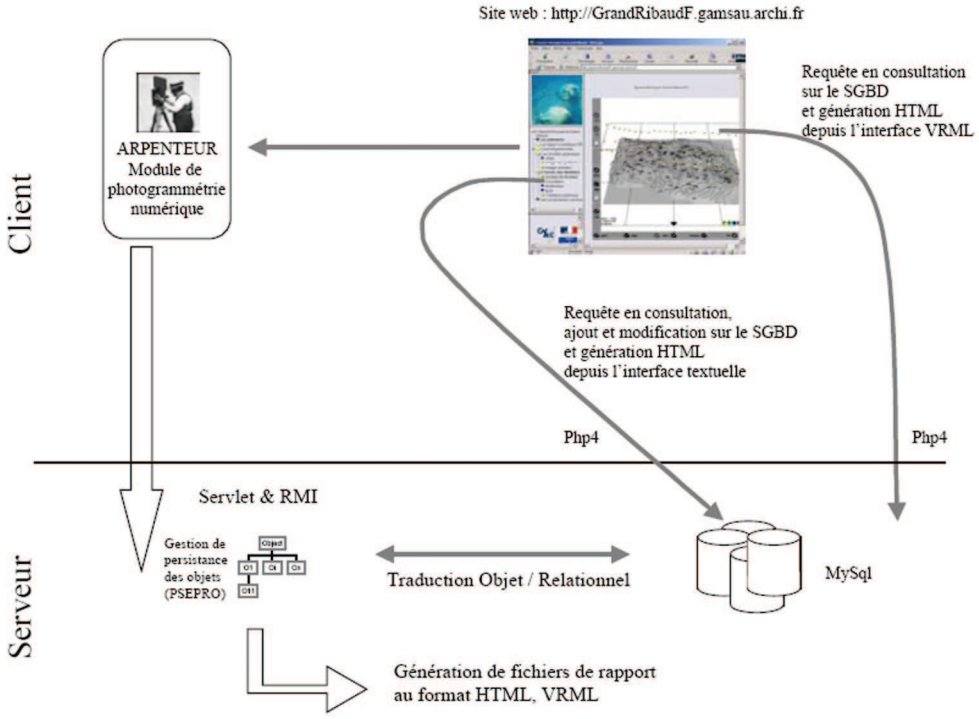


FIG. 6.1 – Schéma synoptique du système de gestion de documentation de la fouille de l'épave du Grand Ribaud [Drap, 2001]

[3]angles de prises de vues

6.3 Evolution vers des formats standards

En 2004-2005, à la faveur de deux autres projets plus ou moins proches de celui que nous venons de décrire, l'architecture du système a évolué.

Le premier projet a été mené lors de la découverte des vestiges d'une ancienne cité grecque sur la plage nommée "Anse des Catalans" à Marseille. Cette découverte a pu être faite probablement à cause du dragage de l'ancien port de Marseille qui a permis le dégagement de sculptures, pièces architecturales, amphores, vaisselle. Ces pièces reposaient dans le fond marin depuis des siècles, non loin de cette plage, mais n'ont été découverts qu'en 2004. Etant donné l'étendue géographique de cette découverte, il n'a pas été possible de procéder à un relevé photogrammétrique simple. Il a donc fallu fusionner différentes sources de données tridimensionnelles à différentes échelles pour modéliser tout le terrain et les objets. En plus de la photogrammétrie, un sonar a donc été utilisé pour les données bathymétriques et un autre sonar avec pénétration de signal pour pouvoir mesurer des éléments sous la surface du fond marin. Un GPS a été utilisé pour référencer tous ces relevés dans le même système. Ceci a permis de réaliser une carte du fond marin, permettant également la localisation des plus importants blocs architecturaux encore sous l'eau. Une petite zone a parallèlement été choisie pour procéder à une fouille archéologique sous-marine standard par photogrammétrie (comme celle ayant été réalisée pour l'épave étrusque).
Les buts du projet étaient l'analyse et la documentation des artéfacts. Deux types de données devaient être combinés dans le système : les objets sortis de la mer durant la fouille, et les modèles 3D issus des relevés photogrammétrique, bathymétrique et par sonar pénétrant. Les modèles 3D des artéfacts ont été produits par photogrammétrie, texturés avec les orthophotos qui ont été réalisées et exportés en VRML (Figure 6.2).

FIG. 6.2 – Représentation VRML du relevé photogrammétrique d'une zone particulière du site des Catalans [Drap et al., 2005a]

La base de données des objets relevés devait pouvoir être remplie par les archéologues, à qui on a demandé de se servir de leurs connaissances pour réaliser un schéma de base de données pour chaque famille d'objets archéologiques trouvés. C'est pourquoi il a fallu à ce stade passer les données dans un formalisme standard appelé XML[4] (*eXtensible Markup Langage*), car il permet une grande flexibilité dans la description des

[4]Nous expliquerons le langage XML dans le prochain chapitre.

objets. Une telle souplesse était nécessaire, car les objets remontés par dragage étaient souvent très endommagés. Il fallait donc se servir d'un langage permettant de décrire précisément et sans contraintes ces dommages. Le système a alors été nommé ISA-PX (pour *Information System for Archaeology using Photogrammetry and XML*). Il intègre toutes les opérations standard sur la base de données qui existaient déjà dans le système initial, et il permet la consultation des données par l'intermédiaire d'interfaces textuelles ou de leurs modèles 3D.
Ce projet a donc permis la réalisation d'un système de navigation Web permettant de visualiser les modèles VRML des données bathymétriques et photogrammétriques, et d'accéder par l'intermédiaire de ces modèles 3D à une base de données en XML contenant toutes les informations sur les artéfacts. La Figure 6.3 montre le schéma synoptique des relevés réalisés et du système ISA-PX permettant de les gérer.

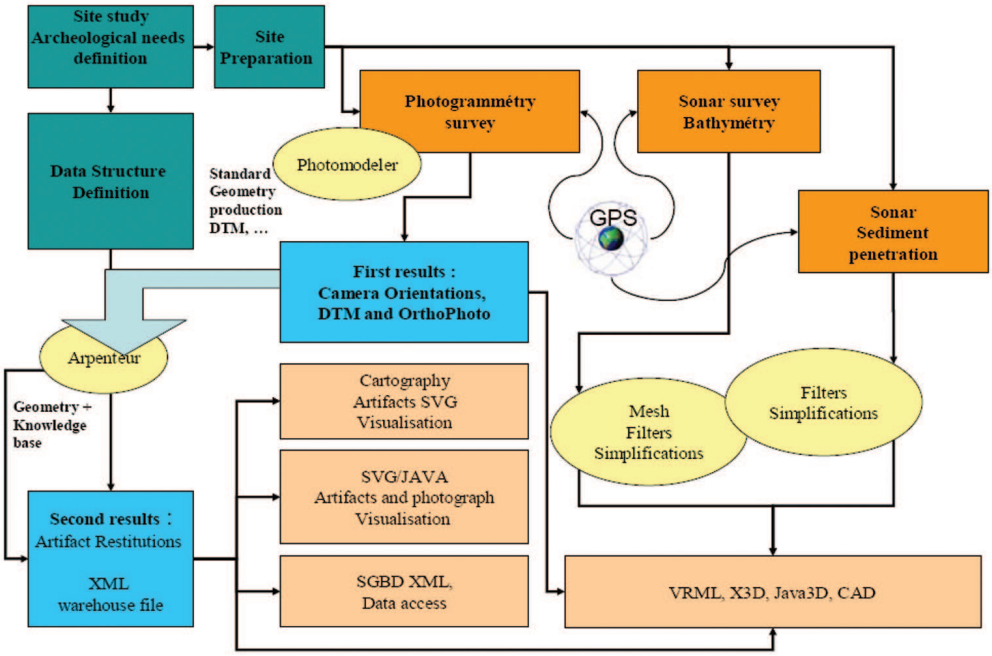


FIG. 6.3 – Schéma synoptique des relevés sur le site des Catalans et du système ISA-PX [Drap et al., 2005a]

Le deuxième projet qui a permis de faire évoluer le système initial est mené sur le Château de Shawbak en Jordanie, appelé communément "Crac de Montréal", en collaboration avec l'Université de Florence[5]. Ce projet va nous permettre d'expliquer certains aspects du schéma de la Figure 6.3 que nous n'avons pas encore abordés (Photomodeler®, SVG, X3D).

[5]Ce projet est encore en cours aujourd'hui, les données sont accessibles sur `http://piccard.gamsau.archi.fr/Shawbak/` [réf. du 31 mai 2007].

Sur ce château comme pour les fouilles sous-marines, la première étape est le relevé photogrammétrique. Le logiciel Photomodeler®[6] permet de réaliser l'orientation de plusieurs centaines de photographies du château qui ont été prises sur le site. Puis, l'ARPENTEUR permet de faire un relevé photogrammétrique lié aux connaissances archéologiques (sur la base d'un modèle théorique comme nous l'avons indiqué précédemment). Dans le cadre de ce projet, l'ARPENTEUR a également évolué : un jeu d'outils a été spécialement développé pour simplifier la phase de saisie des objets à relever par les archéologues. Plus précisément, un outil de mesure mono-image a été mis au point pour faciliter la saisie, pour la rendre moins longue, et pour "cacher" à l'archéologue pendant le tracé de nombreux détails photogrammétriques qui ne présentent pas d'intérêt pour lui. Dans ce cas, les objets à relever sont les pierres des murs, et grâce à l'outil de mesure mono-image, l'archéologue a juste besoin de tracer le contour de ces pierres pour réaliser le relevé 3D (l'outil réalise automatiquement l'extrusion de la pierre). Pendant la saisie, l'archéologue peut également insérer des informations archéologiques textuelles concernant la pierre qu'il est en train de relever. Les différentes morphologies des blocs de pierres relevés en 3D peuvent être exprimées avec divers formalismes pour satisfaire les besoins des archéologues. Des fichiers CAO binaires sont alors produits, ainsi que des fichiers VRML et X3D (*eXtensible 3D* est la formalisation XML de VRML, nous y reviendrons dans le Chapitre 8).
Après les mesures dans l'ARPENTEUR et éventuellement l'ajout de données textuelles par l'archéologue, toutes ces informations sont automatiquement formalisées en XML : la géométrie, les données qualitatives, les références aux photographies ayant permis de faire les mesures et les informations archéologiques. Le choix de XML fait pour la plage des Catalans a été confirmé dans ce projet, car les équipes travaillant sur le projet sont distantes, et la sauvegarde simple de toutes les données dans un fichier textuel au format XML facilite beaucoup les échanges. Les données sont ensuite chargées dans le système ISA-PX par l'intermédiaire d'un fichier XML unique qui les contient toutes. Ce fichier est alors passé dans un analyseur qui produit pour chaque pierre relevée un fichier XML individuel. Celui-ci fait alors partie de la base de données XML du château. Le corpus de toutes les valeurs des attributs des données (descriptions, dimensions...) est alors mis à disposition de l'utilisateur pour que la mise à jour des données soit plus aisée par exemple. Dans le même temps, une base de données MySQL est automatiquement créée et remplie avec les données contenues dans tous les fichiers XML individuels de chaque pierre. Ceci permet de réaliser très simplement des requêtes relationnelles puissantes en SQL. Il est prévu de passer à des requêtes en XML, mais cela n'a pas encore été fait.
Puis, les géométries de chaque pierre permettent de produire automatiquement les fichiers en format VRML et/ou X3D de l'ensemble du château (les pierres sont recréées en 3D grâce aux données contenues dans les fichiers XML). Le modèle 3D étant alors fait à partir des données de la base de données, il est automatiquement possible d'accéder à ces informations par l'intermédiaire du modèle. Ainsi, un clic sur une pierre dans le modèle 3D induit la visualisation du fichier XML lui correspondant (gauche de la Figure 6.4).

[6] Ce logiciel a été choisi car il est facile d'utilisation pour les archéologues.

Enfin, une approche cartographique a également été ajoutée pour les murs ou groupes de murs pouvant être visualisés dans un même plan de projection. Ceci permet de proposer à l'archéologue une approche plus proche des travaux traditionnels faits habituellement sur les orthophotos, car des représentations en 2D sont parfois mieux appréhendées que des modèles en 3D par les archéologues. Ainsi, de la même façon que le système ISA-PX permet la création automatique de modèles 3D à partir des données géométriques entrées dans la base de données, ISA-PX produit également automatiquement des graphiques 2D formalisés en SVG (*Scalable Vector Graphics*, pendant bidimensionnel du format XML, nous l'expliquerons dans le Chapitre 8). Il est alors possible, de la même manière que pour la 3D, de cliquer dans le graphique 2D pour accéder aux informations concernant l'entité choisie (droite de la Figure 6.4).

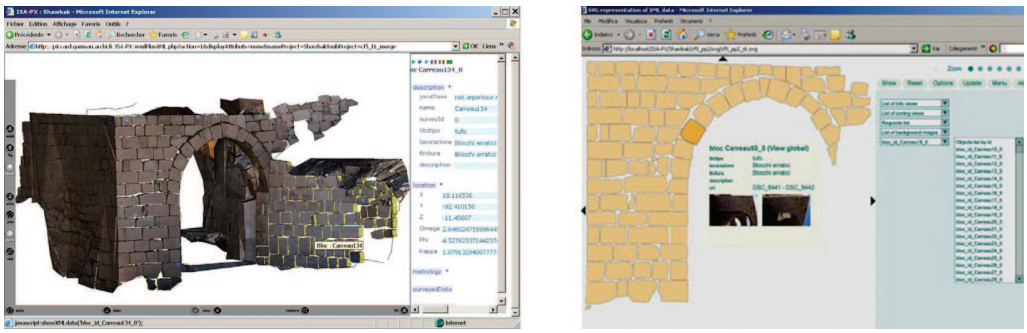


FIG. 6.4 – Interfaces 3D et 2D de ISA-PX : le modèle VRML (à gauche) et le graphique SVG (à droite) permettent l'accès aux données archéologiques [Drap et al., 2005c]

6.4 Conclusion

Le système ISA-PX permet la gestion de données entièrement formalisées avec les standards du *World Wide Web Consortium* (W3C), car cela favorise des interactions plus grandes entre les données textuelles et géométriques, mais aussi les échanges entre les acteurs du projet. Le modèle 3D ou le graphique 2D utilisés comme interfaces d'accès aux données descriptives en XML permettent de lier les informations documentaires (références, observations faites pendant la fouille, photographies) aux représentations graphiques des objets (position, orientation, dimensions). ISA-PX peut aussi servir de base de connaissances archéologiques pour la reconstruction de fragments manquants par exemple (comme pour les amphores dans le projet initial). Ceci est possible grâce à l'utilisation de modèles théoriques dans l'ARPENTEUR, de valeurs par défaut ou par l'intermédiaire des relations existant entre les objets. Ainsi, le modèle 3D produit automatiquement par le système montre un modèle géométrique de l'objet défini par l'archéologue puis mesuré par photogrammétrie. Il devient ensuite une interface pertinente entre l'archéologue et les données qu'il a collectées.

Ce que nous avons décrit ci-dessus était l'état de développement du système de P. Drap à la fin de l'année 2005. Parallèlement à nos développements, les travaux sur ce système ont continué et pris d'autres directions. P. Drap[7] travaille aujourd'hui sur un projet européen de trois ans (2006-2009) nommé VENUS[8], qui a pour objectif de fournir aux scientifiques des méthodes et des outils pratiques pour l'exploration virtuelle de sites archéologiques sous-marins situés en grande profondeur.

Concernant notre proposition de Système d'Information pour la documentation, la différence principale qu'il faut mettre en évidence par rapport aux projets pour lesquels a été développé le système ISA-PX est que nous nous situons en aval du relevé. Nous ne proposons pas d'outils de relevé dans notre SI, nous proposons un outil de conservation et d'exploitation de données déjà existantes. Ceci est une différence importante, notamment parce que nous n'avons pas de modèles 3D générés automatiquement par le système à partir d'objets relevés auparavant. Ce que nous avons à gérer, ce sont des modèles ou des graphiques déjà réalisés dans des contextes très différents (comme nous l'avons vu au Chapitre 5 avec les exemples de documentation virtuelle faits par le CRAI). De plus, dans ISA-PX il n'y a qu'un type d'objet (amphore, bloc architectural ou pierre) à relever et à représenter, alors que nous considérons toute la documentation du site archéologique (rapports, plans, coupes, photos, objets, modèles, images virtuelles...).

Par contre, compte tenu de l'environnement informatique dans lequel nous avions décidé de travailler et de ce que nous voulions pouvoir faire avec notre Système d'Information, lorsque nous avons pu tester le fonctionnement du système ISA-PX nous avons immédiatement vu l'intérêt de certaines fonctionnalités pour notre travail. Particulièrement, la fonction développée dans ISA-PX permettant le remplissage automatique d'une base de données MySQL à partir de fichiers XML nous a semblé très intéressante. En effet, nous avons décidé de travailler dans la suite logicielle WAMP dont le SGBD est MySQL, car les possibilités de requêtes relationnelles en SQL sont importantes pour nous. Mais parallèlement, notre étude bibliographique a mis en évidence le besoin des archéologues de disposer de leurs données dans des fichiers standards du type XML, à la fois pour la préservation à long terme et pour l'échange. Par conséquent, la fonction de ISA-PX permettant la sauvegarde des données à la fois dans des fichiers XML et dans une base de données MySQL présentait de grands avantages pour notre SI.
A l'issue de notre rencontre avec P. Drap, nous avons donc pu disposer des programmes faits dans le cadre du système ISA-PX. Nous avons réutilisé et adapté ceux qui convenaient à nos besoins spécifiques. Ces adaptations seront détaillées au fur et à mesure de la présentation des applications de notre SI.

Maintenant que nous avons détaillé l'environnement, l'échelle et les bases de notre travail, nous pouvons désormais faire nos propositions pour un Système d'Information dédié à la documentation de sites patrimoniaux.

[7] `http://piccard.gamsau.archi.fr/~pdr/` [réf. du 31 mai 2007]
[8] `http://www.venus-project.eu` [réf. du 31 mai 2007]

Troisième partie

Proposition d'un modèle de Système d'Information dédié à la documentation de sites patrimoniaux

Chapitre 7

Principes de conservation des données

7.1 Types de données

Pour déterminer les types de données que notre Système d'Information doit permettre de conserver, il fallait que nous fassions un inventaire de toutes les données produites lors des travaux sur un site patrimonial. Grâce à nos contacts avec le Service des Sites et Monuments Nationaux (SSMN) du Luxembourg, nous avons pu nous rendre au bureau du SSMN à Luxembourg pour réaliser un tel inventaire. Comme nous l'avons indiqué, nous avons choisi le site du Château de Vianden comme terrain de développement pour notre SI. Nous avons donc consulté tous les documents existants sur le château au SSMN. Ces documents sont tous sous forme papier, à part un modèle 3D effectué par laser scanner d'une petite partie de la cour du château. Ce modèle 3D a été réalisé comme expérimentation par la société allemande ArcTron[1] spécialisée dans le relevé laser de monuments. En effet, cette société a été choisie par le SSMN du Luxembourg pour réaliser le relevé intégral par scanner laser du Château de Vianden. Lorsque nous avons débuté notre thèse, ce relevé n'avait pas encore été effectué et nous avons uniquement pu disposer des premières expérimentations qu'elle avait faites avant d'entreprendre le relevé total (intérieur et extérieur) du château. Pour compléter la collection de modèles historiques réalisés par le CRAI, nous aurions souhaité disposer du modèle 3D intégral du château tel qu'il est aujourd'hui après reconstruction. Malheureusement, ArcTron a terminé le relevé à la fin de l'année 2006, ce qui nous a empêché pour l'instant de l'intégrer dans notre SI. Malgré tout, nous avons donc pu disposer, en plus des documents papier et des modèles 3D du CRAI, des expérimentations de relevé laser effectuées par ArcTron. Ainsi, nous avons également pu intégrer ces modélisations

[1] `http://www.arctron.de/` [réf. du 02 juin 2007]

expérimentales dans le SI.
Ainsi, nous avons consulté les classeurs de documents et les armoires à plans du SSMN. Ceci nous a permis de déterminer les types de données documentaires suivants :

- *axonométrie* ;
- *carte* ;
- *coupe* ;
- *dessin* ;
- *élévation* ;
- *photographie* ;
- *plan* ;
- *plan de fouille* ;
- *profil de fouille* ;
- *texte* (livre, rapport de fouille...).

Ces données sont alors à compléter avec les documents numériques qui ont été produits par le CRAI et par ArcTron. Ces documents sont des *modèles 3D*, réalisés à partir des documents ci-dessus dans le cas du CRAI, ou à partir d'un relevé par scanner laser pour ArcTron.
Cette liste n'est bien-sûr pas exhaustive par rapport à tous les documents qu'il est possible de produire. Par conséquent, notre système est souple et laisse à l'archéologue la possibilité d'ajouter tout type de document dont il dispose et qui ne serait pas dans cette liste. Nous verrons la procédure de création d'un nouveau type de donnée dans le paragraphe 7.3. Cette possibilité a d'ailleurs été testée lors de l'intégration dans le SI des données sur la villa d'Echternach. En effet, la consultation des données disponibles sur cette villa a amené l'ajout de trois nouveaux types de données :

- *image virtuelle* ;
- *dessin AutoCAD*® (graphique vectoriel) ;
- *panorama*.

Une fois ces documents identifiés, nous avons étudié toutes les informations qu'il s'agit de conserver à leur propos, c'est-à-dire les métadonnées. Comme nous l'avons expliqué dans l'Etat de l'Art, il est nécessaire de conserver des métadonnées sur les données enregistrées, car la connaissance du contexte de la donnée est essentielle en archéologie pour préserver la mémoire complète à la fois du site et des travaux faits sur le site. Dans le cas des données documentaires que nous avons, enregistrer des métadonnées permet de conserver la mémoire des travaux, mais également la localisation de tous ces documents pour pouvoir accéder facilement à l'original. Ainsi, nous avons déterminé un certain nombre de métadonnées à conserver pour chaque type de donnée. Il serait long de toutes les citer ici, l'Annexe C contient la liste de toutes les données et métadonnées associées qui sont aujourd'hui gérées par notre SI. Nous pouvons cependant citer les principales, communes à la plupart de ces documents :

- un identifiant ;
- une provenance (classeur, armoire, bureau, bibliothèque...) ;
- un auteur ;
- une date ;
- un sujet ;

- un intérêt patrimonial ou scientifique ;
- un type (sur le site en général, une partie, un détail) ;
- une taille ;
- des géoréférences.

Pour les documents numériques, il est nécessaire de conserver d'autres types de métadonnées, par exemple en accord avec les recommandations de l'ADS que nous avons cité dans la section 2.1.2. Pour ces métadonnées, nous laissons là aussi le choix à l'archéologue d'enregistrer ce qu'il souhaite en lui permettant de modifier à tout moment la structure des métadonnées de chaque type de donnée (cf. 7.3).

Les types de données que nous avons répertoriés jusqu'à présent constituent les informations secondaires sur le site archéologique. Celles-ci viennent compléter les informations primaires qui sont les artéfacts eux-mêmes. En effet, comme nous l'avons mentionné en 1.1.3, à la fois les données primaires et les documents secondaires sont nécessaires pour conserver l'histoire complète du site archéologique. Il faut donc que notre Système d'Information permette également la gestion des objets archéologiques. D'après ce que nous avons constaté en visitant le château de Vianden, ces objets peuvent être de différents types. Ces types sont à considérer suivant que les objets ont été trouvés sur le site, qu'ils ont été ramenés d'autres sites ou musées pour être exposés dans le château (parce qu'il présentent un intérêt pour expliquer la vie quotidienne sur le site par exemple), ou qu'ils ont été fabriqués par les conservateurs pour rendre compte de l'histoire du site. Dans le cas du château de Vianden, nous pouvons citer :

- des *armures* ;
- des *armes* ;
- des *bijoux* ;
- des *céramiques* ;
- des *poteries* ;
- des *fragments* d'ouvrages architecturaux (linteaux...) ;
- des *maquettes*.

Une fois encore, il ne faut pas considérer la liste ci-dessus comme exhaustive. Nous ne donnons que des exemples de ce qu'il est possible de trouver, le choix étant laissé à chacun de conserver ce qu'il souhaite.
Comme pour les documents, il faut également conserver des métadonnées sur ces objets. Celles-ci sont encore plus importantes que celles sur les documents, car dans ce cas le contexte de la donnée a souvent été détruit pendant la fouille. A titre d'exemple, nous pouvons citer les métadonnées suivantes :

- identité ;
- provenance ;
- découvreur ou auteur ;
- date de découverte ;
- circonstance de découverte ;
- âge ;
- état actuel ;
- intérêt patrimonial ou scientifique ;

- géoréférences.

Nous renvoyons à l'Annexe C pour consulter la liste exacte des métadonnées que nous avons choisi d'enregistrer à propos des objets archéologiques.

Pour finir, en plus de ces données matérielles, il faut considérer les composantes spatiale et temporelle de l'archéologie. En effet, nous l'avons souligné à plusieurs reprises dans les premiers chapitres, les travaux dans le domaine archéologique induisent un positionnement et une datation de tout ce qui est fouillé et de tout ce qui est fait en rapport avec l'étude du site. Ainsi, il y a deux autres types de données que notre SI doit permettre de conserver et de gérer :

- les *lieux* ;
- les *périodes*.

Comme nous le verrons au Chapitre 8, ces données vont permettre de lier toutes les autres, suivant qu'elles ont en commun des lieux et/ou des périodes. Sur chacune de ces données, il est également nécessaire d'enregistrer des informations permettant de les décrire.

Prenant pour référence les lieux du château de Vianden, nous avons choisi d'enregistrer les attributs suivants pour les lieux :

- nom ;
- niveau (sous-sol, rez-de-chaussée, 1er étage...)
- subsistance (existant, existant partiellement, existant mais caché, existant partiellement et caché, restes, disparu) ;
- utilisation passée, traces d'un lieu disparu ;
- type (général, partie, détail, pays, village) ;
- géoréférences.

Pour les périodes, nous avons choisi le minimum, sachant que tout est modifiable par après si nécessaire (affinages...) :

- nom ;
- dates ;
- description ;
- numéro (pour un classement chronologique).

Notre Système d'Information permet donc de gérer quatre grandes catégories de données :

- des documents ;
- des objets archéologiques ;
- des lieux ;
- des périodes ;

Il faut désormais étudier la manière dont nous avons formalisé ces données pour pouvoir les saisir, les visualiser et les réviser efficacement.

7.2 Formalisation en XML

7.2.1 Qu'est-ce que XML ?

Le langage XML (*Extensible Markup Language* ou "langage de balisage extensible") est un langage de balisage introduit en 1998, destiné à la fondation d'un nouvelle génération d'Internet : le Web sémantique. Le Web sémantique désigne un ensemble de technologies visant à rendre le contenu des ressources du World Wide Web accessible et utilisable par les programmes et agents logiciels, grâce à un système de métadonnées formelles, utilisant notamment la famille de langages développés par le W3C[2] (*World Wide Web Consortium*). Cet organisme promeut la compatibilité des technologies du World Wide Web en éditant des recommandations à valeur de standards industriels et recommande XML pour exprimer des langages de balisages spécifiques. Les langages de balisage sont des langages spécialisés dans l'enrichissement d'informations textuelles. Ils opèrent grâce aux balises qui sont des unités sémantiques délimitant chacune un ensemble à l'intérieur d'un fichier texte, souvent en Unicode[3].
La syntaxe de XML est facile à lire et à écrire. Un exemple de document XML est donné à la Figure 7.1.

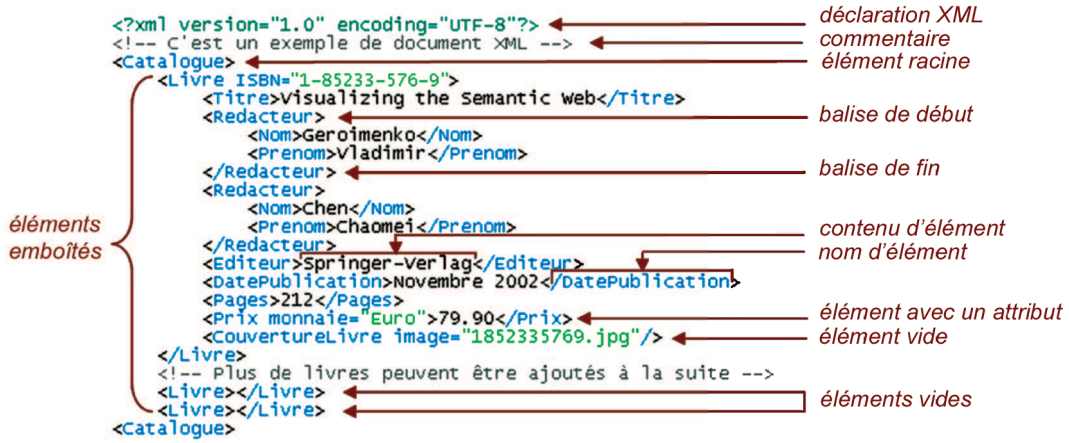


FIG. 7.1 – Anatomie d'un document XML (traduit de [Geroimenko et Chen, 2005])

Comme XML est un format textuel simple, un document XML peut être créé avec n'importe quel éditeur de texte (même le Bloc-notes ou WordPad) puis enregistré en tant que fichier avec l'extension ".xml". Dans le document donné sur la Figure 7.1,

[2] `http://www.w3.org/` [réf. du 03 juin 2007], page spécifique sur XML : `http://www.w3.org/XML/` [réf. du 03 juin 2007]

[3] Unicode est une norme informatique, développée par le *Consortium Unicode*, qui vise à donner à tout caractère de n'importe quel système d'écriture de langue un nom et un identifiant numérique, et ce de manière unifiée, quelle que soit la plate-forme informatique ou le logiciel.

la première ligne appelée "déclaration XML" doit toujours être inclue car elle permet de définir la version XML du document. En effet, plusieurs versions de la spécification XML ont été éditées par le W3C, et il est donc nécessaire de renseigner ce paramètre dans le document XML. La version courante aujourd'hui est la version 1.1. Dans le cas du document présenté, on constate qu'il est conforme à la version 1.0. Le reste du fichier est facilement compréhensible même si l'on a jamais vu de document XML auparavant : le fichier décrit un livre faisant partie d'un catalogue. XML utilise des balises (mots ou phrases entre chevrons `< >`) pour donner une signification particulière à la donnée qui est comprise entre les chevrons. Les balises apparaissent généralement par paires "balise de début - balise de fin". La balise de début et la balise de fin doivent se correspondre exactement (car XML est sensible à la casse), excepté le "slash" qui doit être inclus dans la balise de fin après le chevron ouvrant. La combinaison "balise de début - contenu - balise de fin" est appelée "élément", c'est la composante principale d'un document XML. Certains éléments incluent des "attributs" pour pouvoir ajouter des informations sur le contenu de l'élément. Les attributs sont inclus dans la balise de début sous la forme `nom attribut="valeur attribut"` (comme ISBN qui est un attribut de Livre dans l'exemple de la Figure 7.1). Certains éléments peuvent ne pas avoir de contenu et enregistrer des données seulement dans leurs attributs (comme l'élément CouvertureLivre dans l'exemple). Ces éléments sont appelés "éléments vides" et fusionnent la balise de début et de fin sous la forme `<Element attribut="..." />`. Les contenus et les valeurs des attributs sont rarement typés, par défaut ce sont des chaînes de caractères.

XML n'est pas un langage mais un métalangage, c'est-à-dire un langage de haut niveau destiné à la création et à la description d'autres langages. En tant que tel, il n'a pas de balises prédéfinies ni de mots réservés : tout élément mis entre chevrons devient une balise. Ainsi, on ne peut donc pas réellement écrire un document en XML car ce n'est pas un langage. Il faut se définir son propre langage (MonXML) basé sur la syntaxe d'XML (balises, éléments, attributs), pour avoir ensuite la possibilité de créer des documents écrits, non pas en XML, mais en MonXML. Le problème qui se pose alors est pour l'échange d'information d'un point de vue informatique, car différentes personnes peuvent désigner la même chose de différentes manières. Par exemple une entreprise peut désigner ses clients en utilisant les balises XML `<nom>` et `<prenom>`, et une autre entreprise peut les désigner par `<NomDeFamille>` et `<Prenom>`. D'un point de vue humain, ces balises de métadonnées ont la même signification, mais pour des ordinateurs elles sont différentes (même les prénoms car XML est sensible à la casse). Pour éviter la multiplication à l'infini de langage de balisage spécifiques à chacun, il existe deux solutions : soit créer des applications spéciales qui servent de traducteurs entre différents langages d'une même discipline, soit développer des langages génériques basés sur XML destinés à servir de standards dans des domaines particuliers (nous en donnons quelques exemples pour l'archéologie dans le prochain paragraphe 7.3.2).

D'après [Geroimenko et Chen, 2005], les principaux avantages et bénéfices d'XML en tant que nouvelle approche pour le Web (par rapport à HTML par exemple) sont :

- XML est un standard ouvert défini par le W3C. C'est un langage *open source* approuvé par la majorité des producteurs de logiciels et par les leaders du marché ;
- XML est un format textuel. Etant donné que pratiquement tous les logiciels et dispositifs sont capables de traiter du texte, XML convient à toutes les plate-formes, langages de programmation et logiciels. XML est basé sur le système d'encodage de caractères Unicode, ce qui permet l'échange d'informations au-delà des frontières nationales et culturelles ;
- XML sépare le contenu d'un document XML de sa présentation. Ainsi, le contenu total ou partiel du document peut être présenté de beaucoup de façons différentes sur divers supports (ordinateur, téléphone portable, assistant numérique (PDA) ou imprimante) ;
- XML contient des informations "qui se décrivent elles-mêmes" et qui sont donc porteuses de sens. Les balises de métadonnées et les attributs permettent aux hommes et aux ordinateurs d'interpréter la signification de la donnée XML ;
- XML est à la fois adapté au Web et orienté sur les données. Cela permet d'intégrer des données de n'importe quelles sources (anciennes, présentes ou futures) comme des bases de données, des documents textuels ou des pages Web.

La différence majeure par rapport aux anciens langages pour Internet est la séparation entre contenu et présentation que nous avons citée. Celle-ci se fait à l'aide d'un analyseur syntaxique (*parseur*), c'est-à-dire un programme capable de vérifier la cohérence de la syntaxe d'un document et de l'interpréter afin de mettre en page son contenu. De plus, pour la représentation des données d'un document XML, le W3C recommande un langage appelé XSL (*eXtensible StyleSheet Language*). Il permet la création de "feuilles de styles"[4] pour transformer et mettre en forme des documents XML. Ce langage est souvent utilisé conjointement avec des feuilles de styles en CSS[5] (*Cascading StyleSheets*, langage destiné au départ au HTML) pour la présentation de documents XML sur le Web. XSL permet aussi de retraiter un document XML afin d'en modifier totalement la structure par l'intermédiaire d'un langage de transformation de données appelé XSLT (*eXtensible Stylesheet Transformation*). Il est alors possible à partir d'un document XML de générer d'autres types de documents (PostScript, HTML, Tex, RTF...) ou bien un fichier XML de structure différente.

XML est donc un métalangage très souple qui permet à chacun de définir son propre langage pour la description de ses données, et de les présenter sur le Web de différentes manières selon le support ou le public visé. Ainsi, en archéologie comme dans beaucoup d'autres domaines, des organismes ou des laboratoires de recherche développent des schémas qui se veulent standards pour la description des données d'une fouille ou de données documentaires du patrimoine. Nous citons quelques exemples de ces schémas dans le prochain paragraphe.

[4] Le principe des feuilles de style consiste à regrouper dans un même document des caractéristiques de mise en forme associées à des groupes d'éléments. Il suffit de définir par un nom un ensemble de définitions et de caractéristiques de mise en forme, et de l'appeler pour l'appliquer à un texte.

[5] page spécifique du W3C sur CSS : `http://www.w3.org/Style/CSS/` [réf. du 04 juin 2007]

7.2.2 Pourquoi XML ?

Les avantages de XML que nous venons de mettre en évidence, m'ont incitée dès le départ à opter pour ce métalangage pour créer un langage de description pour nos données, d'autant que nous les destinons à une publication sur Internet par l'intermédiaire de notre Système d'Information. De plus, je souhaite réaliser un SI utilisable pour la gestion de types de données très différents, provenant de domaines divers (archéologie, relevé, modélisation), ce qui est facilité par la souplesse de XML.
Dans le cadre de la documentation du patrimoine dans lequel nous nous inscrivons, XML permet l'organisation de données aussi différentes que des vieux rapports de fouilles, des relevés tridimensionnels ou des modèles de reconstitution. De plus, le fait que les données soient facilement lisibles par tous peut permettre une meilleure appréhension par des personnnes ayant des environnements culturels différents. L'intérêt d'utiliser ce format dans ce domaine a notamment été souligné en 2002 par F. Niccolucci, éminent professeur à l'Université de Florence, qui fait partie de EPOCH et à ce titre travaille entre autres sur la standardisation des données archéologiques. Dans un article intitulé "*XML and the future of humanities computing*", il conclut en disant ceci :

> « De toute façon, dans quelque temps, ce qui est maintenant un rêve va devenir une réalité et les applications XML deviendront banales. A ce moment là, les données historiques et archéologiques seront stockées dans un format public, assurant à la fois leur conservation à long terme, mise en danger aujourd'hui par les changements continus de formats propriétaires, et leur accessibilité pour tous. Si en plus des logiciels *open source* sont développés pour traiter de telles données, une autre porte sera ouverte à la recherche coopérative et au partage de connaissances, ce qui changera probablement sensiblement la manière dont les historiens et les archéologues concevront désormais leurs travaux de recherche. Ainsi favoriser l'utilisation de la technologie XML aura probablement l'effet secondaire de modifier les études, les recherches et les méthodes dans le domaine de la conservation du patrimoine. » (Traduction libre de [Niccolucci, 2002])

Ainsi, en accord avec ces conclusions, nous avons choisi de proposer un enregistrement des données en XML dans notre Système d'Information. D'autres y travaillent également depuis que ce langage a commencé à faire l'unanimité dans le domaine archéologique ou patrimonial au sens large ([Pomaska et Dementiev, 2005] pour la documentation photogrammétrique de bâtiments ou [Pillot et Florenzano, 2001] pour la publication électronique dans le champ de l'architecture et de l'urbanisme). Des schémas de données sont donc réalisés par de nombreux chercheurs et organismes, qui les développent pour leurs propres besoins au départ et les proposent ensuite à la communauté de sorte à harmoniser les approches. Nous en donnons deux exemples dans la suite, pour illustrer l'adéquation d'XML pour la conservation des données patrimoniales.

Comme premier exemple, nous pouvons citer un schéma nommé *ArchaeoML*[6] proposé par D. Schloen de l'Institut Oriental de l'Université de Chicago [Schloen, 2001]. *ArchaeoML* est composé de vingt types de documents XML, qui constituent "un schéma global" pour des informations archéologiques. Ces types de documents sont abstraits, de sorte à représenter des entités de données fondamentales dans une structure de base de données normalisée (c'est-à-dire une base de données dans laquelle une information donnée n'apparaît qu'une fois et est reliée à d'autres données de façon optimale, en éliminant les redondances inefficaces et qui entraînent des erreurs). Les types de documents *ArchaeoML* sont analogues aux tables relationnelles, pour qu'un fichier de donnée XML suivant ce schéma soit comparable à une ligne d'une table relationnelle. *ArchaeoML* emploie une approche hiérarchique "à base d'items", qui est complètement généralisable et extensible pour faciliter l'intégration de données de différents projets. Les principes de conception principaux étant à la base d'*ArchaeoML* sont que le nombre de types d'éléments doit être maintenu au minimum et qu'un emboîtement récursif d'un même type d'élément en lui-même doit être utilisé partout où c'est possible. Cela permet aux techniques de programmation récursives d'être utilisées dans le logiciel qui manipule les données XML et permet à ce logiciel d'être aussi modulable que possible. Les hiérarchies d'éléments XML définies dans *ArchaeoML* représentent les types d'informations suivants et les relations qui existent entre eux :

- descriptions archéologiques : observations sur des terrains antiques (routes, canaux, domaines), des sites archéologiques (architecture, stratigraphie, botanique et restes animaux) et des artéfacts (incluant leurs propriétés physiques et leurs contextes) ;
- descriptions géographiques : observations de régions géographiques et d'environnements anciens (topographie, climat, hydrologie, végétation) ;
- descriptions linguistiques : lexiques d'anciens langages, descriptions phonologiques, morphologiques et syntaxiques ;
- descriptions de scripts : informations sur les systèmes d'écriture et les signes graphiques utilisés ;
- descriptions textuelles : caractéristiques épigraphiques et linguistiques, incluant des traductions et des analyses grammaticales ;
- résultats de recherches : informations secondaires organisées par auteurs et catégories conceptuelles. L'organisation thématique de cette littérature secondaire fournit une structure dans laquelle les descriptions archéologiques, géographiques, textuelles et linguistiques peuvent être localisées.

Toutes ces informations sont donc comprises dans des documents XML, dont les spécifications sont disponibles sur Internet : `http://ochre.lib.uchicago.edu/index_files/ArchaeoML_Schema.htm` [réf. du 05 juin 2007]. Les modèles de données en XML sont ainsi accessibles pour des archéologues souhaitant enregistrer leurs données en XML en suivant le schéma proposé par D. Schloen.

[6] pour *Archaeological Markup Language*

Un deuxième exemple de schéma, réalisé en France cette fois, est le *Schéma DAPA - Une structure documentaire pour le patrimoine* [Glorieux et Bougoüin, 2004]. Il a été réalisé en 2003-2004 par la société AJLSM[7] pour le compte du Ministère de la culture et de la communication, Direction de l'Architecture et du PAtrimoine (DAPA), Sous-direction des Etudes, de la Documentation et de l'Inventaire. La documentation de ce schéma a été effectuée avec des éléments du standard de métadonnées Dublin Core[8] que nous avons déjà mentionné en 1.1.2. Dans ce schéma, chaque élément, attribut et groupe a un titre, une description et des références de modélisation documentaire qui en éclairent le contenu.
Le schéma permet de créer de véritables dossiers électroniques, où l'on retrouvera toutes les informations numériques - textes, images, animations, vidéo, son - à propos d'une entité, que celle-ci soit une œuvre du patrimoine, une personne ou un lieu. Cette notion de dossier électronique fait appel à la possibilité de relier entre eux de nombreux documents, de définir le rôle de ces relations mais également des documents à l'intérieur des dossiers et d'intégrer de manière cohérente et structurée des éléments multimédia tels que des images. Pour arriver à représenter de tels dossiers électroniques et leurs constituantes, le schéma DAPA propose une approche cohérente : l'utilisation d'un même jeu de métadonnées pour décrire l'ensemble des constituantes d'un dossier électronique. Ces métadonnées peuvent ainsi décrire non seulement les documents, mais leurs parties et ce jusqu'à un niveau très fin (on peut ainsi préciser l'auteur ou les droits associés à une section). Elles peuvent aussi décrire des objets externes comme des images, mais aussi des relations pour préciser leur rôle ou leur fonction. Par cette généralisation de l'utilisation d'un même format de métadonnées, il est possible de non seulement constituer des corpus de documents structurés en format XML, mais de leur donner une cohérence d'ensemble qui permet de produire de véritables dossiers électroniques.
Le schéma s'applique à tous les domaines de compétences de la DAPA : l'archéologie, les espaces protégés, les inventaires, les monuments historiques, l'architecture contemporaine et l'ethnologie. En archéologie particulièrement, des schémas de documents XML sont disponibles pour la description des objets archéologiques, des opérations archéologiques et des protections. La Figure 7.2 illustre la structure du schéma DAPA pour renseigner dans la base documentaire les conditions de découverte d'un objet archéologique.
Ce schéma a été réalisé dans un cadre précis, mais le fait qu'il soit bien documenté et accessible intégralement en ligne peut permettre (comme le premier exemple) à d'autres organismes ou à des particuliers de se conformer à ce schéma pour enregistrer leurs données documentaires patrimoniales.

[7] AJLSM est une entreprise de conseil et de développement en informatique documentaire. Elle est spécialisée dans l'utilisation de la norme XML pour offrir des solutions efficaces et pérennes pour l'information numérique de ses clients. AJLSM ne développe aucun produit commercial mais est impliquée de manière soutenue dans un certain nombre de projets de logiciels libres.

[8] *Dublin Core Metadata Element Set* (DC), jeu simple et réduit d'éléments de métadonnées qui peuvent être utilisés par n'importe quelle communauté pour décrire et chercher parmi une grande variété de ressources informatives sur le Web.

4. Conditions de découverte <^>

Champs de Patriarche	Eléments SDAPA	Commentaires
inventeur / informateur	<contributor role="inventeur"> <person> <family value="{nom de l'informateur}">{nom de l'informateur}</family> <given value="{prénom de l'informateur}">{prénom de l'informateur}</given> </person> </contributor>	Personne auteur de la première mention du site.
Année de la découverte	<date remap="fr/mcc/patriarche:EntiteArcheologique.AnneeDecouverte" role="decouverte"> <year>{année de la découverte}</year> </date>	Année de la découverte du site ou de sa première mention
Circonstance de la découverte	<description remap="fr/mcc/patriarche:EntiteArcheologique.CirconstanceDecouverte" role="circonstance-decouverte"> <para>{circonstance de la découverte}</para> </description>	Valeur unique dans une liste

FIG. 7.2 – Formalisation XML des conditions de découverte d'un objet archéologique dans le schéma DAPA [`http://projets.ajlsm.com/sdapa/schema/guidelines/guide-metier/ea-tab.html` [réf. du 05 juin 2007]]

Ces exemples d'utilisation d'XML pour la structuration de données patrimoniales permettent d'apprécier l'application de ce métalangage pour la création de schémas destinés à des données proches de celles que nous avons à gérer dans notre Système d'Information. Ainsi, nous avons fait le choix de ce métalangage pour définir des schémas XML pour les types de données que nous avons énoncés en 7.1.

7.2.3 Application

Nous avons fait le choix de ne pas nous conformer à un schéma particulier du type de ceux que nous avons cité ci-dessus pour formaliser nos données en XML. En effet, nous souhaitions avoir la liberté d'enregistrer toutes les métadonnées nécessaires à la description de nos données particulières, sans avoir à nous "fondre dans un moule" prédéfini par d'autres. De plus, même si nous ne nous conformons pas à un schéma prédéfini, le fait de conserver nos données dans la syntaxe XML est porteur d'échanges, de part le côté lisible et standard de cette syntaxe. Malgré tout, nous comptons par la suite faire des tests pour essayer de conformer nos documents XML à la norme ISO CIDOC-CRM (cf. 1.1.2) pour proposer des modèles de données standardisés pour le domaine du management des ressources culturelles. Nous y reviendrons dans la conclusion où nous indiquerons les perspectives de développement de notre Système d'Information.

Ainsi, nous avons défini un schéma pour chaque type de données cité dans le premier paragraphe de ce chapitre. Ces schémas s'appellent des *templates*. Nous avons déterminé quatre grandes catégories de données : des documents, des objets archéologiques, des

lieux et des périodes. Ces données n'ont pas le même statut, car contrairement à *lieu* et *période*, "document" et "objet archéologique" sont des types abstraits. En effet, il n'existe pas dans le SI de donnée de type "document". Il existe des types *plan*, *carte* ou *modèle3D* qui sont des documents. De même pour "objet archéologique", il existe différents types de données appartenant à cette catégorie (*poterie*, *bijou*), mais la catégorie n'est pas un type de donnée en soi.
Nous avons créé autant de schémas XML qu'il y a de types de données. Ces schémas ont tous en commun la structure de base suivante :

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<TypeDonnee
id="..."
nomSI="..."
nomSite="..."
nomDonnee="..."
>
...
éléments avec attributs
...
</TypeDonnee>
```

Ces informations de base permettent de décrire la donnée sans ambiguïtés par un identifiant et un nom, ainsi que le nom du SI qui la gère et du site archéologique auquel elle appartient (en effet il peut y avoir des données de même type pour deux sites distincts). Nous avons nommé notre système SIDoP, pour "**S**ystème d'**I**nformation pour la **Do**cumentation **P**atrimoniale". Ainsi, la valeur de l'attribut `nomSI` sera "SIDoP" dans la suite des exemples. Comme nous avons débuté notre travail avec les données du site de Vianden, nous allons donner des exemples des données de ce site, donc la valeur de `nomSite` sera "vianden" dans la suite.

Pour les données de types *lieu* et *période*, nous proposons les schémas donnés sur la Figure 7.3. Ceux-ci sont la traduction en XML des descriptions attributaires de chacune de ces données que nous avons faites en 7.1. Les éléments `<DescriptionLieu>`, `<LocalisationLieu>` et `<DescriptionPeriode>` sont des éléments vides qui contiennent ces attributs. Ce sont les balises que nous avons définies pour l'enregistrement d'informations descriptives et géographiques sur les *lieux*, et d'informations uniquement descriptives sur les *périodes*.

Pour les données de la catégorie "document" dont nous avons défini onze types dans un premier temps (sur Vianden, cf. 7.1). Comme pour *lieu* et *période*, la structure du schéma XML de chaque type de donnée est composé d'éléments communs comme la description, et d'éléments particuliers comme la localisation. En effet, le géoréférencement n'est pas pertinent pour chaque type de document (on ne donnera pas de coordonnées pour un *texte* par exemple). De même, chaque type de donnée a des attributs particu-

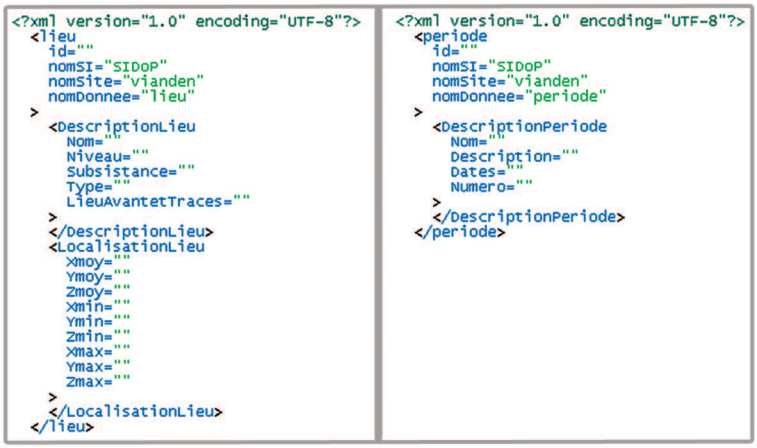


FIG. 7.3 – Schémas XML pour les données de types *lieu* (à gauche) et *période* (à droite)

liers dans ses éléments, car on n'enregistre pas les mêmes métadonnées pour une *carte* et pour une *photographie* par exemple. La Figure 7.4 illustre ceci : elle présente les schémas réalisés pour des documents de type *coupe* et de type *modele3D*. On y voit les éléments communs et les attributs particuliers.

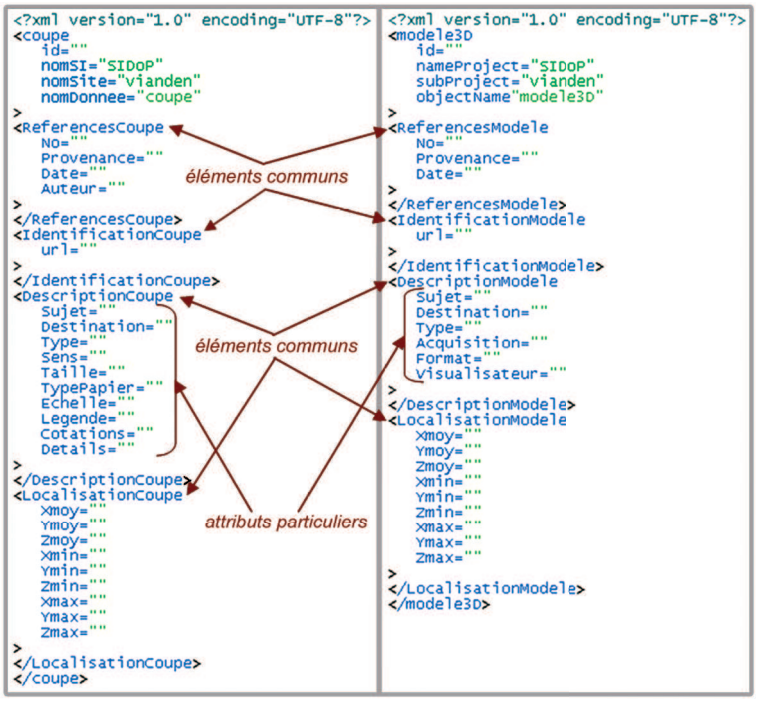


FIG. 7.4 – Schéma XML pour les données de type *coupe* et *modele3D*

L'élément `<References...>` contient toutes les métadonnées nécessaires pour retrouver le document et renseigner les circonstances de sa création.
L'élément `<Identification...>` contient toujours au minimum ce que nous avons désigné comme l'"url" du document, c'est-à-dire l'adresse sur l'ordinateur ou sur Internet qui permet d'accéder à la forme numérique du document. Par exemple, si l'on considère une *coupe* sous forme papier que l'on a scanné, l'emplacement du scan est renseigné dans l'attribut "url" pour pouvoir l'ouvrir directement à partir du fichier XML de la *coupe*. Nous verrons dans le prochain paragraphe comment renseigner cet attribut pour pouvoir effectuer cette visualisation de la donnée numérique.
L'élément `<Description...>`, comme son nom l'indique, contient les informations descriptives que l'on a choisi d'enregistrer pour chaque type de donnée. On voit que les attributs de cet élément sont différents pour la *coupe* et le *modele3D*.
L'élément `<Localisation...>` permet de géoréférencer le document grâce à des coordonnées moyennes, minimales et maximales.
Comme pour les données de type *lieu* et *période*, ces éléments sont vides, il n'y a que leurs attributs qui ont des valeurs. Ce sont des éléments "génériques" qui nous permettent de classer les attributs qu'ils contiennent en différentes catégories : attributs référenciels, attributs d'identification, attributs descriptifs ou attributs géographiques.

Pour finir, pour les données de la catégorie "objet archéologique", nous avons défini sept types sur le site de Vianden. De la même manière que pour les documents, les schémas XML de ces types de données ont certains éléments et attributs en commun et d'autres en particulier. La Figure 7.5 montre le schéma d'un objet de type *armure*. On voit dans ce schéma que nous avons choisi (sans y être obligés) de garder

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
  <armure
    id=""
    nomSI="SIDoP"
    nomSite="vianden"
    nomDonnee="armure"
  >
    <ReferencesArmure
      Nom=""
      Provenance=""
      DateDecouverte=""
      Decouvreur=""
    >
    </ReferencesArmure>
    <DescriptionArmure
      Age=""
      EtatActuel=""
      CirconstancesDecouverte=""
      Interet=""
      Commentaires=""
    >
    </DescriptionArmure>
    <LocalisationArmure
   Xmoy=""
   Ymoy=""
   Zmoy=""
   Xmin=""
   Ymin=""
   Zmin=""
   Xmax=""
   Ymax=""
   Zmax=""
   >
  </LocalisationArmure>
  </armure>
```

FIG. 7.5 – Schéma XML pour les données de type *armure*

le nom de certains éléments "génériques" déjà utilisés pour d'autres types de données : `<References...>`, `<Description...>`, `<Localisation...>`. Ceci permet de conserver une certaine cohérence dans la structure des métadonnées enregistrées à propos des données intégrées dans le SI. Les attributs de ces éléments permettent ensuite de donner toutes les précisions nécessaires à la description d'un objet archéologique, ces informations étant obligatoirement différentes de celles qui décrivent un document.

Nous verrons dans la section 7.4 sur la révision des données, que ces schémas ne sont pas figés en l'état. L'utilisateur peut à tout moment décider de changer la structure de chaque type de donnée.
Le paragraphe suivant montre tout d'abord comment nous proposons de saisir et de visualiser les données selon ces schémas XML.

7.3 Saisie et visualisation

7.3.1 Double enregistrement en XML et dans MySQL

Comme nous l'avons expliqué dans le Chapitre 5, le fait d'avoir choisi d'utiliser l'intergiciel libre WAMP implique l'enregistrement des données dans le SGBD MySQL, et la récupération des informations de la base de données grâce au couplage PHP/serveur Web Apache. Mais parallèlement, nous avons décidé de créer des schémas XML pour nos données et donc de les conserver dans des documents se conformant à ce métalangage. Ainsi, nous proposons un double enregistrement des données : dans des documents XML et dans une base de données MySQL. En effet, les avantages de XML ont été soulignés ci-dessus, et le fait de coupler cet enregistrement avec une conservation dans une solution SGBD traditionnelle permet d'en conserver les avantages, notamment en termes d'accès concurrents et de gestion de gros volumes de données.

La transformation des schémas XML de chaque type de donnée en tables d'une base de données MySQL est faisable avec PHP. En effet, il est possible de programmer en PHP un analyseur syntaxique pour XML. Cet analyseur permet alors d'extraire les informations des documents XML pour pouvoir les utiliser à d'autres fins. Comme nous l'avons indiqué au Chapitre 6, un analyseur PHP permettant de transférer les données d'un fichier XML dans une base de données MySQL avait déjà été programmé pour le système ISA-PX. Nous avons donc pu réutiliser les développements faits dans ce cadre pour pouvoir réaliser directement le pont entre nos schémas de données XML et le SGBD MySQL.
Ce pont fonctionne de la manière suivante :

- les noms du site et de la donnée indiqués dans le schéma XML sont récupérés pour créer une table portant le nom nomsite_nomdonnee ;
- les éléments "génériques" (vides) présents dans le schéma XML, que nous appel-

lerons "nœuds" dans la suite, ne sont pas récupérés. En effet, ils n'ont pas de contenu donc il ne peut leur correspondre aucune ligne ou colonne de la table ;
- tous les attributs présents dans chacun de ces nœuds deviennent les champs de la table nomsite_nomdonnee. S'il n'y a aucune indication de "typage" pour ces attributs dans les schémas XML, par défaut ce sont des "chaînes de caractères", donc tous les champs de la table seront également de type "chaînes de caractères" ;
- il y a autant de fichiers XML qu'il y a d'entités appartenant à un type de donnée (ces fichiers se conformant au schéma du type de donnée), mais il n'y a qu'une table par type de donnée. Les entités deviennent donc les tuples de la table nomsite_nomdonnee.

La Figure 7.6 illustre ce transfert avec une entité de type *coupe*, dont la structure correspond au schéma XML montré sur la Figure 7.4.

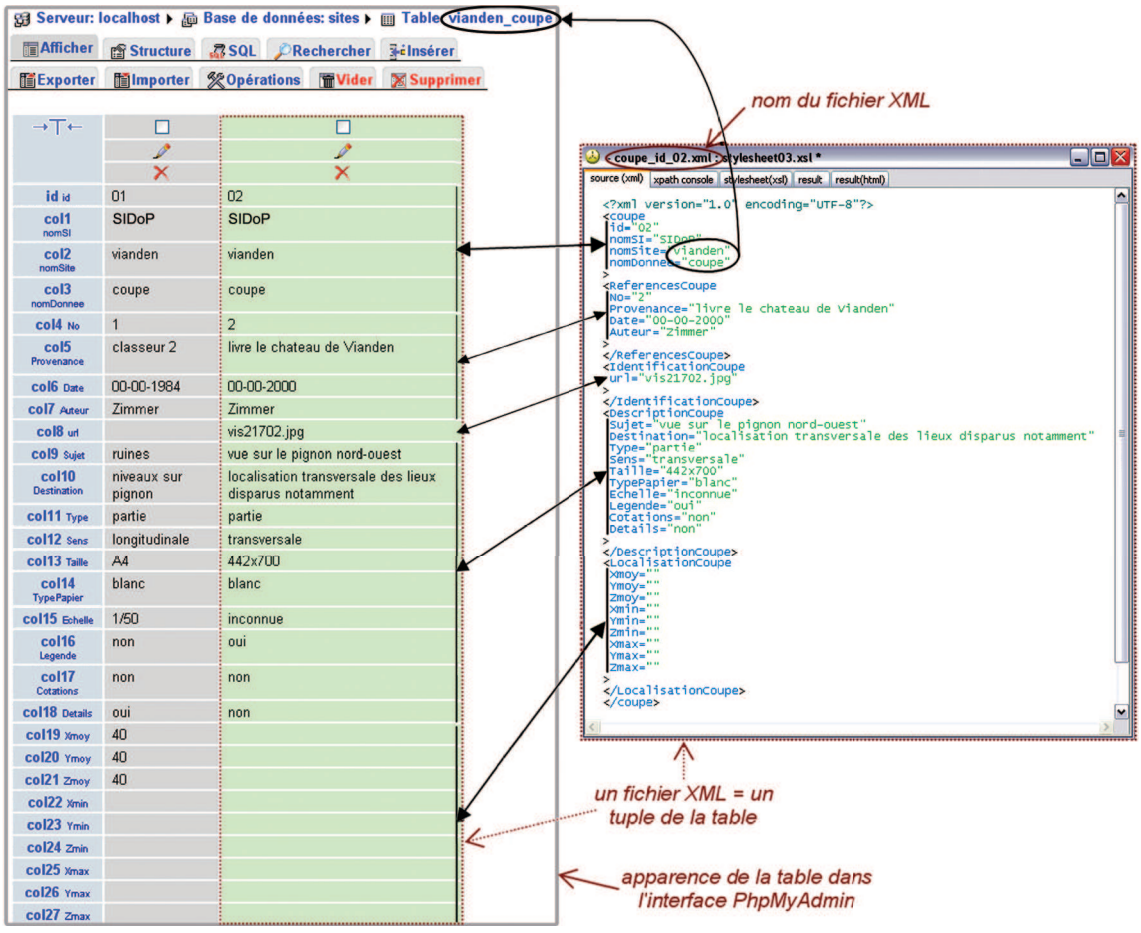


FIG. 7.6 – Correspondance entre un tuple d'une table MySQL et un fichier de donnée XML

On voit sur cette illustration que le premier champ de la table porte le nom "id" puisqu'il contient l'identifiant de la donnée (c'est la clé primaire de la table), et les autres champs

s'appellent "col1" à "col27" (dans le cas d'une donnée de type *coupe*, il y a 27 attributs en plus de l'identifiant qui est obligatoire). Il est possible de constater aussi que ces champs portent, en plus de leurs noms de colonnes, les noms des attributs présents dans le document XML. L'affichage de ces noms d'attributs XML en plus est purement indicatif et n'est possible qu'à partir de la version 5.0 de MySQL[9]. Les requêtes SQL sur la table se feront sur les noms des champs "col1" à "col$n$" et non sur ces noms d'attributs. Pour simplifier l'écriture de requêtes sur les tables, une fonction permet d'accéder, en dehors de l'interface PhpMyAdmin, à cette correspondance entre les attributs XML et les noms de colonnes de la table correspondante. Cette fonction affiche également à quels éléments XML appartiennent les attributs, donc par voie de conséquence les champs de la table, ce qui n'était pas visible dans PhpMyAdmin (ces nœuds n'ayant pas de contenu, il n'apparaissent pas dans la table). L'exécution de cette fonction dans l'interface du SI pour une donnée de type *coupe* donne le résultat présenté sur la Figure 7.7.

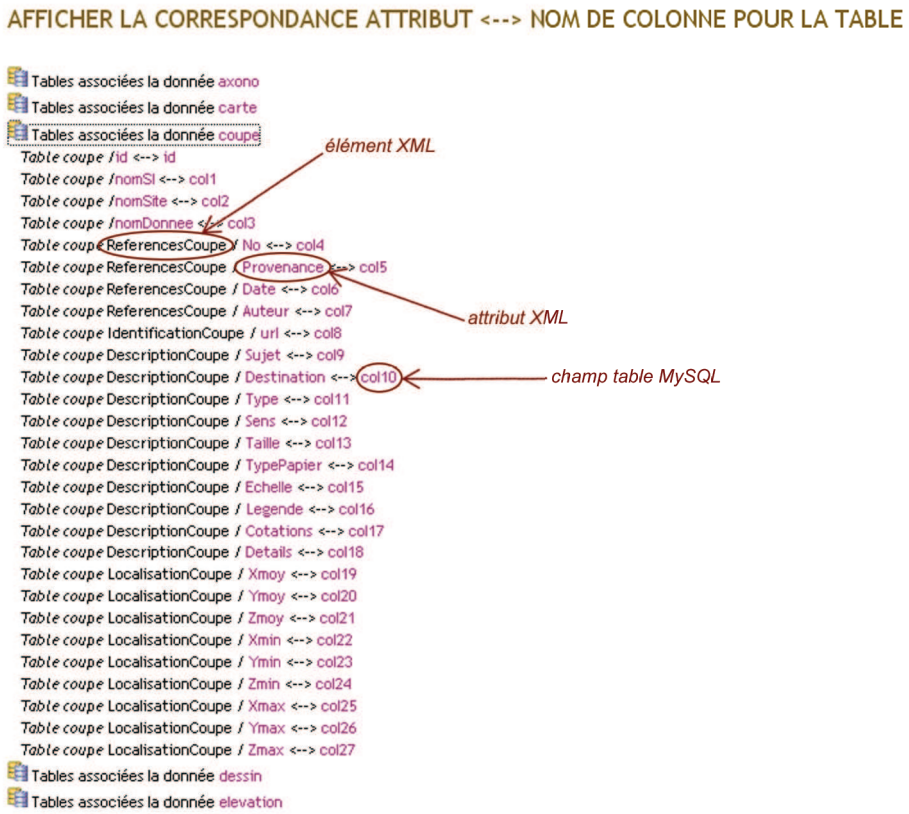


FIG. 7.7 – Correspondance entre éléments/attributs XML et champs de la table MySQL

[9]Le nom de l'attribut est placé dans un champ caché de la table MySQL nommé "Commentaires", qui n'apparaît avec le nom de la colonne que dans les dernières versions de MySQL

L'analyseur syntaxique programmé en PHP permet donc de transférer des données comprises dans des documents XML dans des tables d'une base de données MySQL. Il permet également de faire la transformation inverse, c'est-à-dire recréer les fichiers de données XML à partir des données de la base de données. En effet, l'exécution de la fonction d'analyse permet de conserver en mémoire la structure du schéma XML de chaque type de donnée, c'est-à-dire l'enchaînement des éléments et des attributs. Le processus inverse consiste alors dans un premier temps en la recréation d'un fichier XML pour chacun des tuples de la table. Par exemple si l'on considère l'extrait de table montré dans la Figure 7.6, on voit qu'il y a deux tuples, c'est-à-dire deux données de type *coupe* : une appelée "01" et l'autre "02". Le programme PHP recrée alors, à partir de ces deux tuples, deux fichiers XML nommés coupe_id_01.xml et coupe_id_02.xml. Puis, la structure du schéma du type de donnée étant en mémoire, les valeurs des champs de la table sont alors simplement replacés à l'endroit correspondant dans le schéma pour récréer le fichier XML de chaque entité.

La séquence globale des fonctions permettant le double enregistrement en XML et dans des tables MySQL est schématisée sur la Figure 7.8. Elle représente le scénario de gestion de la base de données MySQL correspondant aux documents XML contenant toutes les données gérées par le SI. Ce scénario consiste pour un archéologue[10] à effectuer les actions suivantes :

- demander la (re)création de la structure de la base de données (BD) à partir des fichiers XML des données ;
- demander la recréation des fichiers XML des données à partir des données de la BD ;
- demander l'affichage de la correspondance entre les attributs des fichiers XML des données et les colonnes de la BD.

Nous pouvons désormais expliquer la manière dont les données sont entrées dans le SI, c'est-à-dire le stockage, la création des schémas XML pour chaque type de donnée, et l'ajout des entités pour chaque type.

7.3.2 Intégration dans le SI

Nous montrons dans ce chapitre le scénario d'enregistrement d'une donnée dans le Système d'Information, partant du principe que le type de la donnée considérée n'existe pas encore dans le SI. Ce scénario se décompose en trois phases :

1. stockage de la donnée (s'il y a lieu) ;
2. création du type de donnée ;
3. ajout de l'instance de ce type de donnée ;

[10] ou tout utilisateur qui a des droits sur la base de données ; nous y reviendrons dans le Chapitre 10

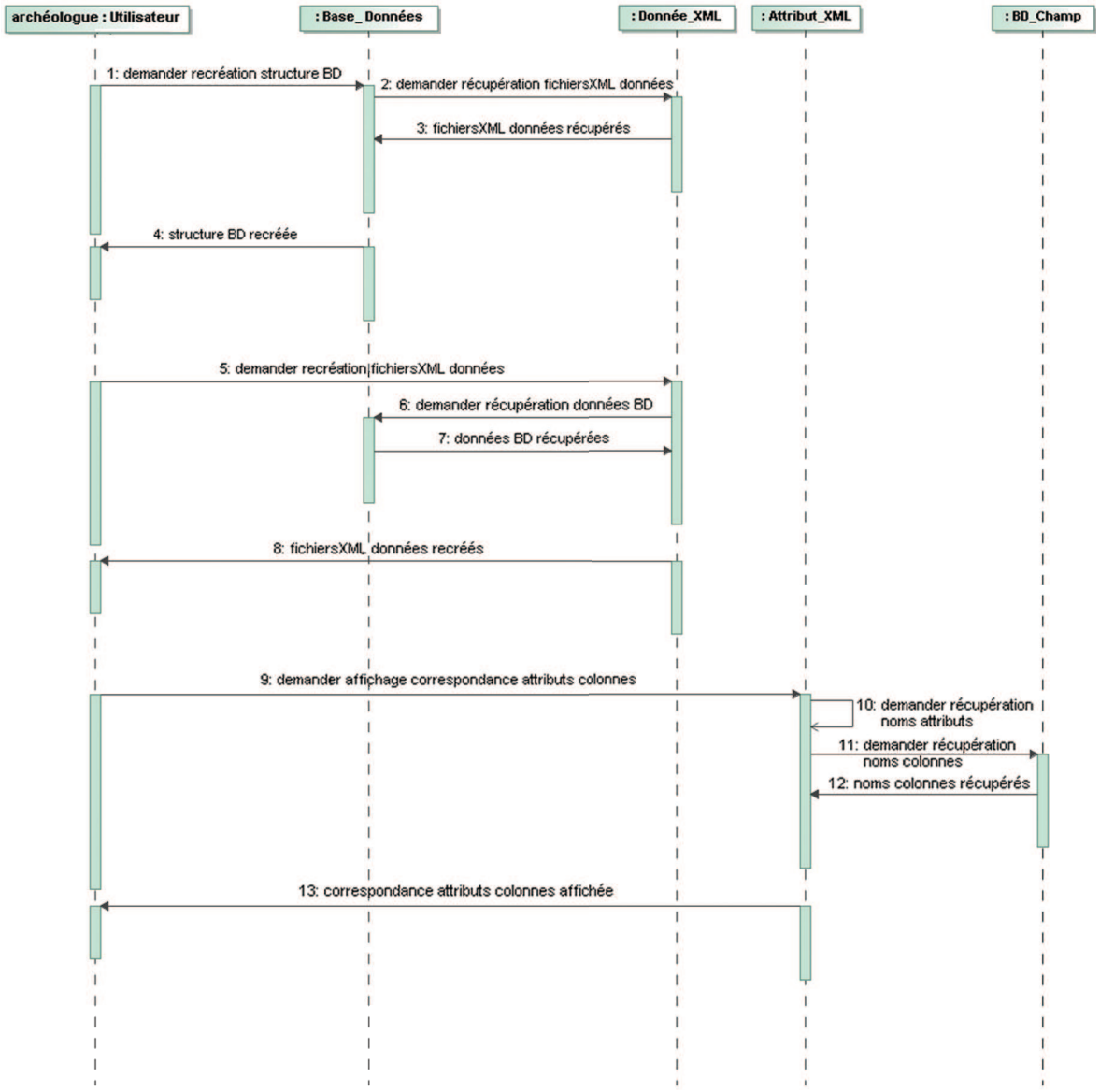


FIG. 7.8 – Diagramme de séquence décrivant la gestion de la base de données MySQL en fonction des données XML

1. Pour insérer une donnée dans le Système d'Information, il faut donc éventuellement stocker la donnée physique sur le serveur. Ce stockage intervient dans le cas de données de la catégorie "document", ce n'est pas applicable pour les lieux, les périodes et les objets archéologiques. En effet, on pourra stocker une photographie ou le modèle 3D d'un objet (qui sont des documents), mais pas l'objet lui-même. Pour effectuer ce stockage, nous avons programmé une fonction :

– qui permet de parcourir les répertoires de l'ordinateur sur lequel on travaille pour

sélectionner le document numérique que l'on souhaite stocker ;
– puis qui copie ce document sur le serveur Web dans un répertoire prédéterminé.

Nous avons programmé en réalité cinq fonctions de ce type, suivant le type de document que l'on souhaite stocker : image, graphique 2D, modèle 3D, panorama et texte. En effet, de ce stockage dépend la possibilité par la suite de pouvoir afficher ou ouvrir le document (nous y reviendrons plus loin). Ainsi, la seule chose qui différencie ces fonctions est le répertoire dans lequel est copié la donnée. La catégorie "image" citée ci-dessus comprend tous les types de données déterminés en 7.1 (axonométrie, carte, coupe, dessin...) sauf les modèles 3D, graphiques, panoramas et textes. Toutes ces données seront donc stockées dans le même répertoire sur le serveur et affichées de la même manière. Les formats à stocker pour pouvoir afficher ou ouvrir les données par la suite sont les suivants : les images doivent être en .JPG, les graphiques 2D en .SVG, les modèles 3D en .WRL (VRML), les panoramas en .EXE et les textes en .DOC ou .PDF.

2. Une fois la donnée stockée, il faut créer le schéma XML permettant son enregistrement et sa description. Nous avons écrit des programmes qui permettent de créer ce schéma sans avoir besoin de connaître le langage XML en détail. En effet, je me suis attachée à la simplicité d'utilisation du système, donc il ne fallait pas obliger l'utilisateur à avoir des connaissances *a priori* dans un langage particulier. Les programmes créés donnent trois choix à l'utilisateur pour la création d'un nouveau type de donnée :

– (A) création d'un type inédit ;
– (B) création d'un type hérité d'un autre type ;
– (C) création d'un type importé depuis un autre site archéologique géré par le SI.

(A) Le premier cas consiste à créer un schéma de donnée différent des autres types de données qui peuvent déjà exister dans le système. L'utilisateur a le choix des éléments et des attributs qu'il souhaite enregistrer à propos de la donnée à entrer dans le SI. La procédure que nous avons programmée pour la création d'un nouveau schéma de donnée inédit est illustrée sur la Figure 7.9. Elle montre les interfaces du SI à la disposition de l'utilisateur pour créer un nouveau type de donnée, dans ce cas un document de type *imagevirtuelle*. Il est demandé à l'utilisateur de donner le nom du type de donnée, puis de remplir les champs d'un formulaire qui se crée au fur et à mesure de l'ajout des nœuds (éléments vides pour la catégorisation des attributs) et des attributs qu'il souhaite affecter au type de donnée. Le schéma XML est alors automatiquement généré à partir de la structure de base définie plus haut :

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<TypeDonnee
id="..."
nomSI="..."
nomSite="..."
nomDonnee="..."
>
nœuds avec attributs
</TypeDonnee>
```

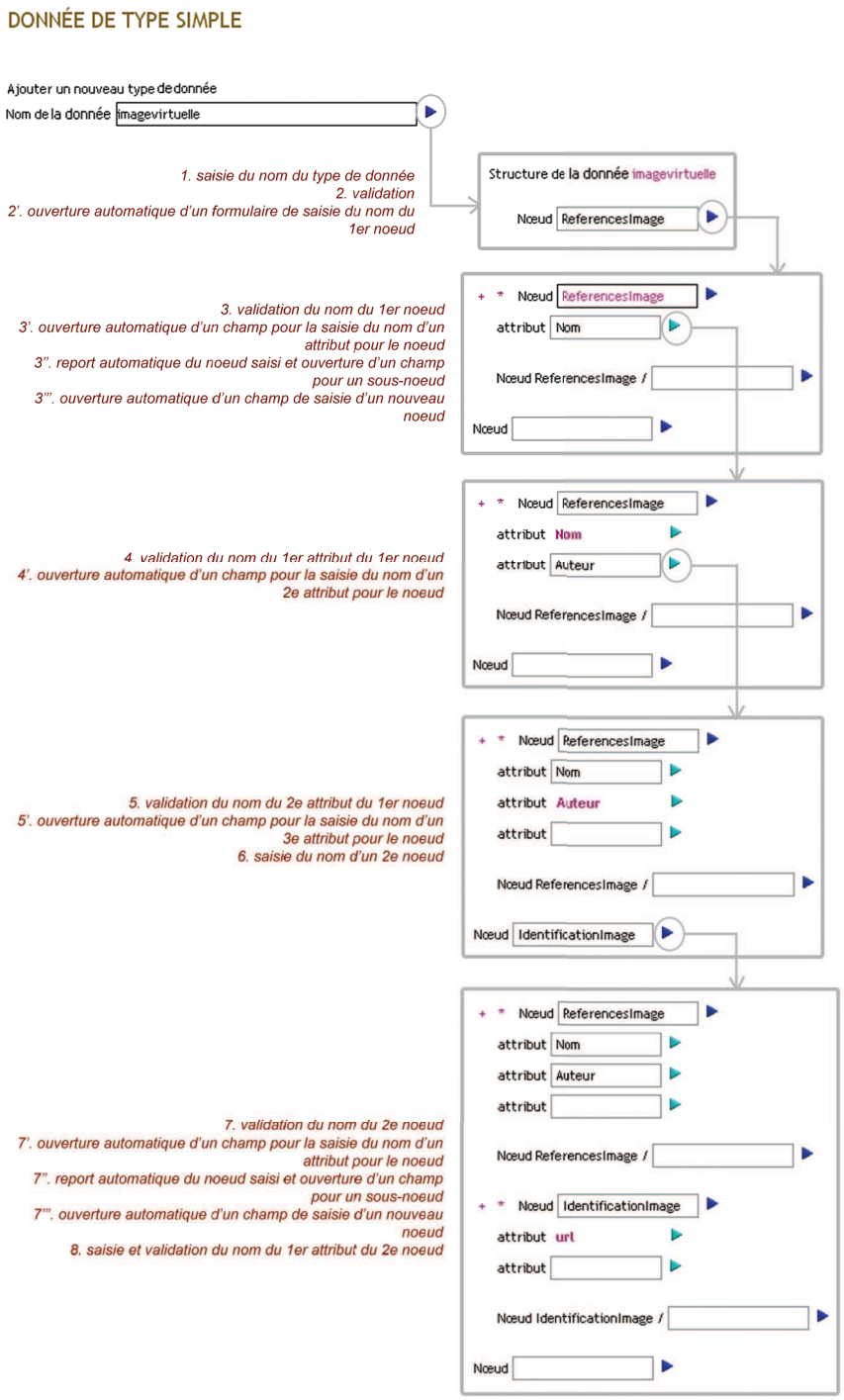


FIG. 7.9 – Procédure de création d'un nouveau type de donnée *imagevirtuelle*

Les nœuds et attributs définis par l'utilisateur dans le formulaire y sont insérés suivant les spécificités du langage XML que nous avons expliquées précédemment (balises ouvrantes et fermantes, nœuds incluant les attributs). Le résultat de cette fonction est le fichier *template* ou schéma du nouveau type de donnée créé (Figure 7.10).

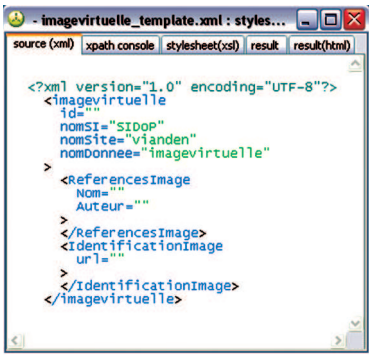


FIG. 7.10 – Schéma XML du nouveau type de donnée *imagevirtuelle*

(B) Le deuxième cas consiste à créer un nouveau type de donnée à partir d'autres schémas XML existant déjà dans le système. En effet, comme nous l'avons souligné précédemment, nous avons décidé de respecter une structure plus ou moins commune pour toutes les données enregistrées. Cette structure est notamment basée sur les nœuds `<References...>`, `<Description...>` ou `<Localisation...>`, et permet de garder une cohérence dans les métadonnées de chaque type de donnée. Ainsi, lorsque l'on souhaite créer un nouveau type de donnée, il est intéressant de pouvoir se baser sur un schéma XML existant déjà. Cela permet également de gagner du temps. Nous avons donc programmé une fonction qui permet de récupérer la structure complète du schéma d'un autre type de donnée. Il suffit alors de changer certains attributs qui ne conviendraient pas dans les nœuds déjà existants, d'en ajouter d'autres ou d'en supprimer, et d'ajouter ou de supprimer des nœuds. Ceci se fait par l'intermédiaire d'un formulaire ayant exactement la même structure et le même fonctionnement que celui expliqué dans la Figure 7.9. La différence est que ce formulaire ne se crée pas au fur et à mesure de l'ajout des nœuds et des attributs. Comme on se base sur un schéma existant, lorsque l'on demande la création d'une donnée héritée, on indique son nom et un formulaire "prérempli" avec les nœuds et les attributs du type de donnée duquel on hérite est automatiquement affiché. Ce formulaire prérempli est alors modifiable à volonté pour décrire exactement le nouveau type de donnée.
(C) Le troisième choix proposé à l'utilisateur pour créer un nouveau type de donnée est d'en importer un depuis un autre site déjà géré par le SI. En effet, notre SI permet de gérer plusieurs sites archéologiques pour lesquels il est possible d'enregistrer autant de types de données que nécessaire. Or, les données documentaires surtout sont souvent de mêmes types entre deux sites archéologiques : il y a des rapports de fouilles, des plans, des photographies, des dessins, etc. Ainsi, si l'utilisateur souhaite intégrer des

photographies par exemple dans la base de données de son site archéologique, il est pertinent de lui laisser la possibilité d'importer depuis un autre site le schéma des données de type *photographie*. Cela lui évite d'avoir à refaire lui-même son schéma, au risque d'oublier des métadonnées pertinentes. Une fonction d'import a donc été programmée. La procédure est la suivante :

- l'utilisateur sélectionne le site archéologique dont il veut importer un type de donnée ;
- le programme affiche alors la liste des types de données que comprend le site choisi ;
- l'utilisateur sélectionne le type voulu ;
- le programme récupère alors le schéma XML du type de donnée dans le répertoire "xml" du site choisi, puis le copie dans le répertoire "xml" du site de l'utilisateur.

Le nouveau type de donnée importé est donc créé sans aucune intervention supplémentaire de la part de l'utilisateur. Il peut alors directement ajouter une instance de ce type de donnée.

3. Lorsque le type de donnée est créé avec une des trois procédures décrites ci-dessus, on peut alors ajouter une instance de donnée correspondant à ce type. Nous avons programmé une fonction qui permet d'ajouter la donnée en remplissant un formulaire généré automatiquement à partir du schéma du type de donnée créé précédemment. Ce formulaire est généré grâce à un analyseur syntaxique programmé un PHP, qui permet de mettre en page le contenu du schéma XML. Son apparence, c'est-à-dire la police choisie pour l'écriture des nœuds et des attributs, les couleurs, la taille des cases pour le remplissage des champs du formulaire, est déterminée par une feuille de style de type CSS (cf. 7.2.1).
L'utilisateur saisit alors un identifiant (unique) pour la donnée qu'il souhaite enregistrer, puis il accède au formulaire dans lequel il remplit les champs de métadonnées définis dans le *template*. Pour le champ "url" qui va permettre l'affichage de l'image stockée avec la fonction décrite ci-dessus (en 1.), il faut entrer le nom de l'image stockée suivi de son extension (.JPG dans le cas d'une image). Lors du stockage, il faut donc retenir ou se noter le nom de la donnée pour pouvoir le placer dans le champ "url" au moment de la saisie. Si le nom saisi et la donnée stockée se correspondent, une vignette avec l'image apparaît automatiquement. Nous avons en effet programmé une fonction qui définit que si l'attribut XML est "url", alors il faut afficher l'image portant comme nom la valeur de cet attribut. L'affichage de cette image se fait sous forme d'une vignette dont la taille est définie dans le fichier de configuration du site (cette taille de vignette est modifiable à tout moment par l'utilisateur). Il suffit alors de cliquer sur cette vignette pour faire ouvrir une nouvelle fenêtre contenant l'image à sa taille originale. Cette procédure est illustrée sur la Figure 7.11 avec l'exemple d'une image virtuelle représentant une des reconstitutions historiques du château de Vianden faites par le CRAI.

Dès lors que des données ont été intégrées dans le Système d'Information, il s'agit de voir la liste de ces données, type par type, et d'afficher leurs métadonnées.

FIG. 7.11 – Procédure pour l'ajout d'une donnée de type *imagevirtuelle*

7.3.3 Affichage

Dans l'interface du Système d'Information, nous avons choisi de permettre l'accès aux données suivant leur type ou catégorie : *lieu*, *période*, "document" ou "objet archéologique". Nous proposons donc à l'utilisateur de visualiser la liste des données de chaque type, sachant que pour les catégories "document" et "objet archéologique", l'utilisateur doit d'abord choisir le type de donnée de cette catégorie dont il souhaite visualiser les instances avant de pouvoir accéder à la liste. Lorsqu'une liste d'instances est affichée, elle se présente de la manière suivante : un item permet d'afficher les métadonnées, le type et l'identifiant de la donnée sont affichés l'un à côté de l'autre (comme *imagevirtuelle 01* dans la Figure 7.11), et dans le cas d'un document, si une image a été stockée, elle apparaît sous forme de vignette à côté du nom de la donnée (Figure 7.13). Ensuite, l'utilisateur peut visualiser les métadonnées associées à une des instances de la liste en cliquant sur l'item. Une nouvelle fenêtre du navigateur s'ouvre alors. Elle contient le fichier XML de l'instance de donnée mis en forme pour un affichage en HTML.
Cette mise en page du fichier XML de la donnée se fait là encore par l'intermédiaire d'un *parseur* programmé en PHP qui analyse la structure du document XML. Cette analyse permet de déterminer si le document est bien formé par rapport au schéma de la donnée (enchaînement des nœuds et attributs) et si la syntaxe est juste par rapport aux règles du métalangage XML. Une fois le document analysé, les éléments et attributs sont extraits par l'analyseur et mis en forme. L'apparence du fichier mis en page par l'analyseur est définie dans une feuille de style CSS associée. L'analyseur et la feuille de style permettent alors de transformer le document XML en page HTML qui permet la visualisation des nœuds et des attributs XML d'une manière lisible pour tous. La Figure 7.12 montre la mise en forme du document XML coupe_id_02.xml (déjà présenté sur la Figure 7.6) par l'intermédiaire du *parseur* PHP et de la feuille de style CSS associée.

La procédure d'accès à ce document par l'intermédiaire de la liste des documents de type *coupe* est expliquée sur la Figure 7.13. Elle présente l'interface du SI contenant la liste des *coupes* avec un premier aperçu de l'image stockée, l'affichage du document XML mis en forme et l'ouverture de l'image originale.

Nous pouvons désormais expliquer les fonctions à disposition de l'utilisateur pour réviser les données déjà enregistrées sous forme de fichiers XML correspondant à des schémas prédéfinis et dans la base de données MySQL.

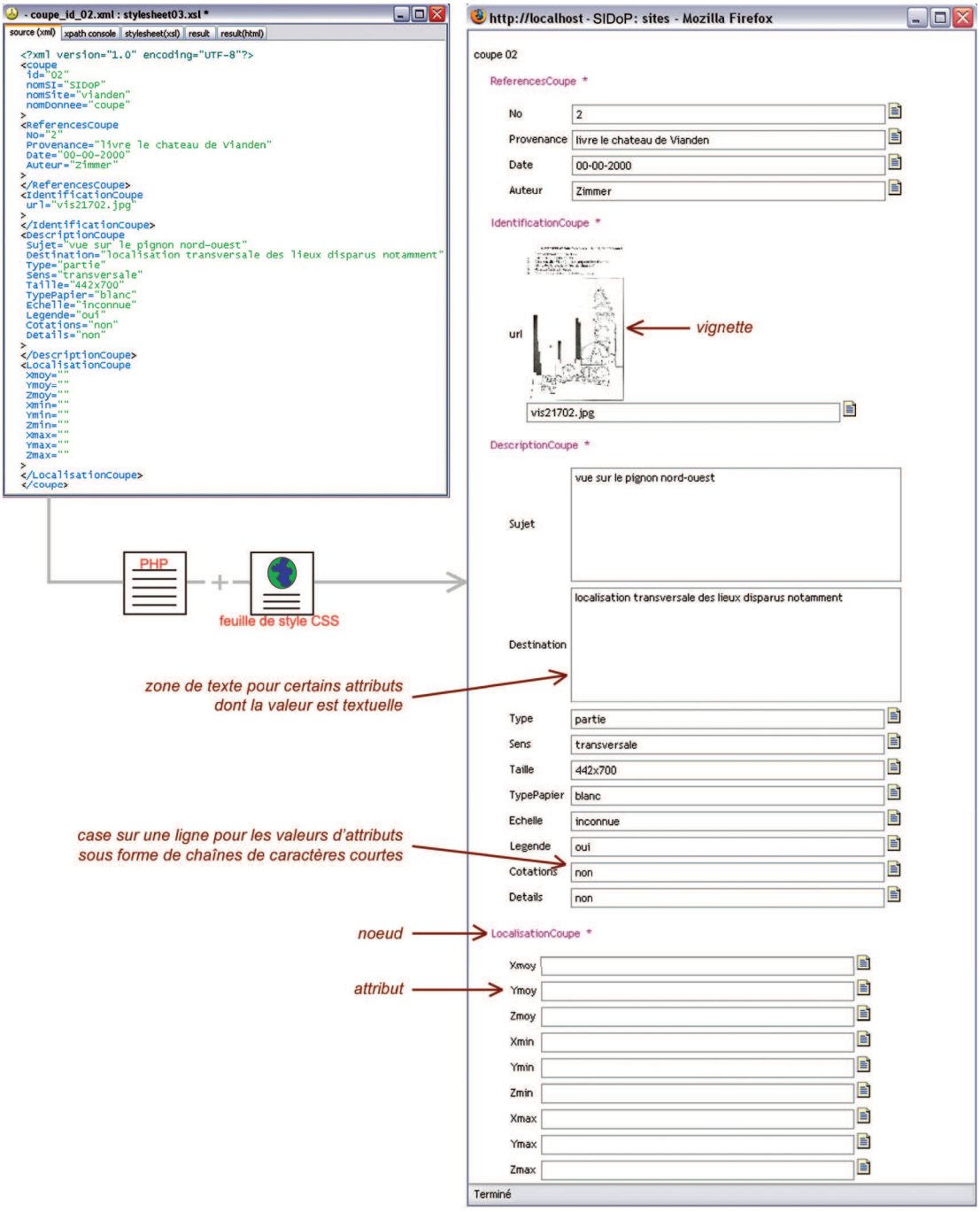


FIG. 7.12 – Affichage HTML d'un document XML par l'intermédiaire d'un analyseur syntaxique PHP et d'une feuille de style CSS. Exemple de la donnée *coupe 02* du site de Vianden

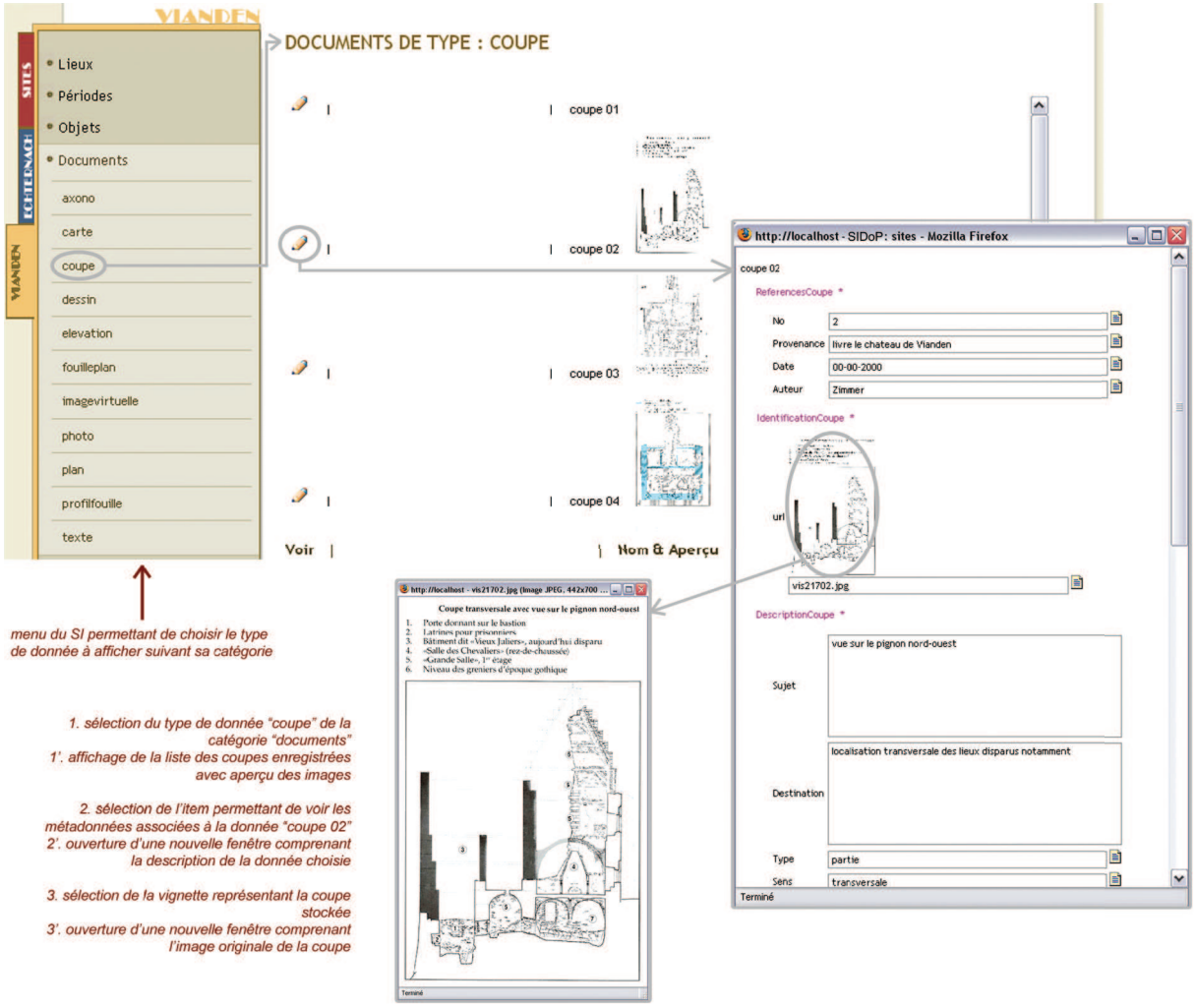


FIG. 7.13 – Procédure d'affichage des métadonnées et de l'image d'une *coupe* du site de Vianden à partir de l'interface du SI

7.4 Révision

Pour procéder à la mise à jour et à la révision des données, nous proposons à l'utilisateur autorisé (gestionnaire du site, archéologue, administrateur) différentes fonctions qui lui permettent :

- (A) d'éditer le fichier XML mis en forme pour modifier la valeur des attributs ;
- (B) de renommer la donnée (changer l'identifiant) ;
- (C) de dupliquer la donnée ;
- (D) de modifier la structure du schéma XML du type de donnée ;
- (E) de donner des valeurs par défaut aux attributs d'un type de donnée ;

- (F) de supprimer une donnée ;
- (G) de supprimer un type de donnée (avec toutes les instances y correspondant).

(A) L'édition du fichier XML d'une donnée s'effectue exactement de la même manière que l'affichage. L'utilisateur autorisé édite le fichier XML mis en forme en HTML à partir de la liste des données et il peut alors changer la valeur des attributs dans chacune des cases. Il a alors un bouton qui lui permet de valider ses modifications. Celles-ci sont mises en mémoire en tant que variables PHP, et un programme permet de réécrire le fichier XML de la donnée avec les nouvelles valeurs d'attributs mémorisées. La base de données MySQL est alors également automatiquement mise à jour par l'intermédiaire de l'analyseur syntaxique qui avait été écrit pour faire le pont entre les fichiers XML et les tables de la base de données (cf. 7.3.1).

(B) Pour pourvoir renommer une donnée, nous avons programmé une fonction qui propose à l'utilisateur un champ de formulaire indépendant dans lequel il écrit un nouvel identifiant pour la donnée. Le programme récupère alors l'identifiant, il modifie le nom du fichier XML de la donnée (qui est sous la forme typedonnee_id_*identifiant*.xml) et il met à jour automatiquement le champ id du tuple de la table nomsite_nomdonnee correspondant au fichier XML.

(C) Nous avons également programmé une fonction de duplication. Celle-ci demande un identifiant pour la nouvelle donnée et crée un fichier XML exactement identique à celui dont l'utilisateur a demandé la duplication. Un tuple portant l'identifiant de la nouvelle donnée est alors rajouté dans la même table que celle de la donnée dupliquée. Les valeurs des autres champs de ce tuple sont remplis avec les mêmes valeurs d'attributs que ceux de la donnée de départ. Cette fonction peut être très utile pour gagner du temps lors de l'enregistrement de deux données dont les métadonnées sont presque identiques (un plan et un extrait détaillé de ce plan par exemple). Une fois créées par duplication, les valeurs des attributs qui ne seraient pas identiques à celles de la donnée initiale peuvent être modifiées avec la fonction d'édition décrite ci-dessus.

(D) Comme nous l'avons indiqué dans la partie décrivant les schémas de données XML, nous avons souhaité proposer un système souple pour permettre l'enregistrement de tout type de données, et adaptable aux besoins des différents utilisateurs. Ainsi, nous avons programmé une fonction qui permet à tout moment de modifier la structure des schémas de données XML définis au préalable. La modification de la structure du schéma XML se fait par l'intermédiaire d'un formulaire prérempli ayant la même forme que celui présenté pour la création du schéma (cf. Figure 7.9). Ce formulaire est réalisé par analyse du schéma XML du type de donnée que l'on souhaite modifier, les paramètres de mise en forme par le *parseur* et d'apparence par feuille de style étant différentes de ceux programmés pour l'affichage des données. La Figure 7.14 présente une modification de la structure du schéma XML de la donnée de type *imagevirtuelle* dont nous avons montré la création précédemment. Le changement de structure du schéma se répercute sur toutes les instances du type de donnée modifié, à la fois dans

les fichiers XML et dans la base de données MySQL (ajout, modification ou suppression de champs de la table du type de donnée).

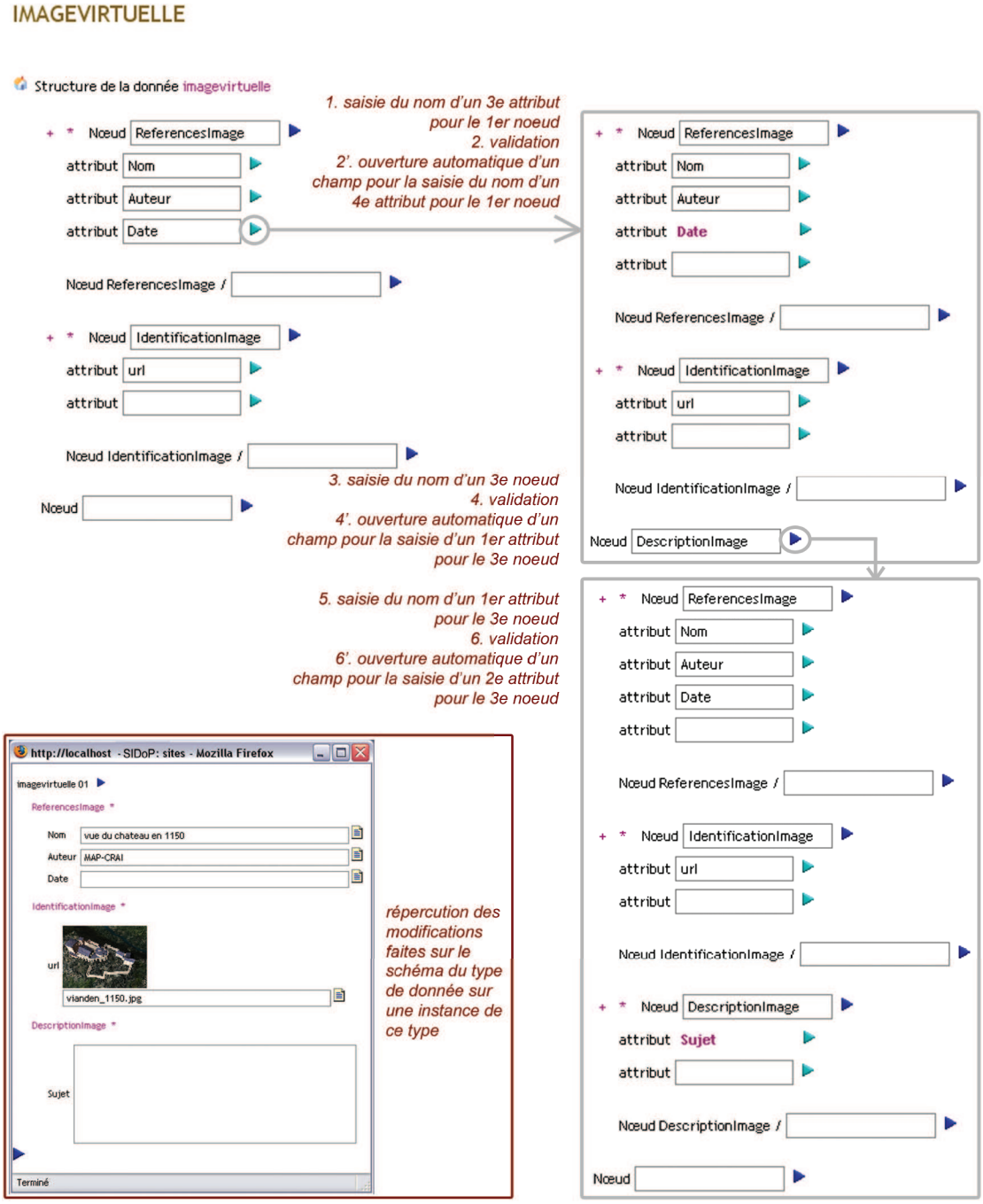


FIG. 7.14 – Procédure de modification de la structure du schéma XML du type de donnée *imagevirtuelle*

(E) Toujours dans un souci de gain de temps et de simplicité pour l'utilisateur, nous proposons une fonction permettant l'enregistrement de valeurs par défaut pour les attributs de chaque type de donnée. En effet, il peut être intéressant pour un type de donnée pour lequel on saurait qu'un attribut aura presque toujours la même valeur, de pouvoir saisir cette valeur d'attribut une seule fois et que celle-ci soit alors écrite par défaut dans le formulaire lors de l'ajout d'une instance de donnée. Par exemple, pour notre cas du site d'Echternach, toutes les images virtuelles dont nous disposons (cf. Figure 5.3) ont été créées par le laboratoire MAP-CRAI. Il est donc avantageux de pouvoir indiquer par défaut cette valeur pour l'attribut `Auteur` pour toute donnée du type *imagevirtuelle* qui sera ajoutée par la suite. Le principe de cette fonction est de récupérer la valeur par défaut indiquée par l'utilisateur et de l'écrire dans le schéma XML du type de donnée en tant que valeur pour l'attribut choisi. Ainsi, lors de l'ajout d'une nouvelle instance de donnée (cf. Figure 7.11), la valeur de l'attribut pour lequel l'utilisateur a indiqué une valeur par défaut sera automatiquement écrite dans la case correspondante du formulaire. En effet, le formulaire d'ajout d'une instance de donnée est créé à partir du schéma du type de donnée. Donc si une valeur d'attribut est indiquée dans le schéma (ce qui n'est pas le cas normalement, cf. Figure 7.10), alors cette valeur sera affichée en même temps que les noms de nœuds et d'attributs.

(F) Pour supprimer une instance de donnée, l'utilisateur dispose d'un item dans la liste des données qui va entraîner l'exécution d'une fonction de suppression. Cette fonction réalise l'effacement du fichier XML de la donnée, et simultanément supprime le tuple de la table MySQL dans laquelle cette donnée était enregistrée.

(G) Enfin, l'utilisateur peut choisir de supprimer un type de donnée. Nous avons alors programmé une fonction qui efface le fichier *template* XML du type de donnée, mais également tous les fichiers XML des instances de données correspondant à ce type. De plus, la table `nomsite_nomdonnee`, qui correspond au type de donnée que l'on souhaite supprimer et qui contient toutes les instances, est également effacée de la base de données.

Grâce à ces fonctions, l'utilisateur peut à tout moment apporter des modifications sur les données et sur les types de données. Ceci confère au Système d'Information une grande souplesse d'enregistrement et d'utilisation des données.

Nos principes de conservation des données sont donc basés sur un double enregistrement des données en tant que fichiers XML et dans une base de données MySQL, ce qui permet de cumuler les avantages de ces deux modes de conservation des données. Le stockage, la création, l'ajout et la révision des données sont possibles par l'intermédiaire de fonctions simples d'utilisation et paramétrables à volonté pour s'adapter au mieux aux différents types de données à enregistrer et aux besoins des divers utilisateurs. Nous pouvons désormais expliquer les outils que nous avons développés pour lier et gérer efficacement les données enregistrées dans le Système d'Information.

Chapitre 8

Outils de gestion des données

8.1 Liaisons entre les données

Pour pouvoir gérer efficacement les différents types de données que nous avons décrits précédemment, il est important de faire des liens entre ces données. Comme nous l'avons indiqué dans la section 7.1 sur les types de données, nous avons décidé d'enregistrer, en plus des données primaires et secondaires de l'archéologie, des données spatiales et temporelles pour pouvoir relier les autres données. En effet, tout document ou tout objet archéologique concerne obligatoirement un lieu du site, une période de l'histoire de celui-ci, ou les deux. Il est donc intéressant de proposer à l'utilisateur la possibilité de pouvoir retrouver tous les documents concernant un lieu particulier, ou tous les objets datant d'une période définie. De plus, il peut également être pertinent de relier les données documentaires et les données objets, c'est-à-dire de pouvoir accéder à partir d'un objet archéologique à tous les documents qui le concernent, ou encore de faire des liens entre plusieurs documents.
Ainsi, nous avons décidé de créer des liaisons entre les différents types de données que notre Système d'Information permet de conserver. Ces liaisons sont schématisées sur la Figure 8.1, qui présente un extrait du diagramme de classes global du Système d'Information que nous présenterons dans le Chapitre 10. Sur ce diagramme, nous avons représenté les différentes catégories et types de données décrits dans le chapitre précédent. La classe *Donnée* est une classe abstraite qui est composée des classes *lieu*, *periode*, *document* et *objet archéologique*. Les classes *lieu* et *période* sont des types de données qui peuvent être instanciés. Les classes *document* et *objet archéologique* sont elles-mêmes des classes abstraites (catégories de données), car elles n'ont pas directement d'instances (comme nous l'avons déjà indiqué, il n'y a pas dans le SI de donnée de type "Document"). Ces classes ont également des sous-classes qui sont les types de données *plan*, *photo*, *poterie*, *fragment*, etc., et qui, elles, ont des instances. Le lien existant entre une

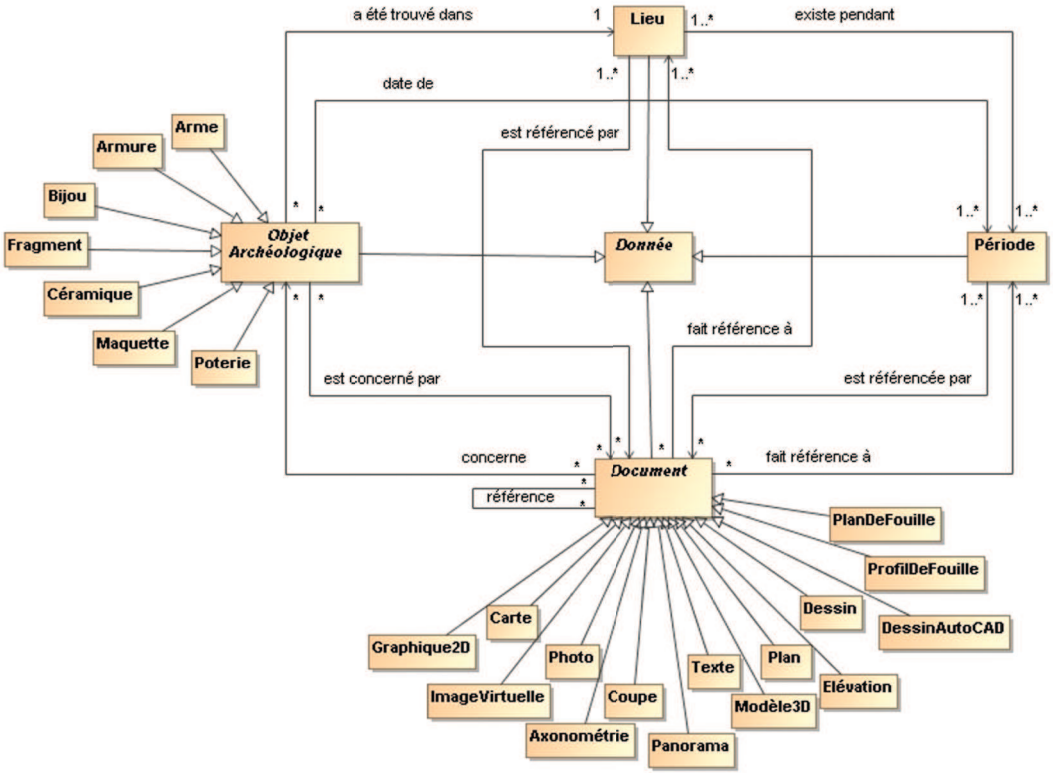


FIG. 8.1 – Diagramme de classes présentant les relations entre les données du SI

classe et une sous-classe est une relation d'héritage, c'est-à-dire que toutes les propriétés de la classe s'appliquent à la sous-classe. Ainsi, il n'est pas nécessaire de relier tous les types de documents avec tous les lieux ou périodes, il suffit de schématiser le lien entre la classe *document* et la classe *lieu*. Les liaisons représentées sur le diagramme ont une direction et une cardinalité. Cette cardinalité est représentée par un astérisque * simple lorsque il y a de 0 à n instances qui participent à la relation, et par le symbole *1..** lorsqu'il y a une à n instances concernées. Détaillons les relations schématisées :

- 1 à n *lieux* existent pendant 1 à n *périodes* ;
- 1 à n *lieux* sont référencés par 0 à n documents ;
- 1 à n *périodes* sont référencées par 0 à n documents ;
- 0 à n documents font référence à 1 à n *lieux* ;
- 0 à n documents font référence à 1 à n *périodes* ;
- 0 à n documents concernent 0 à n objets archéologiques ;
- 0 à n documents sont référencés par 0 à n documents ;
- 0 à n documents font référence à 0 à n documents ;
- 0 à n objets ont été trouvés dans 1 et 1 seul *lieu* ;
- 0 à n objets datent de 1 à n *périodes* ;
- 0 à n objets sont concernés par 0 à n documents.

Grâce à ces relations, toutes les données sont liées de manière bidirectionnelle le plus souvent. Ceci permet par exemple à l'utilisateur de voir rapidement quels documents concernent une certaine période, mais également quelles périodes sont référencées par un document particulier.

D'un point de vue technique, pour pouvoir être réalisées effectivement, ces liaisons doivent être formalisées en XML mais également dans la base de donnée MySQL à partir de laquelle vont se faire les requêtes SQL permettant de retrouver certaines données par rapport à d'autres. Le métalangage XML prévoit des mots réservés permettant de lier des documents XML entre eux : le mot `id` est un identificateur et le mot `idRef` permet de faire référence à un identificateur propre au document [Carlson, 2001]. A partir de ces notions, nous avons formalisé les liaisons entre des documents XML différents grâce au principe des éléments multiples existant dans le langage XML, qui permet de reconnaître dans un document des balises provenant d'un document différent. Ce principe permet de faire référence dans un document XML à un ou plusieurs autres documents par l'intermédiaire d'une balise de type `<...List>`. La formalisation de ce principe en XML est illustrée sur la Figure 8.2. Nous y montrons la liaison entre la donnée *coupe 02* [1] et les données de type *lieu* nommées *lieu bastion* et *lieu juliers* du site de Vianden. Ceci signifie que la *coupe 02* montre des éléments des *lieux* du château baptisés *bastion* et *juliers*.
La structure XML de l'élément multiple est donc la suivante :

```
<TypeDonneeList>
<TypeDonnee
idRef="identifiant d'une donnée de type TypeDonnee"
>
</TypeDonnee>
<TypeDonnee
idRef="identifiant d'une autre donnée de type TypeDonnee"
>
</TypeDonnee>
...
</TypeDonneeList>
```

Cette séquence d'éléments est à insérer dans le fichier XML de la donnée dans laquelle on veut faire référence à d'autres données, avant la balise de fin `<TypeDonnee>` de la structure de base de tout document XML décrivant les données du SI (cf. 7.2.3). Cette insertion n'est bien-sûr pas faite par l'utilisateur directement dans le fichier XML. Il s'agit pour rajouter des références à un ou plusieurs types de données, de modifier dans l'interface du SI la structure du schéma XML du type de donnée à partir duquel on souhaite pouvoir faire référence à un autre type de donnée. Cette modification se fait grâce aux fonctions programmées en PHP décrites dans le (D) du paragraphe 7.4. La Figure 8.3 illustre l'ajout d'un nœud multiple qui va permettre de faire référence à une ou plusieurs périodes. Le nœud multiple n'a pas lui-même d'attribut, il faut directe-

[1] que nous prenons comme exemple depuis le chapitre précédent

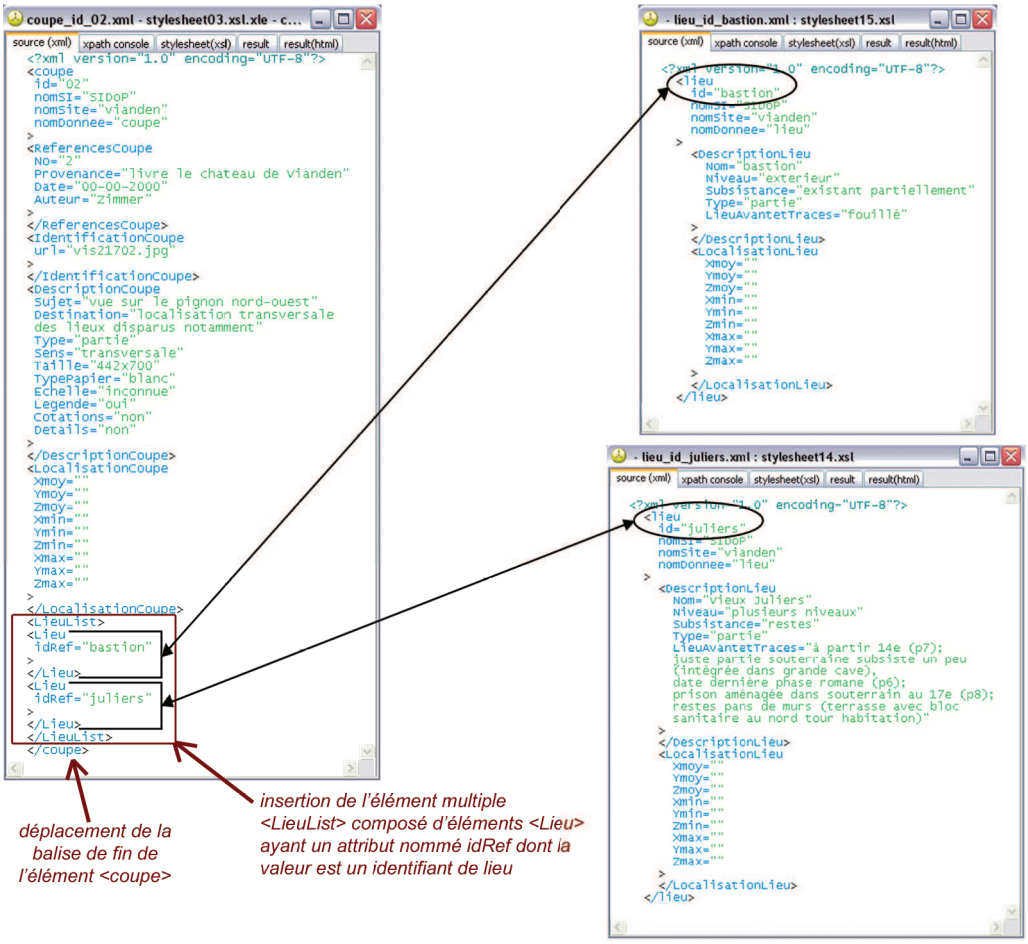


FIG. 8.2 – Formalisation en XML du principe de liaison des différents types de données

ment entrer le nom du nœud qu'il comprend, qui lui contient l'attribut `idRef`. Dans le schéma XML, l'utilisateur n'ajoute qu'un seul sous-nœud du nom multiple. Si par la suite il souhaite dans une instance de donnée pouvoir faire référence à plusieurs données du type du nœud multiple qu'il a ajouté dans le schéma, des items sont à sa disposition dans la fenêtre de visualisation du fichier XML de la donnée mis en forme par l'analyseur PHP et la feuille de style. Nous avons en effet programmé des fonctions qui permettent de dupliquer le nœud compris dans le nœud multiple (*période* sur la Figure 8.3), d'ajouter un nœud de même type ou de supprimer un de ces nœuds. Ces fonctions modifient le fichier XML de l'instance de donnée directement, sans changer la structure de toutes les données de même type que cette instance. Cette possibilité est nécessaire car deux documents ne font pas obligatoirement référence au même nombre de lieux ou de périodes par exemple.
Cet ajout de références à d'autres données dans un schéma XML doit être répercuté dans la base de données MySQL, de sorte à pouvoir écrire des requêtes en SQL pour

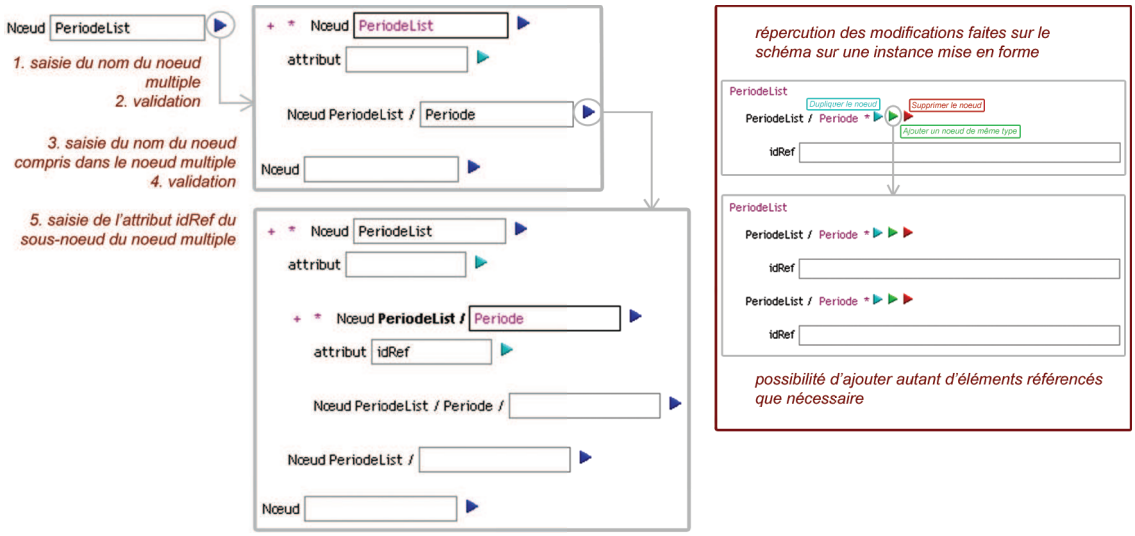


FIG. 8.3 – Procédure d'ajout dans un schéma XML d'un élément multiple permettant de lier des données

retrouver une donnée par rapport à une autre. MySQL est un SGBD relationnel dont la structure repose sur les relations qui peuvent exister entre différentes tables. Dès lors qu'une relation est multiple, c'est-à-dire qu'elle ne lie pas juste une instance de donnée à une autre, il faut créer une table de liaison entre les tables des données concernées. Ainsi, le fait par exemple de rajouter dans le schéma XML d'une donnée de type *coupe* un élément multiple du type `LieuList`, entraîne la création d'une nouvelle table nommée nomsite_coupe_lieulist. Cette table est alors composée de trois champs : l'identifiant de la *coupe*, l'ordre de saisie des lieux référencés et l'identifiant du lieu.
Ceci est illustré sur la Figure 8.4, qui montre que la donnée *coupe 02* fait référence au total à quatre lieux du château de Vianden, et qui illustre les conséquences de ces références sur les tables de la base de donnée MySQL. Une nouvelle table nommée vianden_coupe_lieulist a donc été créée, grâce au pont XML/MySQL programmé, dès lors que l'on a ajouté le nœud multiple `LieuList` dans le schéma XML des *coupes* enregistrées pour le site de Vianden. Comme le montre la Figure 8.4, cette table comprend les liaisons qui peuvent exister entre chaque *coupe* et chaque *lieu*, ces liaisons étant basées sur les identifiants de ces données. Cette nouvelle table permet donc de relier les tables vianden_coupe et vianden_lieu par l'intermédiaire de leur champ id, qui est la clé primaire de chaque table de type nomsite_nomdonnee. La table de liaison de type nomsite_nomdonnee_nomdonneerefenceelist n'a pas de clé primaire.
La procédure illustrée ici est réalisable pour formaliser toutes les relations schématisées sur la Figure 8.1. Le principe général est d'ajouter, dans un schéma de donnée XML à partir duquel on veut faire référence à d'autres types de données, des éléments multiples de type `TypeDonneeList`. Ceci a pour conséquence d'ajouter, pour chaque élément multiple, une nouvelle table de liaison du type nomsite_nomdonnee_nomdonneerefenceelist

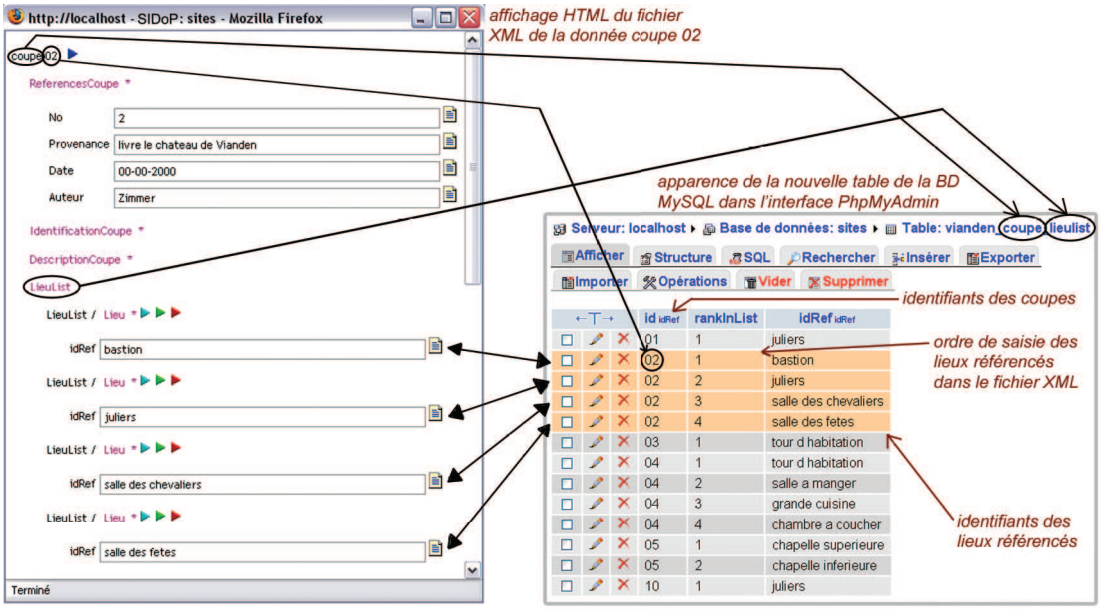


FIG. 8.4 – Correspondance entre de l'ajout de références dans un fichier XML et la création d'une table de liaison dans MySQL

dans la base de donnée MySQL. Les liaisons faites de cette manière sont bidirectionnelles, c'est-à-dire qu'il suffit de faire référence par exemple à des *lieux* dans un fichier XML d'un document, pour qu'à partir des *lieux* il soit également possible de d'accéder à tous les documents qui y font référence. Ce sont des requêtes que nous avons écrites en SQL sur les tables de liaisons de la base de données MySQL qui permettent de retrouver à la fois les données référencées par une donnée et celles qui font référence à cette donnée. Elles se basent sur les champs id et idRef des tables de liaisons. Nous verrons dans la section suivante de quelle manière l'utilisateur peut accéder aux données reliées à une autre donnée grâce aux requêtes programmées.

Pour finir cette partie sur les liaisons entre les données, nous avons constaté qu'il peut également être intéressant de pouvoir formaliser une relation d'inclusion entre des données. En effet, lorsque nous avons réalisé les liaisons entre les documents ou les objets et les lieux d'intérêt du site de Vianden, nous avons mis en évidence le besoin d'affiner la définition des lieux que nous avions désignés (cf. Annexe A). Par exemple, nous avons déterminé un lieu appelé "basse-cour" qui comprend les ruines du village qui était accolé au château depuis l'an 1100 environ. Lors de l'examen des plans et autres documents sur ce lieu, nous avons constaté que le fait de faire référence au *lieu basse-cour* dans sa globalité n'était pas assez pertinent par rapport à ce qui était effectivement représenté sur certains documents. En effet, un certain nombre de documents se consacrent exclusivement à une partie précise de cette cour, et il est donc intéressant de pouvoir également enregistrer la partie de la cour en question en tant que lieu d'intérêt

pour pouvoir affiner les références. Nous avons donc décidé de rajouter dans le SI une donnée de type *souslieu* qui hérite totalement de la donnée *lieu* et qui en fait partie. Cet héritage signifie que la donnée de type *souslieu* a exactement les mêmes attributs et les mêmes propriétés que la donnée de type *lieu*.
Pour créer le schéma XML des données de type *souslieu*, nous avons utilisé la fonction de "création d'un type de donnée hérité d'un autre type" que nous avons décrite au 2.(B) du paragraphe 7.3.2. Ainsi, la structure du schéma XML des données de type *souslieu* est la même que celle des données de type *lieu*, sauf un nœud que nous avons rajouté pour signifier l'inclusion du *souslieu* dans un *lieu*. Nous avons appelé ce nœud `lieu`, il a un attribut nommé `idLieu` dont la valeur est le nom du *lieu* dont le *souslieu* fait partie. Ceci nous a permis de programmer le fait que dans l'affichage HTML d'une instance de donnée de type *souslieu*, ce nœud soit agrémenté automatiquement d'un item permettant un accès direct au fichier XML de la donnée *lieu* dans laquelle le *souslieu* est inclus (Figure 8.5). Ce rajout dans la structure du schéma XML de chaque

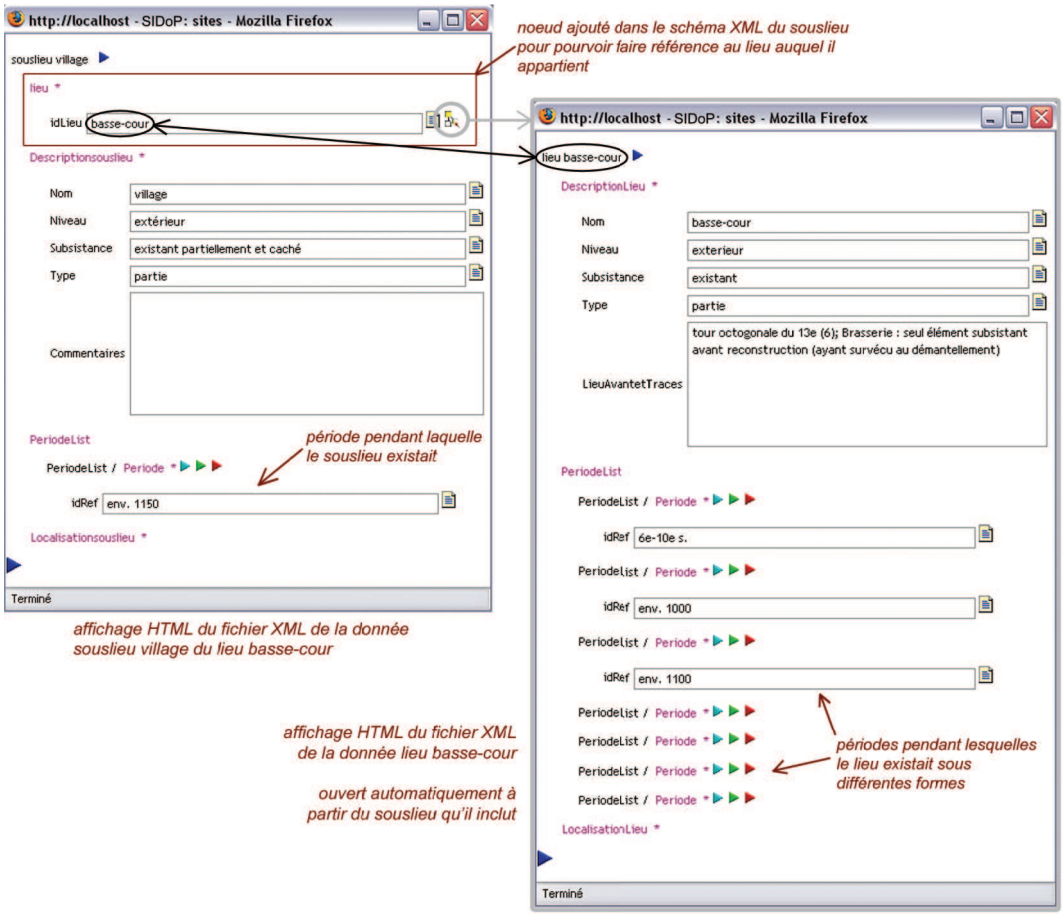


FIG. 8.5 – Mise en évidence de la relation d'inclusion entre les données de types *souslieu* et *lieu*. Cas du *souslieu village* du *lieu basse-cour* du site de Vianden

souslieu permet de lier le *lieu* et son ou ses *souslieux* de la même manière que l'élément multiple décrit précédemment permet de relier différents types de données. La différence est que dans ce cas il n'est pas nécessaire d'utiliser la structure d'élément multiple, car un *souslieu* ne peut pas faire partie de plusieurs *lieux*. Les cardinalités de la relation bidirectionnelle entre *lieu* et *souslieu* sont donc les suivantes :

- 0 à *n souslieux* font partie de 1 et 1 seul *lieu* ;
- 1 *lieu* comprend 0 à *n souslieux* ;

Au niveau de la base de données MySQL, la relation entre *lieux* et *souslieux* ne se traduit donc pas par la création d'une nouvelle table de liaison. C'est à partir du champ idLieu, qui est créé automatiquement à partir du schéma XML du *souslieu* dans la table nomsite_souslieu, que le *lieu* "père" est retrouvé par son identifiant grâce une requête SQL faite sur ce champ. Ceci est un autre principe de la création de relations entre deux tables d'un SGBD relationnel : si une relation a une de ses cardinalités à 1 (1 et 1 seul), alors il suffit de mettre l'identifiant de la donnée du côté de laquelle est cette cardinalité (*lieu*) dans la table de l'autre donnée (*souslieu*) pour réaliser la liaison entre les tables.
Nous avons formalisé cette relation d'inclusion entre des données pour les *lieux* par la création d'une nouvelle donnée de type *souslieu*. De la même manière, il est possible de définir une nouvelle donnée de type *souspériode* incluse dans les données de type *période*. Ceci peut permettre d'affiner également la définition des périodes historiques du site. Le principe pour tout type de donnée est d'inclure l'élément XML suivant dans le schéma de la donnée incluse :

```
<TypeDonneeMere
idTypeDonneeMere=""
>
</TypeDonneeMere>
```

0n peut donc imaginer également conserver un fragment d'une poterie par exemple en tant que *sousobjet* de l'objet *poterie* initial. En effet, les fonctions permettant de réaliser des inclusions étant écrites de manière générique, elle fonctionnent pour tout type de données, l'essentiel étant de modifier la structure du schéma XML de la donnée en accord avec les explications précédentes.

Nous avons donc défini différentes relations entre les types de données gérés par notre Système d'Information, principalement des relations de référencement et d'inclusion. Ces liaisons sont formalisées en XML dans les schémas des types de données, et se répercutent dans la base de données MySQL par la création de tables de liaisons ou par l'inclusion d'identifiants d'une table étrangère. Les aspects spatiaux et temporels de l'archéologie régissent la plupart des liaisons qui existent entre les documents et les objets archéologiques du site étudié, mais il est également possible de lier plusieurs documents, ainsi que des documents et des objets. De même, la relation d'inclusion que nous avons définie s'applique principalement aux données spatiales et temporelles, mais comme nous l'avons souligné, il est imaginable de la réaliser également pour les autres types de données.

Nous pouvons désormais aborder la partie sur les traitements thématiques permis par le Système d'Information que nous proposons, ces traitements se basant principalement sur les liaisons entre données qui permettent une gestion efficace et commune de toutes ces informations.

8.2 Traitements thématiques

Tout Système d'Information présente des aspects thématiques et interactifs (cf. paragraphe suivant) qui permettent une multiplicité des possibilités de requêtes sur les données enregistrées. Nous présentons dans ce paragraphe les outils thématiques de gestion des données dont nous avons doté notre SI. Les outils et interfaces proposés ne sont que des exemples, nous ne prétendons pas qu'ils sont les seuls possibles et qu'ils ont été réalisés de la manière la plus optimale. Nous souhaitons uniquement illustrer ce qu'il est possible de faire, notamment au niveau des outils de recherche de données, qui font par ailleurs l'objet de recherches très approfondies qui ne sont pas notre propos dans ce mémoire.

8.2.1 Listes

Le premier besoin de gestion thématique des données que nous avons détecté lorsqu'un nombre important de données de types différents a été enregistré, a été la nécessité d'accéder de manière dirigée à ces données. En effet, les types de données gérés et gérables par le SI sont nombreux et divers, et il n'est donc pas pertinent de proposer un accès à toutes ces données par l'intermédiaire d'un simple listing les présentant toutes. Nous proposons donc un accès thématique aux données par l'intermédiaire des quatre grandes catégories de données que nous avons définies : *lieu*, *période*, "document" et "objet archéologique". Ainsi, l'utilisateur visualise directement ces catégories de données et peut choisir s'il souhaite accéder à la liste des lieux remarquables du site, à la liste des périodes importantes de l'histoire de celui-ci, ou s'il préfère visualiser les documents ou les objets qui ont été réalisés ou trouvés sur le site. S'il choisit de consulter les documents conservés, nous lui proposons alors la liste des types de documents enregistrés dans la base de données. Cette liste se complète automatiquement dès lors qu'un nouveau type de donnée de la catégorie "document" est créé, car elle est écrite par l'intermédiaire d'une requête sur la base de données MySQL qui récupère les noms de tous les types de données appartenant à cette catégorie (*carte*, *coupe*, *dessin*, *photographie*, *plan*, *imagevirtuelle*, *texte*...). L'utilisateur choisit alors le type de document auquel il souhaite accéder, ce choix entraînant l'exécution d'une requête qui crée la liste de toutes les instances des données de ce type. La procédure est la même pour les objets archéologiques (*arme*, *bijou*, *poterie*, *fragments*...).
La mise en forme des listes de données est réalisée en PHP, l'apparence étant ici encore

régie par une feuille de style CSS. Cette mise en forme comprend :

- un item permettant d'accéder aux métadonnées (voir Figure 7.13) pour les visualiser ou les modifier (pour un utilisateur autorisé) ;
- un item permettant de voir la liste de toutes les données liées à celle que l'on a choisi : le clic sur cet item entraîne l'exécution de requêtes SQL sur les tables de liaison associées à la donnée qui permettent de retrouver toutes les données qui y font référence ou qui sont référencées par elle ;
- un item permettant de voir les sous-données de la donnée s'il y en a : le choix de cet item exécute une requête sur les tables de type nomsite_sousnomdonnee, qui récupère toutes les instances dont la donnée "mère" est celle que l'on a choisi ;
  et/ou
  un item permettant d'ouvrir la donnée si cela s'applique : par exemple pour les données .EXE ou les données .DOC stockées, l'item permettant leur ouverture est automatiquement affiché à partir du moment où la donnée stockée et la donnée enregistrée portent le même nom ;
- un item permettant de renommer la donnée : ce choix exécute la fonction de renommage expliquée au (B) du paragraphe 7.4, il n'est accessible qu'aux utilisateurs autorisés ;
- un item permettant de dupliquer la donnée : ce choix exécute la fonction de duplication expliquée au (C) du paragraphe 7.4, il n'est accessible qu'aux utilisateurs autorisés ;
- un item permettant de supprimer la donnée : ce choix exécute la fonction de suppression expliquée au (F) du paragraphe 7.4, il n'est accessible qu'aux utilisateurs autorisés ;
- le nom de la donnée sous la forme *typedonnee identifiant* (par exemple *coupe 02* dans nos exemples précédents) ;
- dans le cas d'un document dont la forme numérique aurait été stockée, la vignette présentant l'image de la donnée : une requête est exécutée sur la table de la donnée pour récupérer le nom de l'image stockée dans le champ url et l'afficher avec une taille que nous avons déterminée comme faisant 10% de la taille du navigateur.

Les différentes listes de données résultant du choix de l'un de ces items sont mises en forme de la même manière, par exemple la liste des données liées.

La Figure 8.6 présente l'interface du SI pour le site de Vianden, où l'utilisateur a choisi de voir la liste des lieux remarquables de ce site. On y voit les menus permettant d'accéder aux données : la partie du haut est un menu commun pour tous les utilisateurs et le menu d'administration en bas est réservé aux utilisateurs autorisés. On y voit également les items présentés ci-dessus et les résultats du choix de visualisation des données liées au *lieu basse-cour* et du choix de visualisation des *souslieux* du *lieu basse-cour*.

La Figure 8.7 présente l'interface du SI pour le site d'Echternach, où l'utilisateur a choisi de voir la liste des documents de type textuel rassemblés sur le site. On y voit le menu commun permettant d'accéder aux données, avec la catégorie document qui est

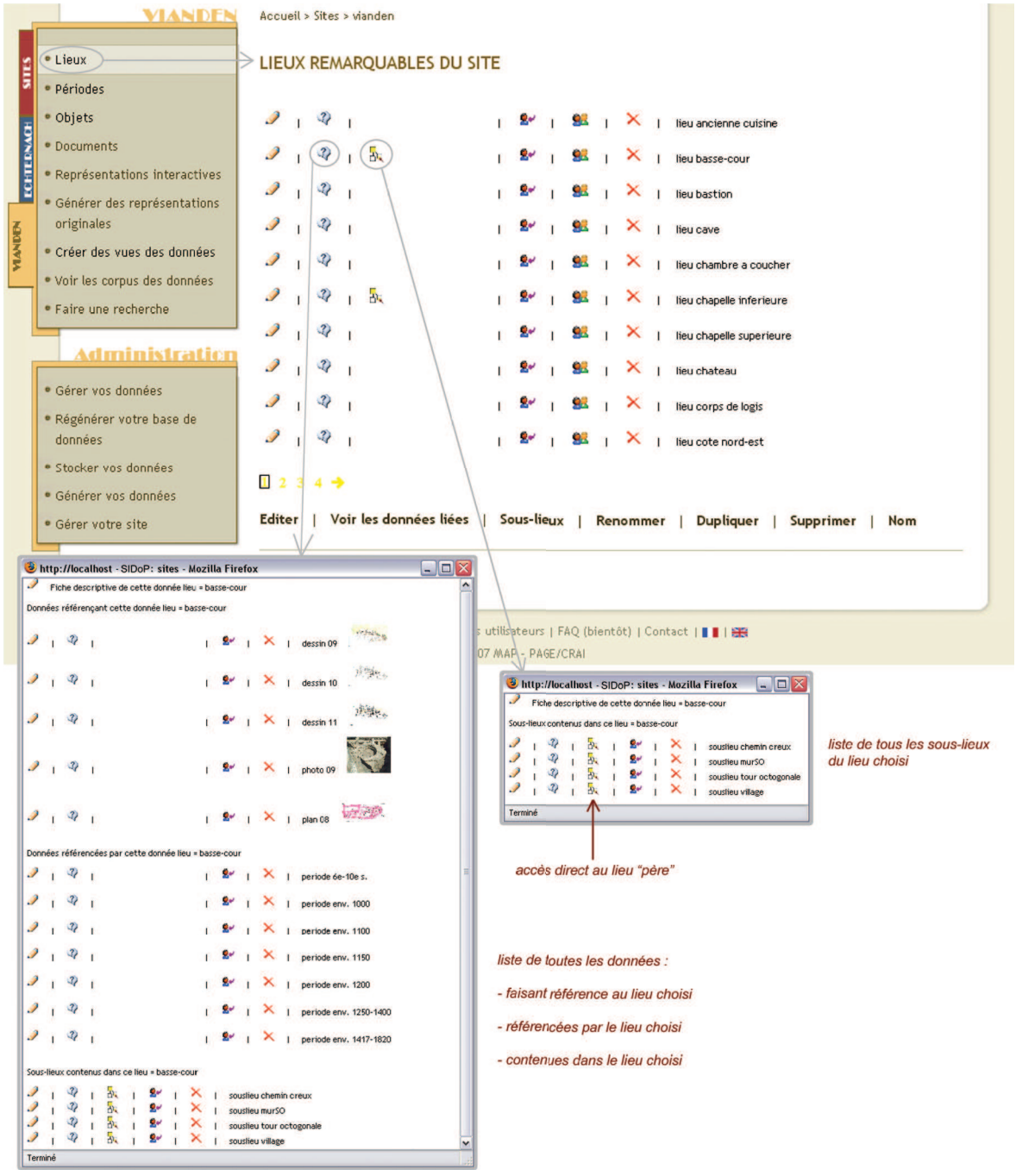


FIG. 8.6 – Interface du SI pour le site de Vianden présentant la liste des lieux remarquables de ce site et les données liées à une instance

développée pour permettre l'accès aux différents types de données de cette catégorie

qui sont actuellement enregistrés dans le SI (*dessin*, *imagevirtuelle*, *panorama*, *photo*, *plan* et *texte*). Comme sur la figure précédente, on y voit également les items présentés ci-dessus et le résultat du choix de l'ouverture d'un document textuel nommé *article-chalons.doc*. Ce document Word ayant préalablement été stocké sur le serveur Web, si l'on identifie la donnée textuelle avec le même nom que le document stocké, c'est-à-dire *texte article-chalons*, alors l'item d'ouverture apparaît automatiquement.

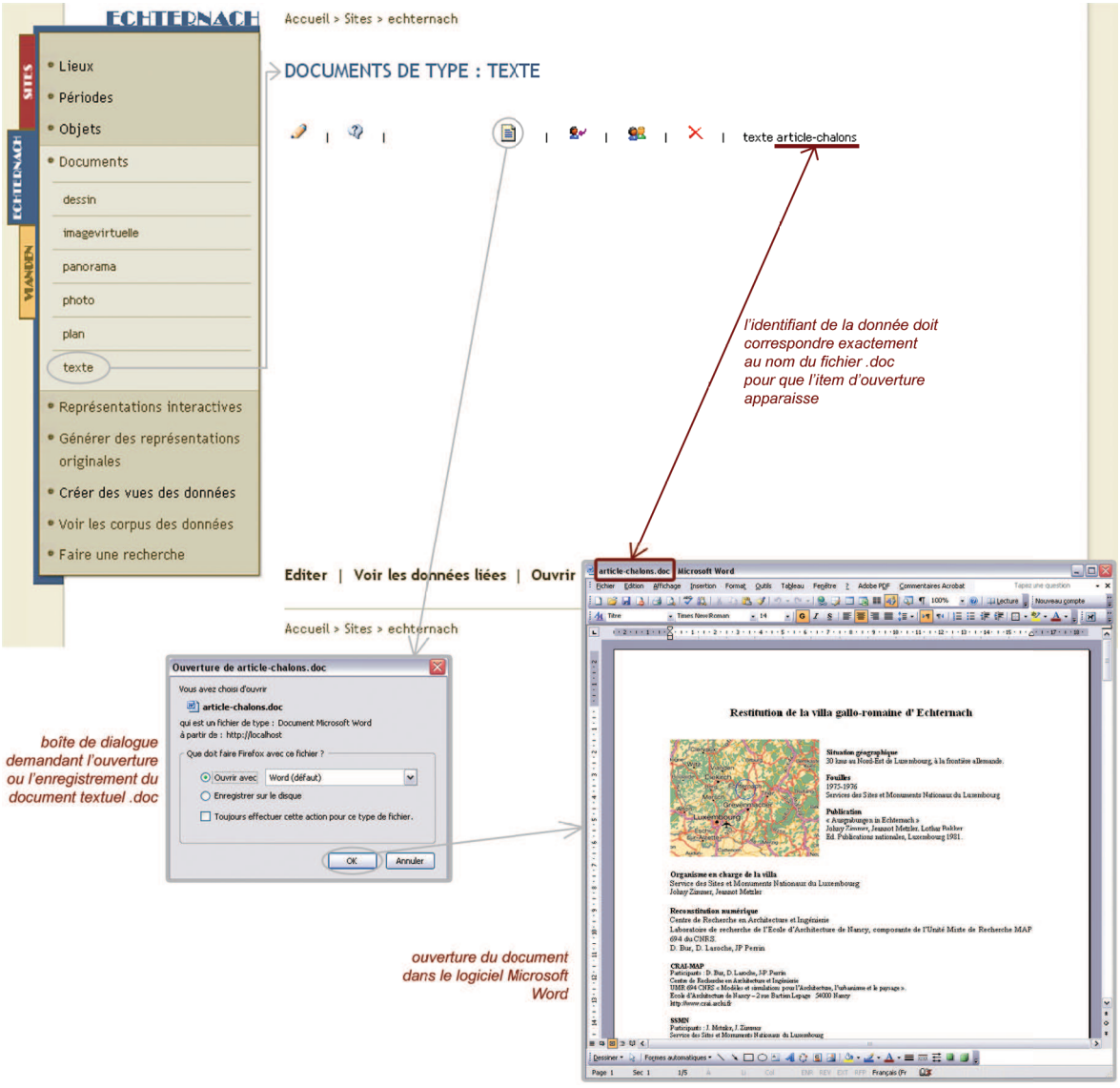


FIG. 8.7 – Interface du SI pour le site d'Echternach présentant la liste des textes enregistrés et l'ouverture d'un fichier .doc stocké

Le premier type de traitement thématique possible dans le SI est donc la gestion des données à partir de listes par catégories de celles-ci. Ces listes permettent une visualisation rapide de tous les types de données conservés et de toutes les instances de données de ces types. Elles sont ensuite la base à partir de laquelle l'utilisateur peut réviser les données enregistrées, mais également voir et manipuler toutes les autres données qui sont en liaison avec l'instance choisie. Nous avons détaillé précédemment toutes les liaisons réalisées et possibles entre les différents types de données, et le fait de permettre à l'utilisateur d'accéder facilement aux données liées à une donnée particulière permet des gestions croisées et efficaces des données. Par exemple, si l'on modifie certaines propriétés d'une donnée, le fait de pouvoir accéder directement à partir de cette donnée à toutes les données qui y sont liées peut permettre simplement de modifier en conséquence ces autres données. Par ailleurs, comme nous traitons de données documentaires, le fait de voir rapidement à partir d'un lieu combien de documents y font référence, peut permettre de constater quelles parties du site sont moins bien documentées que d'autres, et d'en conclure par exemple les endroits à fouiller en priorité lors d'une prochaine campagne de fouilles.

En dehors des listings présentés, nous proposons également différents outils de recherche dans la base de données pour permettre à l'utilisateur de retrouver facilement les informations qui l'intéressent.

8.2.2 Recherches

Pour effectuer des recherches sur les données enregistrées dans le Système d'Information, nous proposons trois outils qui effectuent des requêtes sur la base de données MySQL. En effet, comme nous l'avons indiqué précédemment, nous avons choisi d'enregistrer les données à la fois en tant que fichiers XML pour le côté standard de ce langage et dans une base de données MySQL pour profiter de la puissance des requêtes qui peuvent être écrites en SQL pour retrouver de manière combinée toutes sortes de données enregistrées dans les tables de ce genre de base de données. Les trois outils que nous proposons sont les suivants : recherche par type de donnée, recherche par mots-clés et recherche par images.

8.2.2.1 Recherche par type de donnée

Ce moteur de recherche a été programmé de sorte que l'on puisse retrouver des données type par type en remplissant les champs d'un formulaire créé à partir du schéma XML du type de donnée. Nous proposons donc à l'utilisateur de choisir le type de donnée sur lequel il souhaite faire une requête, ce choix entraînant l'ouverture d'un formulaire vide montrant la structure du schéma XML du type de donnée choisi.

Ce formulaire est créé par l'intermédiaire d'un parseur PHP (qui avait été programmé dans le cadre du projet ISA-PX) qui permet d'analyser le *template* XML et d'une feuille de style CSS. Il est composé des nœuds et des attributs présents dans le schéma et propose des cases vides à côté de tous les attributs, dans lesquelles l'utilisateur saisit les valeurs d'attributs à partir desquelles il souhaite faire sa recherche. Etant donné que le schéma XML du type de donnée comprend également les nœuds multiples permettant de faire référence à d'autres données, la recherche peut aussi se faire sur ces critères, pour retrouver tous les *lieux* qui existaient pendant une même *période* par exemple.
Pour aider l'utilisateur dans sa requête, nous lui proposons d'accéder au corpus de toutes les valeurs de l'attribut sur lequel il souhaite faire la recherche. En effet, ce moteur de recherche ne se base pas sur des mots-clés (contrairement au deuxième que nous allons présenter dans la suite) mais sur les valeurs exactes des attributs qui ont été saisies lors de l'enregistrement des métadonnées. Ainsi, si l'on ne propose pas à l'utilisateur de sélectionner ces valeurs exactes dans une liste, il peut lui être difficile de les écrire de mémoire. Le corpus de toutes les valeurs de l'attribut est créé par une requête qui récupère dans la table du type de donnée, toutes les valeurs du champ correspondant à l'attribut. Ainsi, l'utilisateur sélectionne dans le corpus la ou les valeurs de l'attribut qui l'intéressent, et elles s'écrivent alors automatiquement dans la case du formulaire. S'il sélectionne plusieurs valeurs, celles-ci se combinent avec le mot "ou". L'utilisateur réalise ces sélections de valeurs pour tous les attributs sur lesquels il veut faire la recherche, et a ensuite le choix de combiner les valeurs des différents attributs avec "et" ou "ou", suivant qu'il décide que la donnée recherchée doit additionner les critères ou correspondre aux uns ou aux autres.
Une fois que tous les critères sont écrits ou sélectionnés, l'utilisateur exécute la requête. Celle-ci va chercher dans la table nomsite_nomdonnee pour les champs correspondant aux attributs auxquels l'utilisateur a donné des valeurs, les tuples dont les valeurs de champ correspondent aux mots ou aux phrases données par l'utilisateur dans les cases du formulaire. Cette recherche se fait sur tous les mots donnés, dans l'ordre exact, chaque champ de la table étant de type "chaîne de caractère" comme nous l'avons déjà indiqué. Le résultat est la liste des données du type choisi répondant aux critères. Cette liste a la même mise en forme que les listes de données présentées ci-dessus : elle permet donc de visualiser la donnée par une vignette (si cela s'applique), d'accéder aux fonctions de visualisation des métadonnées et de révision de la donnée, mais également de demander directement la liste des données liées à cette donnée.
La Figure 8.8 illustre le fonctionnement de cet outil avec la recherche de données de type *dessin* sur le site de Vianden.

8.2.2.2 Recherche par mots-clés

Contrairement à l'outil présenté précédemment, l'outil de recherche par mots-clés que nous proposons n'est pas basé sur le schéma XML des types de données. Il ne fonctionne pas non plus sur des phrases exactes correspondant aux valeurs d'attributs de la

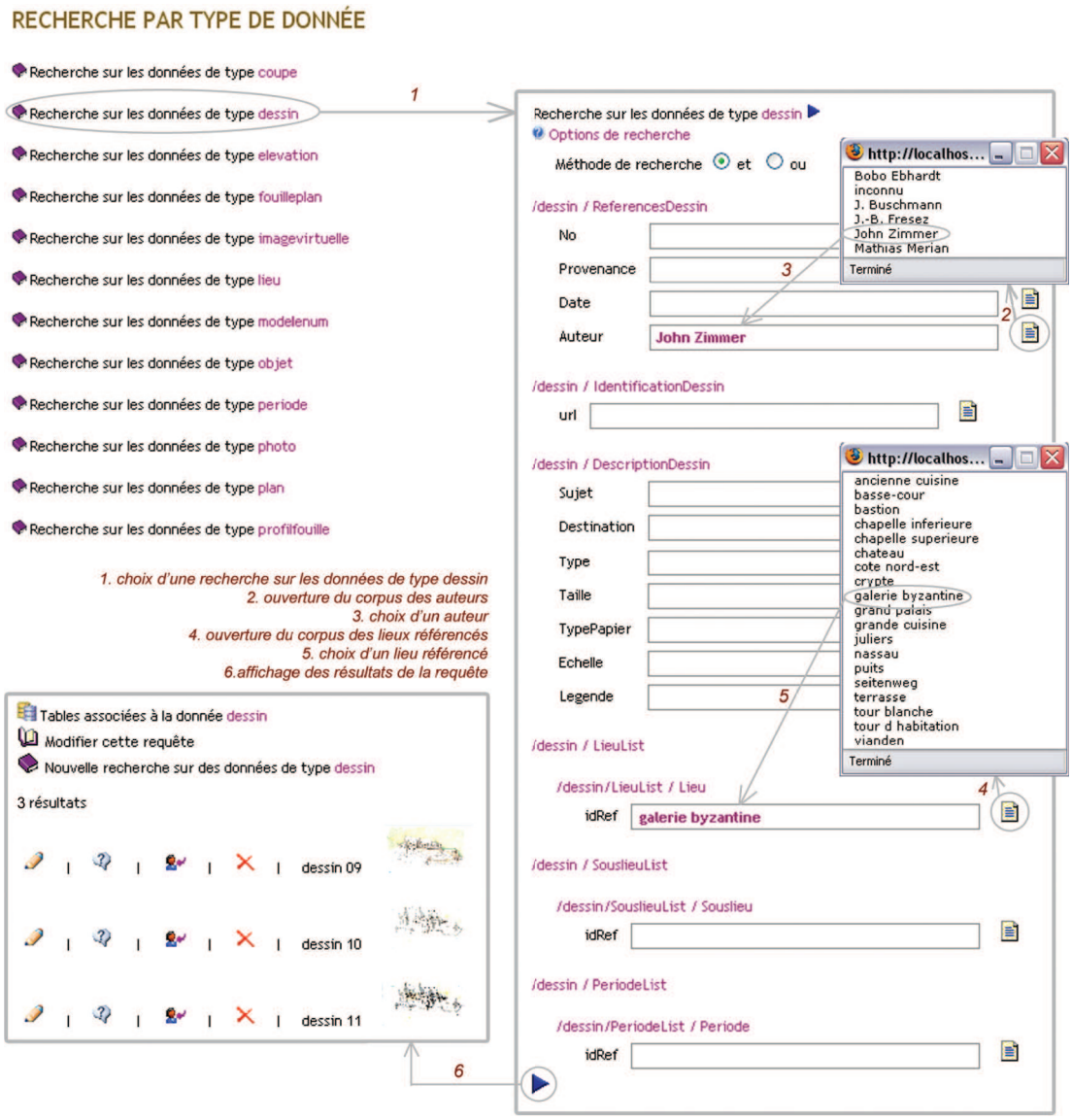


FIG. 8.8 – Procédure de recherche par type de donnée

donnée mais, comme son nom l'indique, sur des mots-clés que l'on propose à l'utilisateur. Nous avons programmé un formulaire multi-critères permettant à l'utilisateur de faire une "recherche dirigée" dans les données. En effet, la programmation d'un moteur de recherche par mots-clés fonctionnant à partir de mots quelconques donnés librement par l'utilisateur est complexe, et notre travail ne reposait pas sur la création de moteurs de recherches perfectionnés. Nous n'avons donc pas approfondi nos recherches dans ce domaine, mais il nous semblait malgré tout intéressant de proposer un outil de recherche par mots-clés à l'utilisateur, même si ces mots-clés lui sont proposés et qu'il ne les choisit

pas librement.
Ainsi, nous avons programmé cet outil de sorte à proposer à l'utilisateur des mots-clés dans différentes catégories. Il peut tout d'abord choisir de faire une recherche sur tous les types de données, ou sur un seul en particulier. Les types de données concernés ici ne sont que les types de la catégorie "document" pour le moment. En effet, comme nous l'avons discuté précédemment, nous avons veillé à conserver une structure de métadonnées plus ou moins commune pour toutes les données documentaires. Ainsi, des informations comme la provenance ou l'auteur du document figurent dans toutes les tables de ces données. Ceci nous permet donc de proposer à l'utilisateur de faire une recherche parmi toutes les données documentaires sur ces critères de provenance et d'auteur, ce qui ne s'applique pas aux autres types de données (*lieu*, *période*, objet archéologique).
L'utilisateur choisit donc tout d'abord parmi les données documentaires celles qui sont concernées par sa recherche. Nous lui proposons également de choisir une provenance pour les données recherchées. La liste des provenances dans laquelle il choisit est générée par une requête sur les champs correspondant à l'attribut "Provenance" des fichiers XML (cf. Figure 7.7) dans les tables des types de données choisis par l'utilisateur. De la même manière, nous lui proposons de choisir parmi une liste d'auteurs, celui qui correspond à leur recherche. La requête permettant la création de la liste des auteurs est la même que pour les provenances, mais elle récupère les données des champs correspondant à l'attribut "Auteur" des fichiers XML. Puis, nous lui proposons une liste de mots-clés que nous avons estimés pertinents à l'examen de toutes les métadonnées enregistrées sur les données. Cette liste de mots-clés a pour le moment été créée manuellement, nous envisageons par la suite d'étudier la possibilité d'une automatisation de la génération de cette liste. L'utilisateur peut alors choisir dans cette liste un ou plusieurs mots-clés qui correspondent à ses critères de recherche. Il peut combiner les mots-clés choisis avec "et" ou "ou".
Une fois que l'utilisateur a sélectionné des critères pour une ou plusieurs des quatre catégories que nous lui proposons (type de donnée documentaire, provenance, auteur, mots-clés), il exécute la recherche en choisissant de combiner les critères avec "et" ou "ou". Les différentes requêtes suivant les catégories sont alors exécutées sur les tables de la base de données, et combinées suivant le choix de l'utilisateur. Pour la première catégorie, le choix de rechercher sur toutes les données ou uniquement sur un type détermine sur quelles tables les requêtes vont être exécutées. Pour la provenance et l'auteur, les requêtes sont les mêmes que celles présentées précédemment pour le premier outil, c'est-à-dire que l'on cherche dans les valeurs des champs des tables choisies, celles qui correspondent exactement à la sélection faite par l'utilisateur dans les listes qui lui ont été proposées. Par contre, la recherche des mots-clés se fait sur la base de mots ou de parties de mots (et non de phrases exactes) dans tous les champs de toutes les tables, grâce à la possibilité offerte par SQL de réaliser des "recherches en texte intégral" (*full-text*). Cette possibilité permet de rechercher dans les valeurs des champs, des mots plus ou moins proches de ceux choisis par l'utilisateur. Par exemple, si l'utilisateur choisit dans la liste qui lui est proposée le mot-clé "reconstitution", nous avons programmé une requête *fulltext* qui va chercher à l'intérieur des chaînes de caractères de tous les champs,

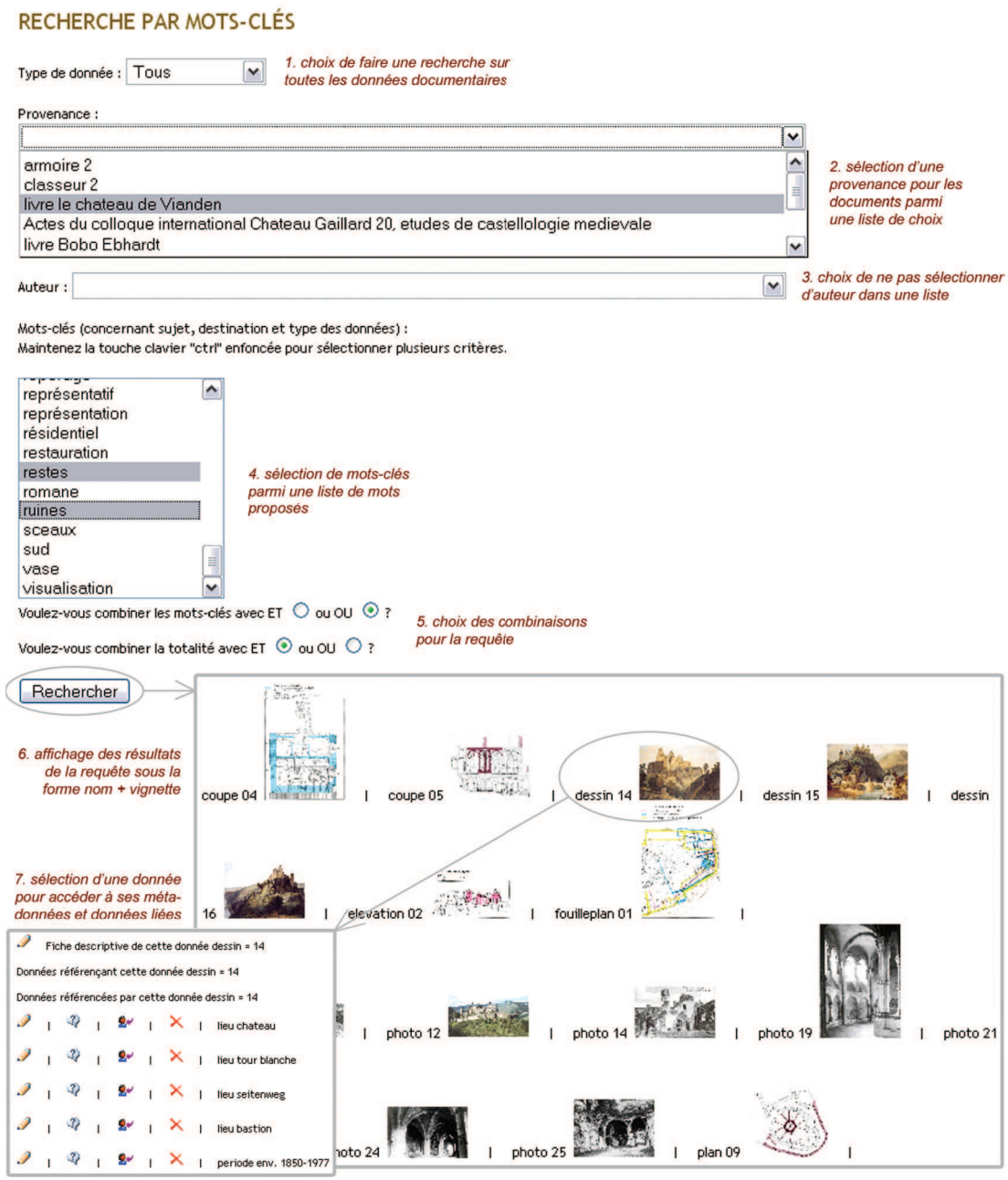


FIG. 8.9 – Procédure de recherche des données par mots-clés

les mots ayant le noyau "reconst*" en commun. Cela permet de récupérer des données dont les métadonnées comprennent le mot "reconstitution", mais également "reconstitué", "reconstruit", "reconstruction", etc. Une procédure et un résultat de l'utilisation de cet outil de recherche par mots-clés sont présentés sur la Figure 8.9.

8.2.2.3 Recherche par images

Pour finir avec les outils de recherche, nous proposons un troisième outil plus visuel. Dans ce cas, les critères de recherche ne sont pas textuels mais iconographiques. Dans ce cas également, nous ne proposons pas un outil extrêmement perfectionné de recherche par l'image. En effet, c'est un vaste sujet auquel se consacrent de nombreux chercheurs, qui prennent en compte des critères de formes, de couleurs ou autres pour retrouver des images dans des bases de données conçues à cet effet. Ce n'est pas notre propos ici, nous souhaitons uniquement proposer à l'utilisateur une vision synthétique de toutes les données enregistrées pour lesquelles un document iconographique a été stocké sur le serveur. Ainsi, cet outil de recherche porte à nouveau sur les données documentaires, qui sont les seules auxquelles est associé un document iconographique. Le fonctionnement de l'outil que nous avons programmé est le suivant :

- l'utilisateur choisit d'effectuer une recherche par images dans le menu du SI ;
- toutes les vignettes des documents apparaissent alors, ce qui donne à l'utilisateur une vision directe et synthétique de toutes les images enregistrées, et lui permet directement de cliquer sur la vignette pour accéder aux métadonnées et aux données liées ;
- un formulaire multi-critères est à sa disposition pour affiner sa recherche d'images : il peut choisir de ne visualiser que les dessins, que les photographies ou que les graphiques, cette catégorie comprenant tous les documents de types différents de *dessin* et *photo*. S'il choisit cette catégorie, nous lui proposons une liste de toutes les autres données documentaires enregistrées (cette liste est créée par une requête sur toutes les tables de la catégorie "document" sauf nomsite_dessin et nomsite_photo) ;
- si l'utilisateur sélectionne un type particulier de document, les images correspondant à ce type sont extraites et affichées à part ;
- un autre formulaire multi-critères est proposé alors pour permettre d'affiner encore le type de document recherché. En effet, la plupart des documents enregistrés ont une métadonnée baptisée `type` dans laquelle l'utilisateur indique si le document est historique ou actuel, et s'il concerne le site en général, une partie ou un détail (cf. 7.1). Le choix d'un ou plusieurs de ces critères entraîne l'exécution d'une requête dans le champ correspondant de la table concernée de la base de donnée, dont le résultat est l'affichage des vignettes des documents du type choisi correspondant à ces critères.

La Figure 8.10 montre la recherche par images d'une photographie actuelle présentant un détail du château de Vianden.

Ces trois outils de recherche permettent à tout type d'utilisateurs, du gestionnaire qui souhaite retrouver une donnée sur des critères attributaires très précis au visiteur qui souhaite avoir un aperçu rapide et visuel du site, de retrouver efficacement des données dans la masse d'informations enregistrées dans le SI. Ils participent de ce fait aux traitements thématiques que se doit de proposer un Système d'Information.

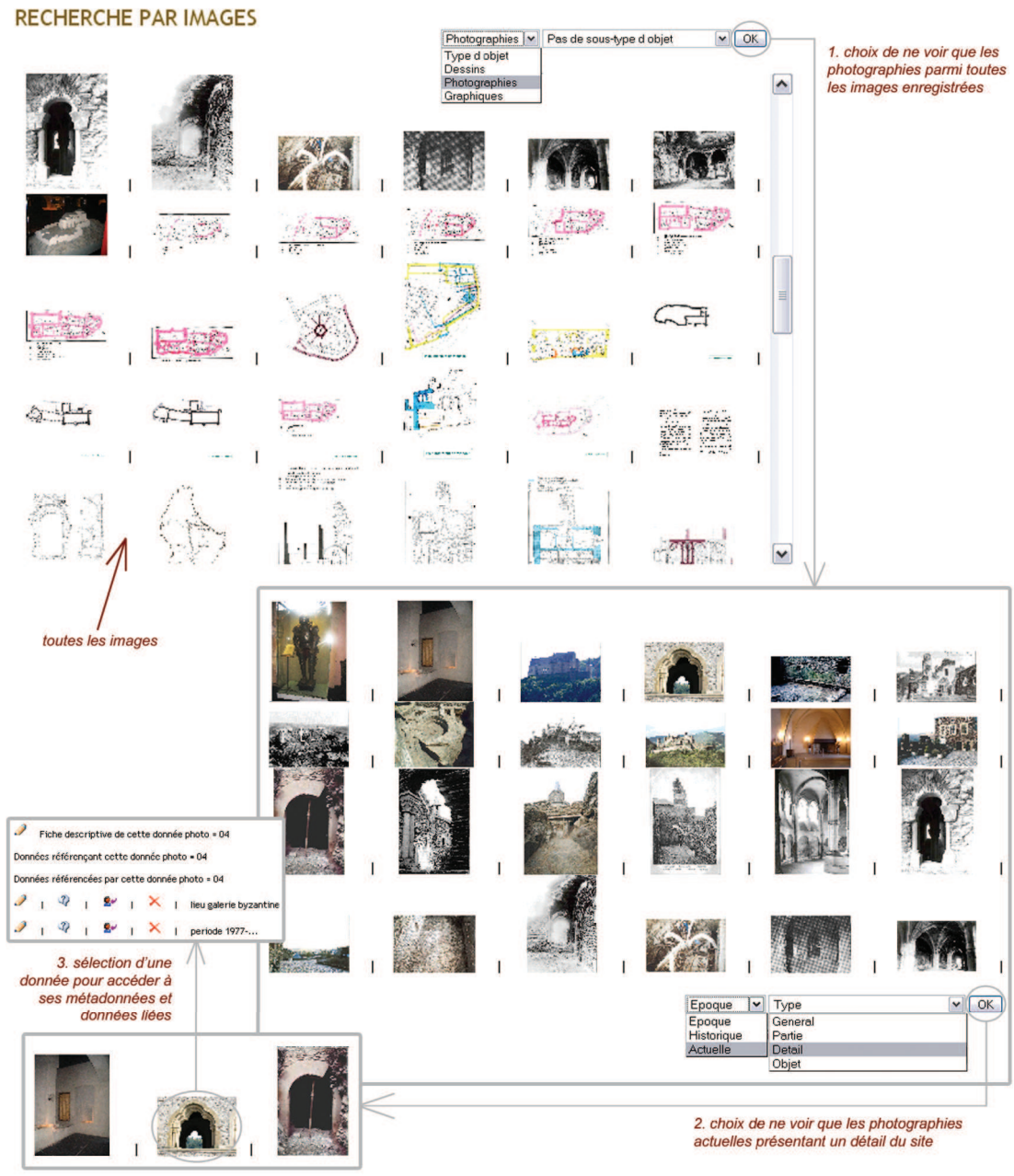


FIG. 8.10 – Procédure de recherche des données par images

Dans cette section, nous venons de présenter les outils d'accès et de gestion thématique des données que nous avons développés. Ceux-ci permettent de retrouver les données enregistrées de différentes manières et de procéder à des interrogations croisées de la base de données. Nous pouvons désormais aborder l'aspect interactif indispensable dans tout Système d'Information pour visualiser et faire des recherches sur les données par d'autres biais plus attractifs.

8.3 Traitements interactifs

Nous proposons dans cette section, deux méthodes permettant de transformer des données documentaires de types graphiques bidimensionnels (plan scanné, graphique AutoCAD®) et modèles tridimensionnels en interfaces interactives d'accès aux données conservées dans le SI. En effet, ces graphiques et modèles représentent visuellement des informations sur le site archéologique et peuvent être considérés comme des interprétations des connaissances des archéologues et des architectes. Leur réalisation a donc impliqué l'intégration d'autres données documentaires. De plus, comme nous l'avons expliqué lorsque nous avons détaillé les relations existant entre les différents types de données, celles-ci ont toujours une référence spatiale et temporelle. Les graphiques et modèles représentant des lieux du site à une période donnée, ils peuvent donc servir d'interface d'accès à la documentation archéologique concernant ces lieux et périodes. Ainsi, nous proposons de rendre interactifs des graphiques et des modèles existants pour qu'ils puissent non seulement représenter visuellement le site, mais aussi servir à retrouver toutes sortes d'informations documentaires ou de données sur les objets archéologiques. L'accès aux données n'est donc plus seulement possible sous forme de requêtes et de visualisation des résultats des requêtes (comme les traitements thématiques que nous avons présentés précédemment), mais c'est également par le graphique 2D et par le modèle 3D que des requêtes peuvent être implicitement composées suivant l'endroit choisi et suivant la période historique concernée par la représentation.

Pour nous situer par rapport aux traitements interactifs qui étaient proposés dans le système ISA-PX, comme nous l'avons déjà mentionné au Chapitre 6, nous nous situons en aval de relevé. Ainsi, alors que dans ISA-PX les données relevées par photogrammétrie sont automatiquement conservées dans la base de données et servent à concevoir directement les plans et les modèles interactifs de l'objet relevé, nous devons transformer des plans et des modèles déjà existants en interfaces d'accès à d'autres données. La problématique est donc très différente : le clic sur une pierre ou une amphore relevées dans ISA-PX donne accès à des données relatives à cet objet (paramètres de l'appareil photo, coordonnées, dimensions, photo...), alors que nous proposons de cliquer sur un lieu défini dans un plan ou un modèle existants pour accéder à toutes les données documentaires et les objets relatifs à ce lieu.
Ceci étant précisé, nous détaillons dans les prochains paragraphes la manière dont nous

avons transformé des plans scannés et des modèles 3D, que le CRAI et ArcTron avaient préalablement réalisés sur le château de Vianden, en interfaces d'accès aux autres données sur ce site. Les méthodes de transformation proposées sont "manuelles", elles nous ont permis de tester la faisabilité de notre approche sur notre terrain d'expérimentation qui a été Vianden. Elles sont désormais en cours d'automatisation par une étudiante de Master dont nous encadrons le stage. Elle travaille avec les données du site d'Echternach, ce qui a permis de valider les fonctionnalités du SI par l'intégration de données d'un autre site patrimonial. Nous donnons des précisions sur ces travaux en cours dans la suite.

8.3.1 Représentations 2D

Sur le Château de Vianden, nous n'avions aucun document numérique, en dehors des modèles 3D réalisés par le CRAI et ArcTron (dont nous parlerons dans le prochain paragraphe). Aussi, nous avons dû scanner les plans et les autres documents pour pouvoir les conserver et les gérer dans le SI. Les données d'imagerie dont nous disposons sont donc des images raster. Aussi, nous proposons une méthode permettant de transformer des images raster en graphiques interactifs pour le Web, puisque notre SI fonctionne sur la base d'un serveur Web et que l'affichage se fait par conséquent dans un navigateur Internet.

Dans un souci de cohérence avec les autres données et de standardisation pour le Web, nous avons créé ces graphiques interactifs dans le format SVG (*Scalable Vector Graphics*). En effet, SVG est un langage pour décrire des vecteurs 2D et des images mixtes vecteur/raster en XML [Geroimenko et Chen, 2005]. C'est donc un langage basé sur le métalangage XML (et qui en respecte les règles) pour la description de graphiques bidimensionnels. Ainsi, de la même manière que les feuilles de style CSS ou XSL permettent de présenter des données textuelles, SVG permet de présenter et de créer des rendus de documents XML comportant des vecteurs 2D (points et lignes).
SVG fait partie des formats standards pour le Web recommandés par le W3C[2]. Il est donc standardisé et libre d'accès et d'utilisation. Ce format permet de créer des graphiques Web de grande qualité avec une structure précise et un contrôle visuel. Le contenu étant séparé de la présentation comme dans tout document XML, la mise à jour des graphiques SVG est facilitée. Il est possible de zoomer à volonté dans ce genre de graphiques et ils sont manipulables facilement par les utilisateurs. De plus, comme ce format se base sur XML, les graphiques sont lisibles sous forme textuelle ce qui n'est pas le cas de graphiques AutoCAD® par exemple.
En SVG, tous les éléments graphiques peuvent être nommés, donc par voie de conséquence référencés dans d'autres documents XML ou SVG. Ceci confère à ce format de grands avantages pour contrôler et manipuler des éléments individuels, tandis que les langages graphiques habituels ne laissent la possibilité que de nommer des groupes

[2]page spécifique sur SVG : `http://www.w3.org/Graphics/SVG/` [réf. du 15 juin 2007]

d'objets ou des couches. Il est ainsi possible d'inclure des métadonnées sur des pièces spécifiques dans un graphique ou de lier ces pièces avec des métadonnées externes.
De plus, ce qui est le plus intéressant pour nous dans le choix de ce format est le fait que SVG permet l'interactivité par l'intermédiaire de scripts qui peuvent être écrits dans le fichier SVG ou attachés à lui. Le langage de script le plus couramment utilisé avec SVG est le langage JavaScript. Javascript est un langage de script incorporé initialement dans un document HTML. Historiquement il s'agit même du premier langage de script pour le Web. Ce langage est un langage de programmation qui permet d'apporter des améliorations au langage HTML en permettant d'exécuter des commandes du côté client, c'est-à-dire au niveau du navigateur et non du serveur Web. Ainsi, contrairement aux fonctions PHP qui s'effectuent du côté du serveur, les scripts JavaScript s'exécutent sur la machine client et n'utilisent donc pas de ressources sur le serveur. Ce langage étant très ancien et très utilisé, il est aisé d'écrire ou d'accéder à des scripts permettant d'insérer toutes sortes d'interactivités dans des pages Web écrites notamment en PHP, mais également dans des graphiques en SVG. Nous avons donc décidé d'utiliser ce langage pour insérer des éléments interactifs dans nos graphiques SVG.

Le principe des graphiques interactifs que nous avons ainsi décidé de créer en SVG se base sur la définition de "zones cliquables" sur une image raster. Pour tracer ces zones, il faut utiliser un logiciel qui permet d'ouvrir une image raster, de tracer des éléments vectoriels dessus et d'enregistrer le dessin ainsi réalisé dans le format SVG. Adobe Illustrator®, logiciel commercial de création graphique vectorielle de référence, permet de le faire et propose même d'insérer de l'interactivité dans le dessin SVG directement grâce à une interface permettant d'attacher des scripts en JavaScript aux éléments graphiques dessinés. [Geroimenko et Chen, 2005] proposent un tutoriel détaillé permettant de générer des documents SVG interactifs en utilisant uniquement Adobe Illustrator, sans devoir programmer des scripts extérieurement. Mais en accord avec notre souci de proposer un système et des méthodes se basant sur des logiciels libres, nous n'avons pas utilisé ce logiciel et cette fonctionnalité, mais le logiciel gratuit Inkscape. En effet, Inkscape est un logiciel libre d'édition de graphismes vectoriels, doté de capacités similaires à Illustrator, Freehand ou CorelDraw, utilisant le format de fichiers *Scalable Vector Graphics*, standard du W3C. Les fonctionnalités supportées du format SVG incluent les formes, les chemins, le texte, les marqueurs, les clônes, les transformations, les motifs et les groupements. Inkscape supporte également les méta-données Creative Commons, l'édition de nœuds, les couches, les opérations de chemins complexes, la vectorisation des bitmaps, le texte suivant des chemins, le texte contournant des objets, l'édition XML directe et beaucoup plus. Il peut importer des formats tels que le Postscript, EPS, JPEG, PNG et TIFF, et exporte en PNG ainsi qu'en de nombreux formats vectoriels [De Castro Guerra, 2007]. Le but principal d'Inkscape, développé depuis 2003, est de créer un outil de dessin puissant et simple d'utilisation, totalement conforme aux standards XML, SVG et CSS. L'objectif est également de maintenir une communauté d'utilisateurs et de développeurs grandissante en utilisant un procédé de développement à la fois ouvert et orienté vers la communauté, de sorte qu'Inkscape soit aussi simple

à apprendre, à utiliser et à étendre que possible[3]. C'est un logiciel multi-plateformes disponible notamment sous Microsoft Windows, Mac OS X, Linux et FreeBSD. Ainsi, le fait que ce logiciel soit libre et basé sur SVG nous a amené à le privilégier par rapport à Adobe Illustrator. De plus, des fonctionnalités d'animation des objets vectoriels et d'interactivité devraient y être intégrées prochainement, ce logiciel se développant activement depuis son démarrage. Pour le moment ces fonctionnalités n'existant pas, nous avons simplement utilisé Inkscape pour tracer des zones sur l'image, et nous avons écrit les scripts à part.

La première étape pour la création d'un graphique interactif est donc le tracé de zones d'intérêt sur une image que l'on souhaite transformer en graphique SVG. Nous avons défini ces zones selon les lieux remarquables du site que nous avons enregistrés dans la base de données (cf. Figure 8.6). Après avoir importé l'image de fond, le tracé de ces zones se fait très simplement à l'aide de la fonction de tracé de polygones du logiciel Inkscape. Il faut veiller à ce que les polygones soient fermés pour qu'ils définissent une surface sur laquelle il sera ensuite possible de cliquer. Puis, il faut donner un nom au polygone tracé pour pouvoir l'identifier ensuite dans le document SVG. Une fois que toutes les zones ont été tracées, on enregistre le graphique dans le format .SVG. Cette procédure est illustrée sur la Figure 8.11.

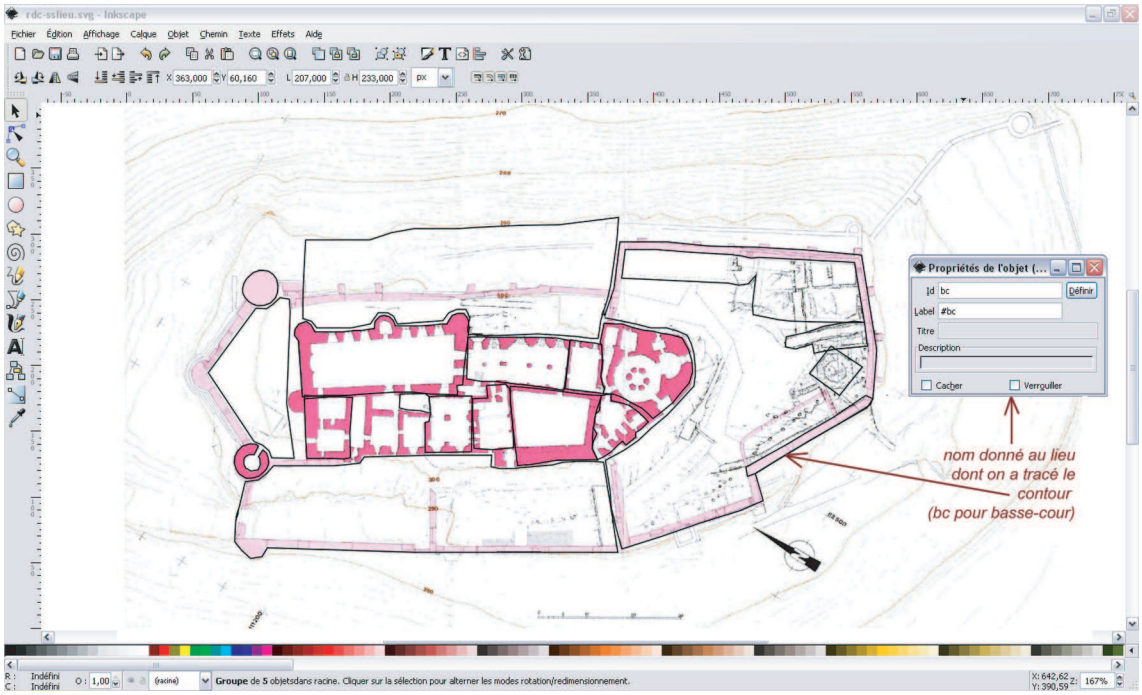


FIG. 8.11 – Définition de zones spatiales sur un plan raster du site de Vianden

[3] `http://www.inkscape.org/` [réf. du 15 juin 2007]

Elle représente un plan de masse du château de Vianden que nous avons scanné et sur lequel nous avons tracé et nommé des zones correspondant aux lieux du château. Si on souhaite définir des sous-lieux dans un lieu, il suffit d'imbriquer les polygones représentant les sous-lieux dans le polygone du lieu et de les grouper (cas du *lieu basse-cour* représenté sur la Figure).
Le fichier .SVG résultant peut alors être ouvert dans un éditeur XML. Les lieux définis graphiquement sont repérables par l'attribut `id=""`. Il est alors possible d'extraire du fichier SVG toutes les géométries des polygones définis. Ces géométries se présentent sous la forme décrite sur la Figure 8.12, qui montre le polygone tracé pour le *lieu basse-cour* que nous avons nommé "bc" dans Inkscape.

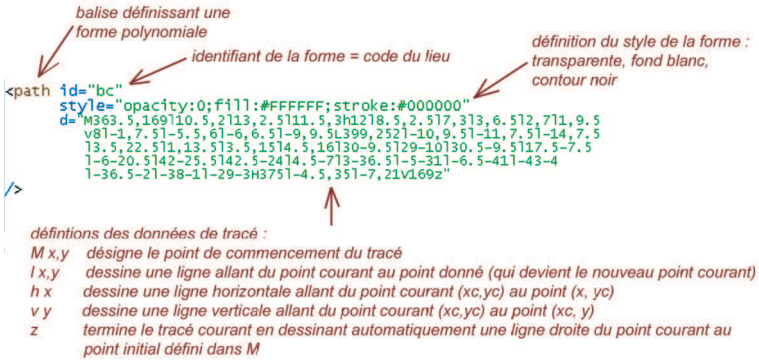


FIG. 8.12 – Géométrie d'un polygone en SVG

Pour que les polygones définis ainsi soient affichés sur l'image exactement à la place où on les a dessinés dans Inkscape, il faut également conserver les paramètres qui définissent :

- la taille (en pixels) du dessin global ;
- le conteneur du dessin, c'est-à-dire d'une "boîte" dans laquelle le dessin va être affiché (cette boîte a par défaut la taille du dessin, mais si l'on souhaite faire afficher le dessin dans un espace plus petit dans le navigateur, on peut réduire la taille du conteneur et le dessin sera redimensionné en conséquence) ;
- l'image, avec sa taille, son nom et son emplacement sur l'ordinateur (pour qu'elle puisse être retrouvée lors de l'ouverture du graphique SVG), et éventuellement une matrice de transformation si l'on a redimensionné l'image dans Inkscape.

Par défaut, l'image est placée dans le coin en haut à gauche du dessin, et les coordonnées des polygones qui y ont été tracés sont des coordonnées absolues en pixels dans le système défini par le conteneur. Le code SVG du dessin réalisé dans Inkscape pour le graphique présenté sur la Figure 8.11 a donc la forme décrite sur la Figure 8.13.

La deuxième étape, après avoir tracé les zones et analysé le fichier SVG résultant, est l'insertion d'interactivité dans le graphique. Nous avons donc ajouté des hyperliens sur chacune des zones représentant les lieux. Ces liens permettent de cliquer sur la zone, ce clic entraînant l'exécution de la fonction PHP qui permet de retrouver toutes

FIG. 8.13 – Structure d'un dessin SVG représentant une image raster avec des zones définissant des lieux

les données qui font référence à une donnée choisie. Dans ce cas, la donnée choisie est un *lieu* ou un *souslieu* dont il faut écrire l'identifiant comme paramètre du programme PHP à exécuter. En effet, lors de l'exécution d'une fonction définie dans un programme en PHP, celle-ci peut utiliser des paramètres d'entrée qui sont indiqués au moment de l'appel du programme PHP après un point d'interrogation et séparés par le terme "&". La syntaxe de l'hyperlien à ajouter est donnée sur la Figure 8.14 pour la zone représentant la *basse-cour* du site de Vianden.

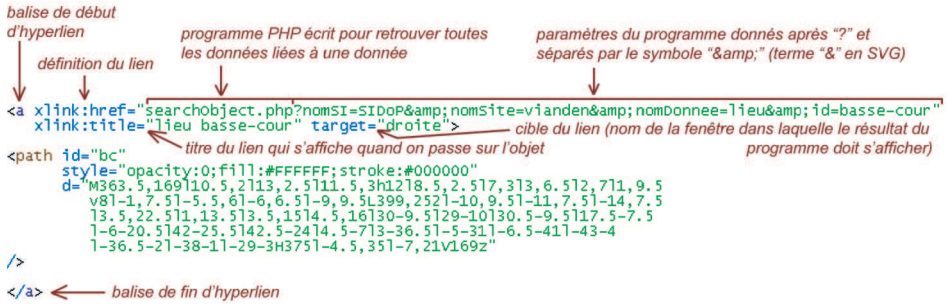


FIG. 8.14 – Ajout d'un hyperlien sur une zone pour retrouver toutes les données liées au lieu représenté

La dernière étape est l'ajout d'éléments interactifs supplémentaires. En effet, en l'état, les contours des zones tracées dans Inkscape apparaissent en permanence sur l'image et lorsque l'on clique sur la zone, elle n'est pas mise en évidence, ce qui empêche de savoir par la suite quelle zone a été choisie. De plus, il n'est pas possible d'identifier les noms des lieux définis par les zones en passant sur le graphique par exemple. Pour ajouter de l'interactivité et rendre la navigation dans le graphique SVG plus attractive, nous avons donc écrit des scripts en JavaScript qui réalisent les actions suivantes lors de l'ouverture du graphique SVG dans un navigateur Internet :

- affichage d'une bulle comprenant un titre générique pour tous les graphiques, par exemple "Plan interactif de Vianden". Cette bulle disparaît dès que l'on passe sur une zone interactive ;
- affichage d'une bulle indiquant le nom du lieu lorsque l'on passe sur la zone correspondante. Cette bulle suit les mouvements de la souris et disparaît quand la souris quitte la zone du lieu ;
- modification de l'opacité de la zone : nous la définissons comme transparente au départ, et elle devient plus opaque lorsque l'on passe dessus avec la souris ;
- mise en évidence de l'objet sélectionné par un changement de couleur lorsque la zone est cliquée. Elle reprend sa transparence initiale lorsque l'on clique sur une autre zone.

L'apparence de ces bulles est définie par une feuille de style CSS.
Pour finir, lorsqu'un lieu a des sous-lieux, nous avons programmé un script pour que l'utilisateur ne puisse pas accéder aux sous-lieux sans avoir préalablement cliqué sur le lieu qui les contient. Ainsi, de la même manière que dans les listes les sous-lieux ne sont accessibles qu'à partir du lieu dans lequel ils sont contenus, il faut d'abord choisir le lieu global pour pouvoir accéder aux sous-lieux sur le graphique. Nous proposons alors un item qui apparaît lorsque les sous-lieux sont accessibles pour pouvoir revenir en "mode lieux" (ne permettant pas l'accès aux sous-lieux).

Pour pouvoir accéder dans le SI aux graphiques SVG ainsi réalisés, nous avons créé un nouveau type de donnée que nous avons simplement nommé *svg*. Un schéma XML pour les données de type *svg* est donc généré, ainsi qu'une table MySQL nommée nom-

site_svg. Dans le schéma, nous avons choisi de définir des nœuds ayant une structure similaire aux autres documents (références, identification, description) mais avec des attributs particuliers pour conserver la procédure de création du graphique SVG : nom du logiciel utilisé pour tracer les zones, visualisateur à installer sur son navigateur pour ouvrir le graphique, etc. Une fois le schéma créé, chaque graphique SVG est enregistré dans les bases de données comme une instance du type de donnée *svg*.
Comme nous l'avons expliqué dans la partie sur le stockage des données dans le paragraphe 7.3.2, nous avons programmé une fonction de stockage pour les graphiques 2D dans le format .SVG, qui permet de stocker sur le serveur le dessin interactif réalisé avec la méthode proposée ci-dessus. Parmi les quatre grandes catégories de données définies, le type de donnée *svg* créé appartient à la catégorie "Document". Par contre, c'est un type de document particulier puisqu'il est interactif. Pour y accéder dans l'interface du SI, nous avons donc programmé la création d'un nouvel onglet dans le menu général que nous avons nommé "Représentations interactives". Cet onglet propose deux types de représentations interactives : en 2D et en 3D. Si l'utilisateur choisit alors "2D", ce choix entraîne l'exécution d'une requête qui crée la liste de toutes les instances des données de type *svg*. Cette liste a exactement la même mise en forme que les listes des autres données (cf. 8.2.1). Dès lors que le graphique SVG a été stocké et qu'une instance de donnée de type *svg* portant le même nom que le graphique a été créée, l'item d'ouverture apparaît alors dans la liste (de la même manière que pour un document .DOC par exemple comme illustré sur la Figure 8.7). Si l'utilisateur demande l'ouverture du graphique SVG, celui-ci s'affiche grâce au "plugin" Adobe SVG Viewer 6.0 par exemple. Cet affichage est réalisé dans une nouvelle fenêtre dont la mise en page est séparée en deux parties : d'un côté le graphique SVG interactif, de l'autre un espace pour afficher la liste des données résultant de la requête passée implicitement par le choix d'un lieu sur le graphique. La Figure 8.15 présente cette fenêtre ainsi que le fonctionnement global des graphiques SVG que nous avons réalisés : affichage des bulles définies dans les scripts, changement de couleur de la zone choisie, résultat de la requête donnant la liste de toutes les données ayant un rapport avec le lieu cliqué.

Pour finir, comme nous l'avons précisé en introduction de ce paragraphe, la méthode que nous avons développée pour la création d'interfaces 2D interactives en SVG est manuelle pour le moment. Elle est en cours d'automatisation par l'étudiante de Master pour ce qui est de l'insertion des hyperliens et des fonctions JavaScript. Le dessin manuel des zones dans Inkscape est difficilement automatisable. Par contre, elle travaille sur le site d'Echternach pour lequel elle dispose d'autres données que celles dont nous disposions sur Vianden. Elle a notamment des plans vectoriels dans le format AutoCAD® pour lesquels une autre méthode est requise quant à leur transformation en graphique SVG. Nous n'avons pas à l'heure de rédaction de ce mémoire de résultats à présenter, mais un processus de génération automatique de graphiques SVG interactifs à partir d'images raster et de dessins AutoCAD® sera à terme proposé à l'utilisateur dans le Système d'Information.
Nous pouvons désormais présenter les travaux menés pour réaliser également des interfaces 3D d'accès aux données à partir de modèles 3D existants.

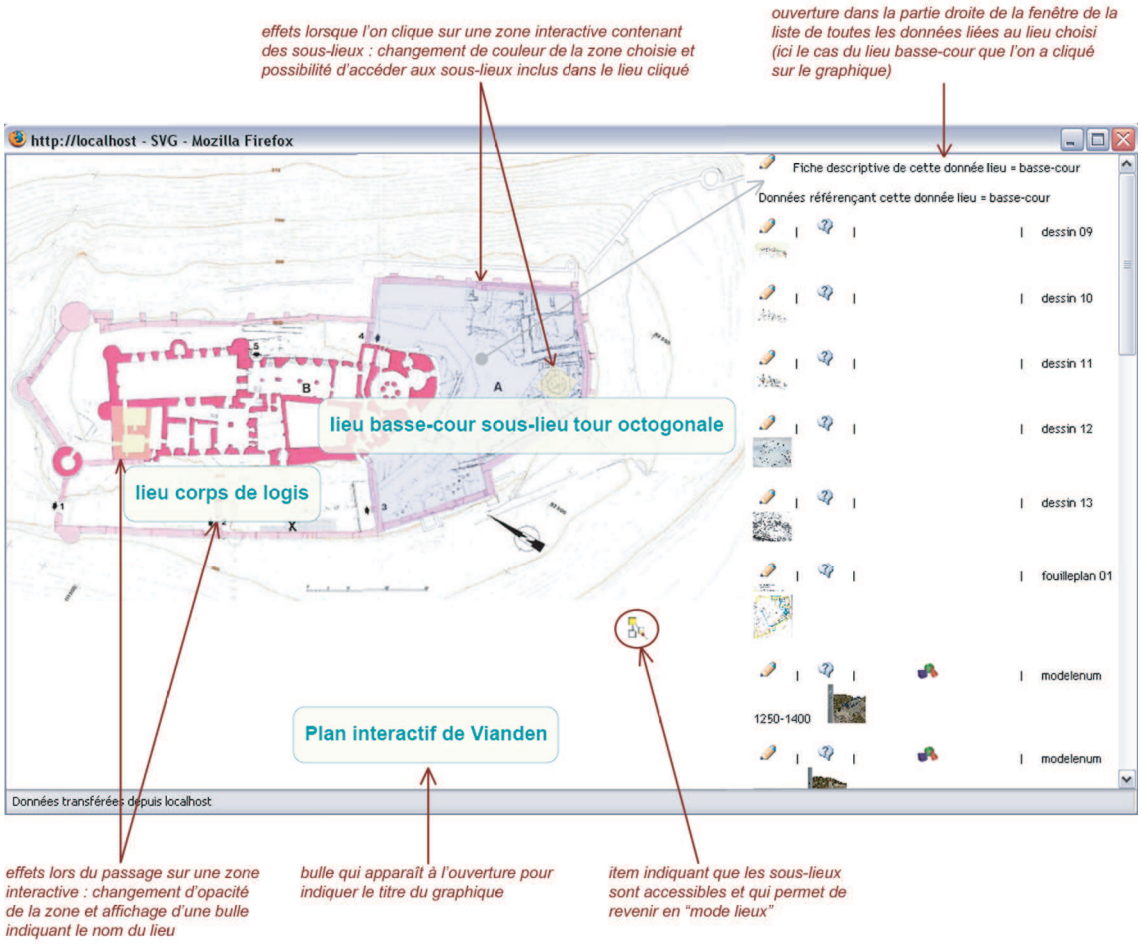


FIG. 8.15 – Interface 2D interactive pour l'accès aux données liées aux lieux représentés

8.3.2 Modèles 3D

Les modèles 3D dont nous disposons sur le site de Vianden sont les modèles des phases historiques du château réalisés par le CRAI (cf. 6.2) et un modèle obtenu par un relevé au scanner laser effectué par la société ArcTron. Les modèles du CRAI ont été réalisés avec le logiciel de modélisation, d'images de synthèse et d'animations Maya®, logiciel commercial développé par la société Alias Systems Corporation. ArcTron a créé le modèle à partir du nuage de points provenant du relevé avec un logiciel de leur propre suite, mais ils l'ont également fourni au SSMN du Luxembourg au format DXF[4]. Dans

[4] *Drawing eXchange Format* est un format créé par la société Autodesk servant à échanger des fichiers DAO ou CAO entre systèmes CAO n'utilisant pas le même format de fichier natif. Il a été conçu à l'origine pour représenter les modèles 3D créés avec AutoCAD®. DXF est un format de fichier utilisé pour le transfert de données du type vecteur. Il contient de l'information pour la visualisation

le même esprit que ce que nous avons présenté pour la création de graphiques 2D interactifs, nous proposons une méthode de transformation de modèles 3D en interfaces Web interactives permettant l'accès à des données liées aux lieux modélisés.

La problématique lorsqu'il s'agit de visualiser des modèles 3D sur le Web est d'exporter les modèles réalisés dans divers logiciels dans un format adapté à la visualisation de données 3D sur Internet. Le format le plus couramment utilisé et surtout exportable depuis de nombreux logiciels est le format VRML *Virtual Reality Modeling Language* ou langage de modélisation de la réalité virtuelle. VRML est un langage de description d'univers virtuels en trois dimensions. Ce langage interprété est une norme internationale ISO[5] et les fichiers VRML ont habituellement pour extension .WRL. Les fichiers .WRL sont des fichiers textuels décrivant les scènes virtuelles à l'aide du langage de présentation VRML. Ces fichiers, qui peuvent être stockés localement sur un ordinateur ou téléchargés depuis un serveur Web, sont affichés à l'aide d'un visualisateur, qui est soit un "plugin" ajouté au fureteur Web ou encore un logiciel autonome indépendant du fureteur Web, qui est installé sur l'ordinateur de l'utilisateur. Le "plugin" le plus souple d'utilisation dans tout navigateur Internet, notamment au niveau de la possibilité d'ouverture dans des fenêtres spécifiques sur une page, est Cortona VRML Client de la société ParallelGraphics. Les programmes VRML peuvent décrire des formes simples (points, lignes, polygones) ou complexes (sphères, cubes, cônes ou cylindres), du texte, des images, des animations, des éclairages, des sons, des hyperliens, ainsi que leur agencement dans l'espace, leur texture, leur couleur ou leur matériau. VRML dispose même de balises pour inclure du code Java ou JavaScript.
Maintenant un peu ancien, VRML reste le premier véritable succès de la 3D sur le Web. Très populaire en 1997, au point d'être la technologie de sites entièrement en 3D, VRML a subi un déclin dû à l'abandon de certains éditeurs clés de "plugins" capables de lire ce format, notamment SGI avec Cosmo Player. Malgré de nombreuses tentatives pour le remplacer, notamment de la part d'Adobe et de Microsoft, VRML dans sa version 2.0 actuelle reste très utilisé pour la recherche et l'apprentissage grâce à son format ouvert. De plus, la plupart des logiciels de modélisation peuvent exporter du VRML. Le développement de VRML a été repris sous une nouvelle appellation, X3D (*eXtended 3D*). X3D est un langage de balisage qui permet à des contenus VRML d'être exprimés dans les termes du métalangage XML. Il est développé par le *Web3D Consortium*, en association avec les organisations MPEG et W3C. Malheureusement, X3D ne dispose pas d'une base d'implémentations suffisante pour construire un site grand public avec ce format et surtout il n'existe pas actuellement de "plugin" permettant de visualiser des scènes X3D aussi facilement que des scènes VRML [Geroimenko et Chen, 2005]. Il n'y a pas d'équivalent de Cortona qui permette de visualiser une scène X3D dans une fenêtre particulière d'une page Web (les scènes s'ouvrent toujours dans un logiciel autonome

---

des données graphiques et est supporté par presque tous les logiciels graphiques. Il y a beaucoup de méthodes pour enregistrer les données des attributs des objets graphiques par le format DXF et aussi pour lier des objets DXF à des attributs externes. Presque tous les logiciels de SIG, CAO et graphiques peuvent importer avec succès ce format à cause des standards.

[5]ISO/IEC 14772-1 :1997 et ISO/IEC 14772-2 :2002

indépendant du fureteur Web), ce qui est problématique par rapport à nos besoins.
Nous avons donc décidé de décrire les modèles 3D de notre SI dans le format VRML, malgré le fait que nous nous éloignons des standards du W3C que nous avons utilisés jusqu'à présent. En effet, même s'il n'est pas recommandé par le W3C, VRML est standardisé par l'ISO. De plus, la conversion de fichiers .WRL en fichiers .X3D est réalisable aisément comme nous le verrons plus loin. Dès lors qu'un visualisateur satisfaisant nos besoins sera disponible, nous pourrons donc proposer dans notre SI des données entièrement cohérentes par rapport aux recommandations du W3C, c'est-à-dire en XML pour le texte, SVG pour la 2D et X3D pour la 3D.

La première étape pour la création d'interfaces 3D pour le Web est donc la transformation des modèles existants en modèles affichables dans un navigateur Internet. Pour transformer les modèles réalisés par le CRAI en modèles VRML, nous nous sommes servis du logiciel Maya® dans lequel ils ont été créés, car il offre la possibilité d'exporter les fichiers en .WRL. De même pour le modèle d'ArcTron fourni dans le format .DXF, car Maya® permet l'import d'un fichier écrit dans ce format et donc l'export par après en .WRL. Dans le même esprit que pour les graphiques 2D, avant l'export dans le format requis, il s'agit de définir des zones dans les modèles qui correspondent aux lieux d'intérêt du site. Ceci permet de retrouver ensuite ces lieux dans le fichier exporté. En effet, tout comme SVG, VRML est un format lisible sous forme textuelle dans un éditeur comme Med ou VrmlPad. Ainsi, si l'on définit des objets dans Maya® auxquels on donne un nom, on pourra retrouver ce nom dans le fichier VRML et ajouter ensuite de l'interactivité sur l'objet modélisé.
Pour définir des zones en 3D, le travail est beaucoup plus conséquent qu'en 2D puisque l'on travaille avec toutes les surfaces composant le modèle. Il faut donc faire des groupes de surfaces pour définir la zone, et non plus seulement dessiner un seul polygone. Nous avons donc défini dans Maya® des groupes de polygones que nous avons sélectionnés pour former des ensembles volumiques représentant les lieux ou les sous-lieux du site compris dans le modèle. La Figure 8.16 montre l'exemple du modèle du château de Vianden en 1150. Maya® propose un "hypergraph" qui montre les structures des groupes réalisés avec les polygones (appelés "polySurfaces") du modèle. Par exemple, nous avons sélectionné sur ce modèle le groupe réalisé pour définir le lieu nommé "aula" qui correspond à la crypte actuelle du château.
Pour le modèle de ArcTron, le principe a été le même, sauf que les faces du modèle 3D sont toutes triangulaires car il a été réalisé par un maillage à partir du nuage de points provenant du relevé laser. Nous avons donc défini des lieux en groupant les surfaces triangulaires du modèle 3D, après avoir simplifié le modèle de départ en réduisant le nombre de faces. En effet, il était très précis mais également très lourd et donc difficile à manipuler. De plus, lors de l'export en VRML, le modèle obtenu était impossible à afficher dans Cortona à cause de sa taille qui était trop importante.
Le fichier VRML résultant de l'export du modèle ainsi segmenté en différents lieux d'intérêt peut alors être ouvert dans un éditeur qui permet d'analyser sa structure pour repérer les zones définies dans Maya®. VRML (et par extension son successeur X3D)

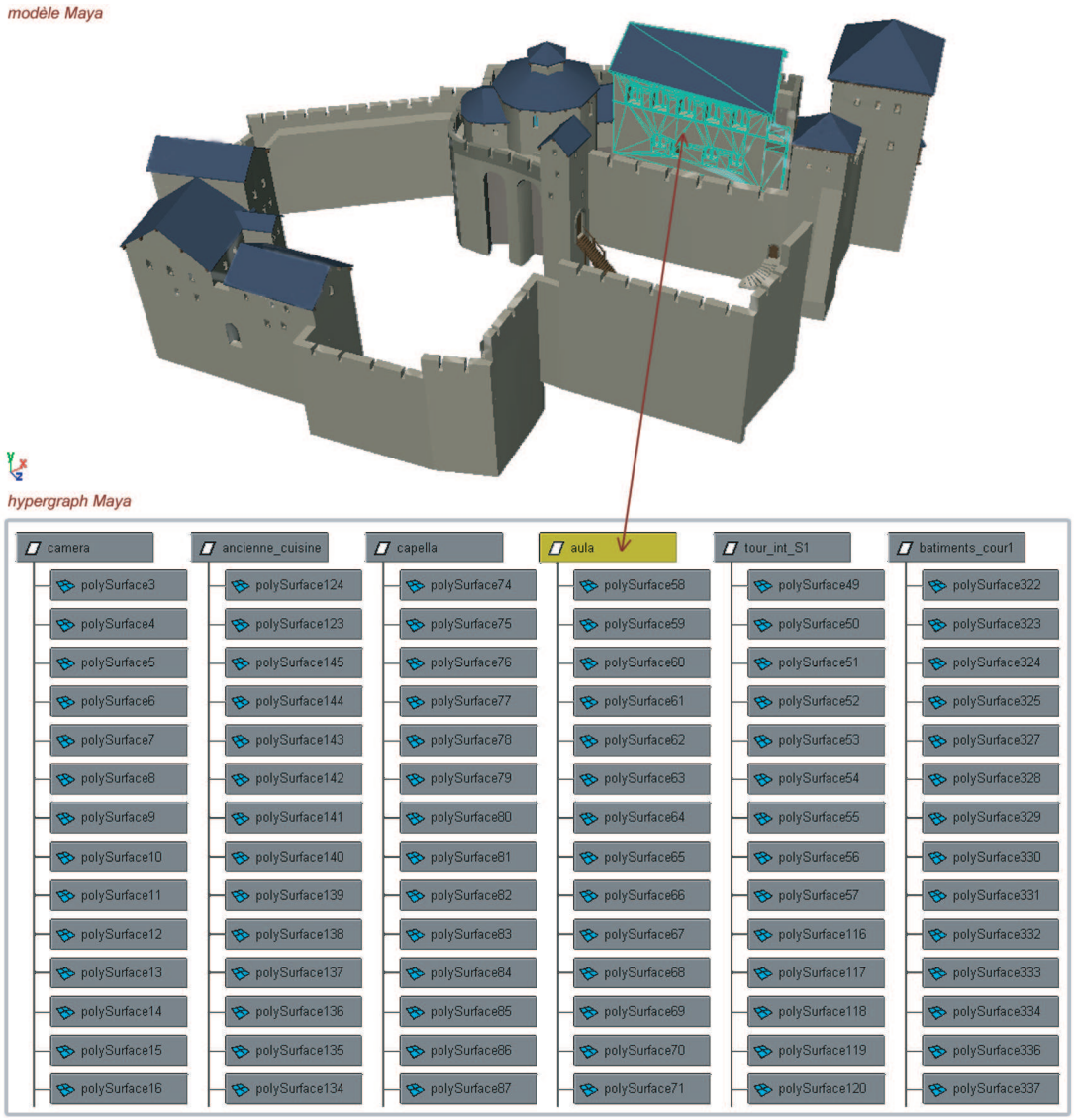


FIG. 8.16 – Modèle 3D et "hypergraph" de Maya® avec mise en évidence d'un groupe de surfaces définissant un lieu

décrit des graphes de scènes constitués de divers nœuds[6] qui forment une structure arborescente. A chaque nœud est associée une fonctionnalité générale : certains donnent la géométrie des objets, d'autres définissent leur apparence, d'autres encore regroupent plusieurs nœuds. C'est le cas par exemple des nœuds de type `Group` ou `Transform` (ce dernier renferme une transformation géométrique qui sera appliquée à l'ensemble du sous-graphe de scène qui lui est rattaché). Chaque nœud a des propriétés appelées

[6]Les nœuds VRML sont analogues aux éléments XML (donc X3D)

champs[7]. Dans le cas d'une transformation, nous trouverons ainsi des propriétés telles que la rotation, la translation et le facteur d'échelle par exemple.
Dans cette structure arborescente, nous pouvons retrouver les lieux ou les sous-lieux définis dans Maya® grâce au mot `DEF` qui est utilisé en VRML pour nommer un nœud de la scène 3D. Le nœud nommé par `DEF` peut alors être réutilisé par la suite dans le fichier grâce au mot `USE`. Chaque lieu étant un groupe de plusieurs géométries (qui sont des nœuds dans VRML), il est repérable par un nœud `Transform` regroupant les autres nœuds. Ce nœud porte le même nom que celui donné au groupe de surfaces dans Maya®, précédé par le nom du fichier Maya® dont il fait partie. Le lieu "aula" de la Figure 8.16 est défini ainsi en VRML :
`DEF e5_Chateau :aula Transform {...}`
e5_Chateau étant le nom du fichier Maya®.
La Figure 8.17 montre une partie du graphe de scène de ce lieu, qui est composé d'autres nœuds `Transform` décrivant chacun l'apparence et la géométrie d'une "polySurface" du modèle. Les nœuds `Transform` inclus dans le premier qui définit le lieu sont considérés comme ses "enfants" (`children` dans le fichier VRML).

La deuxième étape lorsque les modèles Maya® ou DXF ont été segmentés en différents lieux, exportés en VRML et que tous les lieux ont été repérés dans le fichier, est l'ajout d'interactivité dans le modèle VRML. En effet, pour pouvoir utiliser les modèles VRML ainsi créés comme interfaces d'accès aux données liées aux lieux représentés, il faut (comme en SVG) ajouter des hyperliens sur les lieux. En VRML, ces liens s'appellent des ancres et sont réalisés par un nœud appelé `Anchor`. Le principe est que si l'utilisateur clique alors que le pointeur est sur un objet graphique 3D qui fait partie de la descendance de ce nœud de regroupement, le navigateur Internet charge l'URL donnée dans le champ `url` de ce nœud dans une fenêtre indiquée dans le champ `parameter`. Pour pouvoir retrouver en cliquant sur un lieu ou un sous-lieu toutes les données qui y sont liées, il suffit donc de noter dans le champ `url` du nœud `Anchor`, le programme PHP et ses paramètres qui entraînent l'exécution de la fonction permettant de retrouver toutes les données qui font référence à une donnée choisie. Pour que le lien s'applique sur tous les éléments surfaciques composant le lieu, il faut placer le nœud `Anchor` dans le graphe de scène de manière à englober entièrement le nœud `Transform` du lieu et tous ses "enfants". Tous les nœuds inclus dans l'ancre sont également considérés comme ses "enfants". La Figure 8.18 donne la syntaxe de l'ancre à ajouter pour rendre interactif le lieu nommé "aula" qui correspond au *lieu crypte* enregistré dans le SI.
Pour rendre les modèles 3D encore plus pertinents par rapport aux données qu'ils permettent de retrouver, en plus de la possibilité d'accéder à toutes les données liées au lieu cliqué, nous avons programmé une autre fonction PHP qui exécute une requête de recherche de données liées à la fois à un *lieu* et à une *période*. En effet, la majorité des modèles 3D dont nous disposons et que nous avons interfacés sont des modèles des phases architecturales du château de Vianden au cours de son histoire. Il est donc pertinent de proposer à l'utilisateur d'accéder, par l'intermédiaire de ces modèles his-

[7] Les champs VRML sont analogues aux attributs XML (donc X3D)

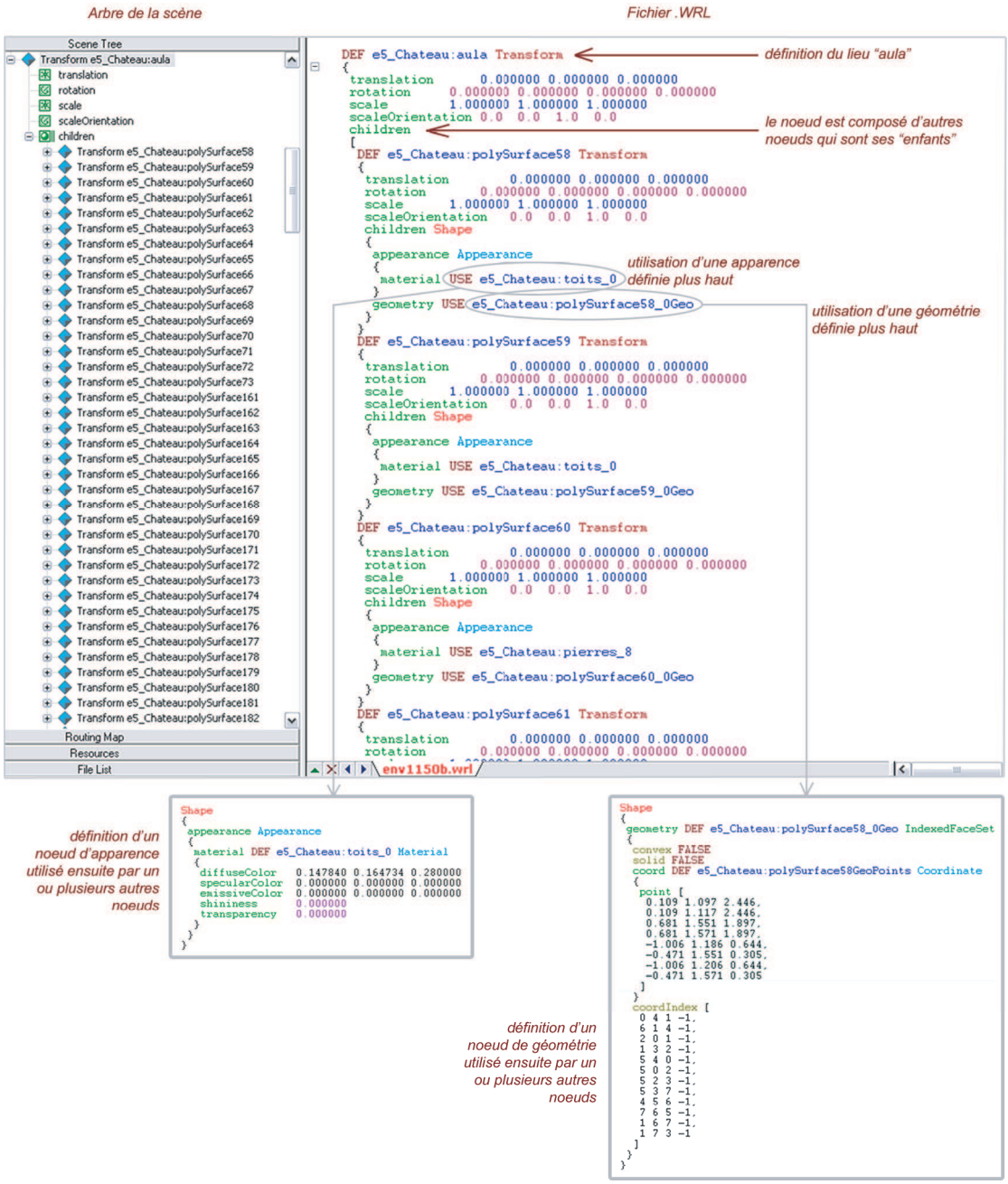


FIG. 8.17 – Structure VRML d'un lieu comportant plusieurs surfaces

toriques, uniquement aux documents et aux objets ayant un rapport avec le lieu choisi mais également avec la période du modèle. Ainsi, si l'utilisateur navigue dans le modèle du château au 17e siècle et qu'il clique sur la chapelle, il n'accédera qu'aux documents et

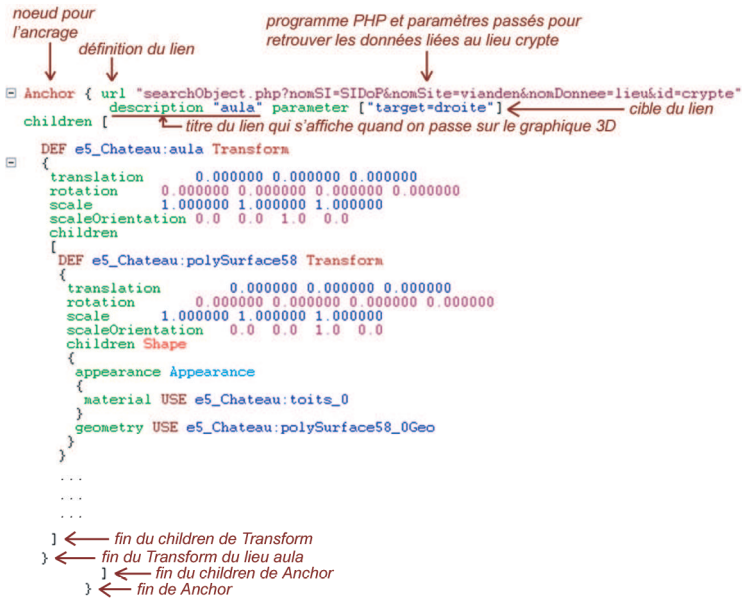


FIG. 8.18 – Ajout d'une ancre sur un graphique 3D pour retrouver toutes les données liés au lieu modélisé

objets liés à la chapelle telle qu'elle était au 17e siècle. Par ce biais, il n'obtient pas tous les documents liés à la chapelle, comme par exemple les photos la montrant aujourd'hui telle qu'elle a été reconstruite, mais uniquement les plans et documents de fouilles correspondant à la *période 17e s.* enregistrée dans le SI. Pour permettre l'exécution de cette fonction de requête sur un lieu et une période, il suffit de changer le nom du programme PHP dans le champ `url` du nœud `Anchor`, les paramètres de ce programme étant les mêmes que pour la fonction *searchObject.php*, mais avec le type d'objet *periode* avec un identifiant en plus du type d'objet *lieu* avec un identifiant.

Comme pour les graphiques 2D en SVG, la dernière étape de la méthode de création de modèles 3D interactifs est l'ajout de nœuds et de scripts pour rendre la navigation dans les modèles plus attractive.
Pour commencer, VRML inclut un nœud appelé `Viewpoint` qui permet de définir des points de vue sur la scène 3D. Ce nœud a des champs qui qualifient la position, l'orientation, le champ de vision et le nom d'une caméra qui permet de voir le graphique 3D sous différents angles. Nous avons donc créé des caméras dans Maya® et nous les avons exportées en même temps que le modèle 3D. Dans le fichier VRML, elles apparaissent donc comme des `Viewpoints` qui portent le nom que l'on a donné aux caméras créées dans Maya®. L'utilisateur peut alors choisir, lors de la navigation dans le modèle 3D, le nom d'un point de vue dans la liste des caméras créées. Ce choix entraîne un repositionnement de l'utilisateur de telle sorte qu'il visualise la scène depuis la position définie dans le nœud `Viewpoint`. Cette possibilité permet à l'utilisateur qui connaît la partie

du site qu'il souhaite étudier de se positionner directement à l'endroit requis. Cela peut également simplifier la navigation dans la scène pour un utilisateur qui ne serait pas habitué aux outils de navigation classiques (zoom, translation, rotation...).
Ensuite, nous avons souhaité mettre en évidence les différents lieux composant le modèle lorsque le pointeur passe dessus et lorsqu'ils sont cliqués pour afficher les informations liées. VRML donne bien-sûr cette possibilité grâce à des nœuds qui sont déclenchés de manière interactive dès qu'un événement se produit. Ils sont appelés "capteurs sensitifs" ou `sensor`. L'événement peut-être un clic de souris ou le passage à proximité du nœud lors de l'exploration de la scène. Les nœuds peuvent recevoir ou émettre des événements (`event`) susceptibles de modifier les champs internes du nœud. Ces événements peuvent être de deux types, selon qu'il s'agisse d'événements à l'entrée (`eventIn`) qui vont déclencher un comportement particulier du nœud, ou d'événements déclenchés par un comportement d'un nœud (`eventOut`). De plus, il existe des champs d'un type particulier appelés `exposedField` qui, comme les `eventIn` et les `eventOut`, peuvent être modifiés directement de l'extérieur du nœud par d'autres nœuds, grâce des scripts rédigés en JavaScript ou VRMLScript (langage de programmation interne à VRML). Pour relier ces nœuds recevant ou émettant des événements, VRML permet de réaliser un routage des événements. Ce routage se base sur le mot `ROUTE` qui relie un `eventOut` à un `eventIn`. Ceci permet aux événements de se propager ainsi d'un nœud à un autre, en répercutant les changements de valeur du champ du premier nœud sur la valeur du champ du second (les changements des valeur étant définis par les scripts). Les nœuds utilisés dans les `ROUTEs` doivent auparavant avoir été instanciés par le mot `DEF`.
Toutes ces possibilités offertes par VRML nous ont permis d'écrire des scripts en JavaScript et en VRMLScript, et de router les événements ainsi définis, pour réaliser les actions suivantes lors de la navigation dans les modèles 3D interactifs :

- affichage d'une étiquette indiquant le nom du lieu lorsque l'on passe dessus (ce nom est donné dans le champ `description` du nœud `Anchor`) ;
- changement d'émissivité de la couleur des éléments 3D définissant un lieu lorsque le pointeur passe dessus ;
- changement de couleur des éléments 3D définissant un lieu lorsque l'on clique dessus. Les éléments reprennent leur couleur initiale lorsque l'on clique sur un autre lieu.

Les mêmes fonctionnalités s'appliquent pour les sous-lieux définis dans le modèle 3D.

Pour accéder dans le SI aux modèles 3D interactifs réalisés avec la méthode proposée, nous avons créé un nouveau type de donnée nommé *modele3D*. De même que pour le nouveau type de donnée *svg*, cette création entraîne la génération d'un schéma XML pour les données de type *modele3D* et une nouvelle table MySQL nommé `nomsite_modele3D`. La structure du schéma est similaire à celle des autres documents mais avec des attributs particuliers pour conserver la procédure de création du modèle 3D VRML : nom du logiciel utilisé pour la création initiale, visualisateur (Cortona), mode d'acquisition des données du modèle (relevé laser, réalisation à partir d'autres documents...). Une fois le schéma créé, chaque modèle 3D est enregistré dans les bases de données comme une instance du type de donnée *modele3D*.

Tout comme les graphiques SVG, les modèles au format .WRL sont stockables sur le serveur par l'intermédiaire de la procédure de stockage présentée dans le paragraphe 7.3.2. Une fois le modèle stocké, on crée une instance du type de donnée *modele 3D* portant exactement le même nom que le fichier .WRL stocké. La liste de tous les modèles 3D est alors accessible par l'intermédiaire de l'onglet "Représentations Interactives" / "3D" du menu général du SI. Cette liste, créée par une requête sur la table nomsite_modele3D, a la même mise en forme que celles des autres données (cf. 8.2.1). L'item d'ouverture, apparaissant dans la liste si la donnée est enregistrée et stockée avec un nom commun, permet l'affichage du modèle 3D interactif dans le "plugin" Cortona. Comme pour les graphiques interactifs, l'affichage est réalisé dans une nouvelle fenêtre dont la mise en page est séparée en deux parties : d'un côté le modèle 3D interactif, de l'autre un espace pour afficher la liste des données résultant de la requête passée implicitement par le choix d'un lieu dans le modèle. Nous présentons les interactions possibles avec les modèles 3D sur la Figure 8.19, qui montre le modèle du château de Vianden vers 1150, à partir duquel on a retrouvé toutes les données en rapport avec l'"aula" du château tel qu'il était en 1150 (requête spatio-temporelle).

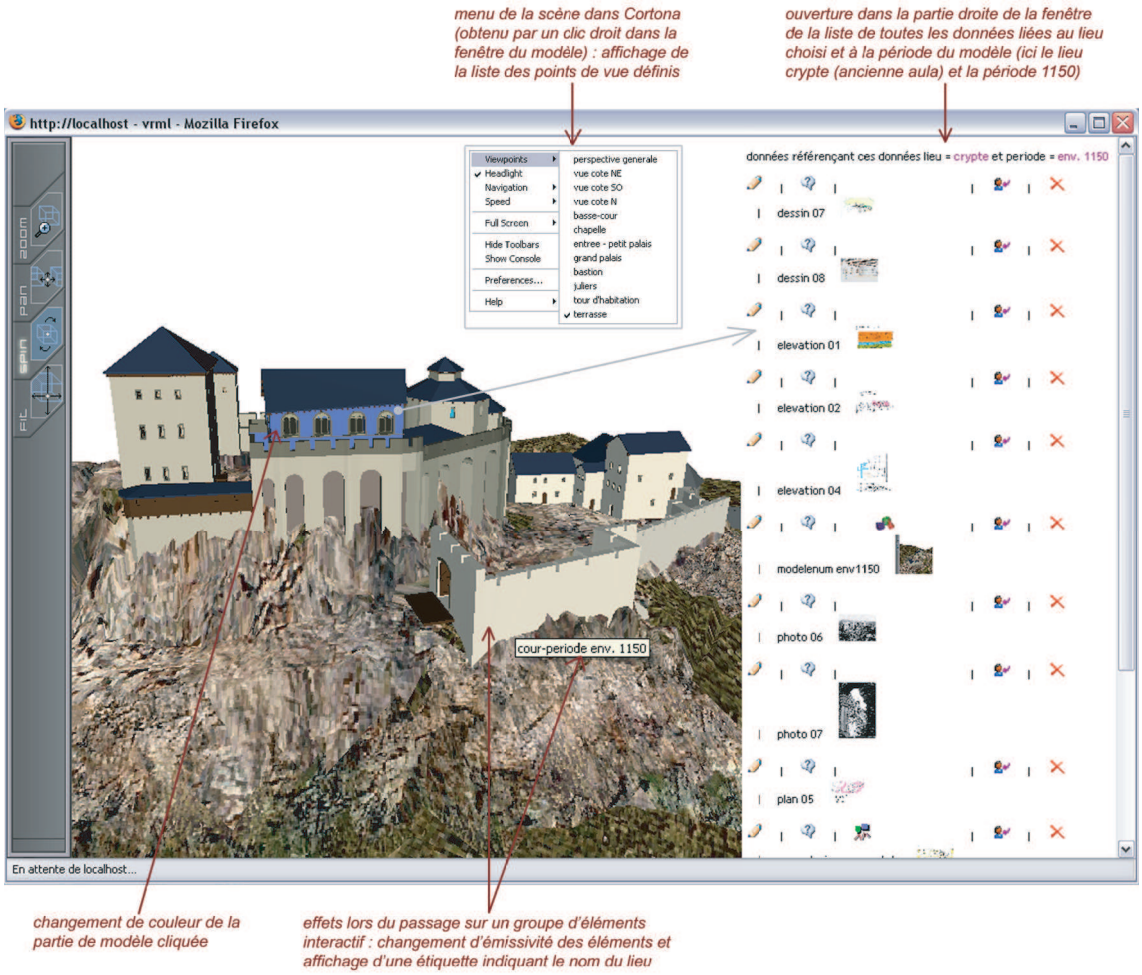


FIG. 8.19 – Interface 3D interactive pour l'accès aux données liées aux lieux modélisés et à la période du modèle

Pour conclure cette partie sur les modèles 3D, comme nous l'avons indiqué en introduction, tout ce que nous avons présenté avec des modèles au format VRML est transposable facilement en X3D pour se conformer aux recommandations du W3C. En effet, comme le montre le Tableau 8.1, il s'agit de convertir les nœuds et les champs VRML dans la syntaxe du métalangage XML pour avoir des éléments et des attributs X3D. Ainsi, aussi bien la structure géométrique et l'apparence des éléments 3D, que les événements et les routes définis en VRML, peuvent être convertis en X3D pour un affichage des modèles 3D interactifs dans ce format dès lors qu'un visualisateur adapté à nos besoins sera disponible.

VRML format	X3D format
#VRML V2.0 utf8	<?**xml** version="1.0" encoding="UTF-8"?> <!DOCTYPE X3D PUBLIC "http://www.web3D.org/TaskGroups/x3d/ translation/x3d-compact.dtd" "/www.web3D.org/TaskGroups/x3d/ translation/x3d-compact.dtd">

DEF Clock **TimeSensor** {
cycleInterval 30
loop TRUE
}
	<**TimeSensor** DEF="Clock" loop="true"
	cycleInterval="30.0"/>

DEF EntryPoint **Viewpoint** {
position 0 −250 150
orientation 1 0 0 1.00
fieldOfView 1.149
description "Landscape"
}
	<**Viewpoint** DEF="EntryPoint" position=
	"0.0 −250.0 150.0" orientation="1.0 0.0 0.0 1.0"
	description="Landscape"
	fieldOfView="1.149"/>

Anchor {
url "network.html#ArticleID"
parameter "target=details"
description "ArticleID, PY, Cited Work"
children [.....]
}
	<**Anchor** url="'network.html#ArticleID"'
	description="ArticleID, PY, Cited Work"
	parameter="'target=details"'>

Transform {
translation 93.8 33.4 0
}
	<**Transform** translation="93.8 33.4 0.0">

material DEF NODE1956 **Material** {
ambientIntensity 0.27
diffuseColour 0.23 0.81 0.44
specularColour 0.99 0.94 0.81
shininess 0.45
}
	<**Material** DEF 5 "NODE1956" ambientIntensity="0.27"
	shininess="0.45" diffuseColour="0.23 0.81 0.44"
	specularColour="0.99 0.94 0.81"/>

geometry **Sphere** {
radius 3
}
	<**Sphere** radius="3.0"/>

DEF NODEXPath **ScalarInterpolator** {
key [0.00, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50,
0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.00]
keyValue [0.90, 0.90, 0.90, 0.90, 0.50,
0.50, 0.50, 0.50, 0.0, 0.0, 0.0]
}
	<**ScalarInterpolator** DEF="NODEXPath" key=" 0.00,
	0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.00"
	keyValue=" 0.90, 0.90, 0.90, 0.90, 0.50, 0.50, 0.50, 0.50,
	0.0, 0.0, 0.0"/>

geometry **Cylinder** {
radius 1.200
height 6.000
}
	<**Cylinder** radius="1.2" height 5 "6.0"/>

ROUTE Clock.fraction_changed TO BARXPath.set_fraction	<**ROUTE** fromNode="Clock" fromField="fraction_changed" toNode="BARXPath" toField="set_fraction"/>
ROUTE BAR1999Path.value_changed TO BARX.set_transparency	<**ROUTE** fromNode="BAR1999Path" fromField="value_changed" toNode="BARX" toField="set_transparency"/>

TAB. 8.1 – Exemples de conversion d'éléments VRML en X3D [Geroimenko et Chen, 2005]

Par ailleurs, tout comme pour les graphiques 2D, la méthode proposée pour la création d'interfaces 3D permettant un accès spatial et temporel aux données du SI est manuelle pour le moment. L'étudiante de Master qui travaille dans le cadre de notre thèse est sur le point d'en terminer l'automatisation sur la base des données du site d'Echternach. Contrairement aux modèles du site de Vianden, les modèles 3D réalisés par le CRAI sur ce site ont été réalisés dans le logiciel AutoCAD®. Nous avons alors décidé d'utiliser le logiciel SketchUp® (moins onéreux que Maya® et plus simple

d'utilisation) pour proposer une méthode de segmentation de modèles AutoCAD® en lieux d'intérêt. Une fois segmentés, les modèles SketchUp® sont exportés en VRML et l'étudiante a programmé des fonctions qui permettent de rendre ces modèles interactifs automatiquement. Pour plus de précisions, nous avons placé en Annexe D un extrait d'un rapport que l'étudiante a rédigé pour présenter de l'avancement de ses travaux.

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la manière dont les données sont liées, et les outils thématiques et interactifs développés pour gérer les données conservées dans le Système d'Information. Dans les deux derniers paragraphes particulièrement, nous avons proposé l'utilisation de représentations graphiques 2D et 3D comme interfaces d'accès spatiaux et temporels aux données. Pour compléter ces accès unidirectionnels, nous présentons dans le prochain chapitre des moyens de représentation des données qui rendent bidirectionnels les liens existants entre l'utilisateur et les données.

Chapitre 9

Moyens de représentation des données

9.1 Corpus des métadonnées

Le premier système de représentation des données que nous avons développé se base sur les métadonnées. Nous proposons à l'utilisateur un outil permettant de consulter simplement et rapidement toutes les valeurs des attributs enregistrées pour chaque type de donnée créé dans le Système d'Information. En effet, il peut être intéressant pour l'analyse des données d'avoir une vue synthétique du corpus des métadonnées conservées pour toutes les instances de données.
Ainsi, nous avons écrit un programme qui fonctionne sur la base des schémas XML des types de données. Nous proposons à l'utilisateur de choisir un type de donnée, ce qui entraîne l'ouverture du schéma correspondant par l'intermédiaire d'un *parseur* PHP, qui analyse la structure du schéma, et d'une feuille de style CSS pour la mise en forme. Dans ce cas, nous avons choisi de présenter les nœuds et les attributs, avec une "case à cocher" devant chaque attribut. Ces cases permettent à l'utilisateur de choisir les attributs dont il souhaite consulter l'ensemble des valeurs. Avant de valider ses choix, il peut également décider de la forme sous laquelle il préfère afficher ces valeurs :

- affichage par listes déroulantes ;
- affichage sous forme de colonnes de tableaux (le nombre de colonnes peut être choisi par l'utilisateur) ;
- affichage sous forme de lignes de tableaux.

La fonction programmée exécute alors une requête sur la table MySQL du type de donnée choisi, qui récupère toutes les valeurs des champs correspondant aux attributs que l'utilisateur a sélectionné. Si plusieurs valeurs de champ sont identiques, cette valeur

commune n'est extraite qu'une seule fois. Les valeurs des champs sont alors affichées suivant la mise en forme choisie, qui est définie dans la feuille de style. Ceci permet par exemple de voir synthétiquement une liste avec tous les auteurs des textes conservés ou un tableau comportant tous les lieux représentés sur des documents photographiques. Nous proposons alors à l'utilisateur d'imprimer la page ainsi créée avec les listes ou les tableaux de métadonnées, ce qui peut lui permettre de faire toutes sortes d'analyses ultérieurement sur la base de ces informations.
La Figure 9.1 illustre la représentation de quelques corpus de métadonnées des données du type *modele3D*. Ceux-ci permettent par exemple de voir synthétiquement les modes d'acquisition des données ayant permis de réaliser les modèles, les sujets de ces modèles ou leurs dates de création.

Cette possibilité de visualisation des corpus de métadonnées est accessible pour les utilisateurs experts (archéologues, gestionnaires) pour les aider dans leurs besoins d'analyses et d'exploitations de leurs données.
De manière plus attractive pour tous, nous proposons également un outil permettant de créer des vues des données dans des tableaux thématiques.

9.2 Vues des données

Pour compléter l'accès individualisé à chaque instance de donnée à partir des listes présentées au chapitre précédent, nous avons développé un deuxième moyen de représentation d'un ensemble informations sur les données. Nous proposons à tout utilisateur un outil lui permettant de se créer ses propres vues sur les différents types de données. En effet, les listes de données donnent les noms des instances du type de donnée choisi, accompagnés de vignettes montrant des aperçus de ces instances dans le cas des documents, et il faut ouvrir la fiche descriptive de chaque instance pour voir les métadonnées (cf. Figure 7.13). Ainsi, si l'utilisateur souhaite comparer plusieurs instances de données, il doit ouvrir plusieurs fiches descriptives et peut rapidement avoir des difficultés pour visualiser simultanément toutes les informations qui l'intéressent.
Pour pallier ces difficultés, nous avons développé un outil de création de tableaux synthétiques permettant de visualiser des informations choisies pour plusieurs instances d'un même type de donnée. Ceci permet de réaliser des vues thématiques des données, l'utilisateur pouvant créer autant de vues qu'il le souhaite suivant les catégories d'informations qu'il souhaite rassembler dans un même document. Ce document peut alors être directement imprimé pour servir de support de réflexion ou de publication.

Le fonctionnement du programme que nous avons écrit pour réaliser ces vues est le suivant :

- l'utilisateur choisit de créer des vues des données dans le menu principal du SI ;
- il accède alors à la liste de tous les types de données contenus dans le SI, pour

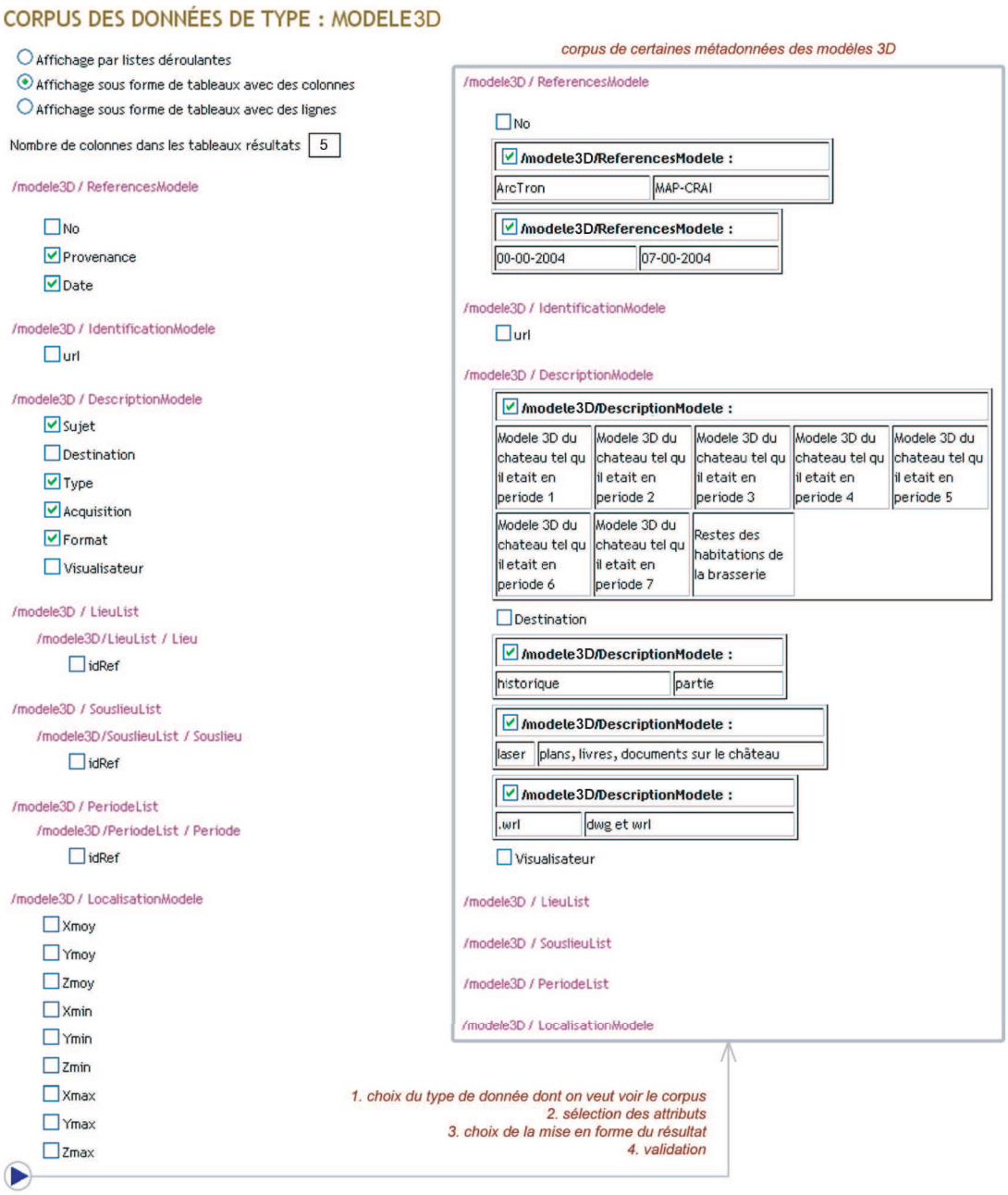


FIG. 9.1 – Procédure de représentation des corpus de métadonnées

lesquels on lui propose d'ajouter une vue. Ces types sont récupérés par une requête qui extrait tous les nomdonnee des tables nomsite_nomdonnee correspondant au site, et mis en page par une feuille de style CSS ;

– l'utilisateur peut alors saisir un nom pour la vue qu'il souhaite créer dans un

champ de formulaire correspondant au type de donnée choisi ;
- le schéma XML du type de donnée est alors affiché avec la même mise en forme que pour les corpus présentés précédemment : une case placée devant chaque attribut permet à l'utilisateur de sélectionner ceux dont il veut afficher les valeurs dans sa vue ;
- le programme créé alors un nouveau fichier XML qui comprend les valeurs des attributs sélectionnés, ceux-ci ayant été récupérés par des requêtes sur les champs sélectionnés de la table MySQL correspondant au type de donnée choisi ;
- le fichier XML de la vue est alors affiché sous forme de tableau par l'intermédiaire d'une feuille de style XSL. Les colonnes de ce tableau correspondent aux attributs sélectionnés, auxquels on ajoute une colonne initiale pour les identifiants des instances de données. Chaque instance est donc renseignée sur une ligne du tableau, avec son identifiant et les valeurs des attributs sélectionnés. Dans la colonne de l'identifiant, un item qui permet l'accès à la fiche descriptive globale de la donnée. Si l'utilisateur a sélectionné l'attribut `url`, ce n'est pas le nom de l'image qui apparaît mais la vignette correspondante, que l'utilisateur peut sélectionner pour ouvrir l'image originale.

Les vues créées sont donc conservées dans des fichiers XML indépendants. L'utilisateur a alors la possibilité de les voir, de les modifier ou de les supprimer à tout moment.
La Figure 9.2 illustre la procédure de création d'une vue nommée "sujet" des données de type *dessin*.

Ce moyen de représentation des données dans des vues paramétrables par l'utilisateur procure une possibilité de visualisation et publication des données inédite et propre à chacun. Cela permet à tous les utilisateurs de personnaliser leurs affichages des données suivant leurs centres d'intérêt ou leurs thèmes de recherche.
Dans le même souci d'interaction entre l'utilisateur et les données, nous présentons dans la suite des fonctions développées pour permettre à chacun de se créer ses propres représentations originales à partir des données bi-et tridimensionnelles conservées dans le Système d'Information.

9.3 Représentations originales

Dans cette dernière partie descriptive des fonctions du Système d'Information, nous proposons des outils permettant d'interagir avec les données 2D et 3D dans le sens contraire de celui présenté dans le paragraphe 8.3. En effet, nous avons présenté comment nous avons créé et intégré dans le SI des interfaces bi- et tridimensionnelles permettant de retrouver des données de manière spatio-temporelle à partir de graphiques 2D et de modèles 3D. A l'inverse, nous proposons ici de générer des représentations 2D et 3D originales à partir des données spatiales, temporelles ou documentaires conservées dans le SI. Nous transformons ainsi le lien unidirectionnel existant entre l'utilisateur

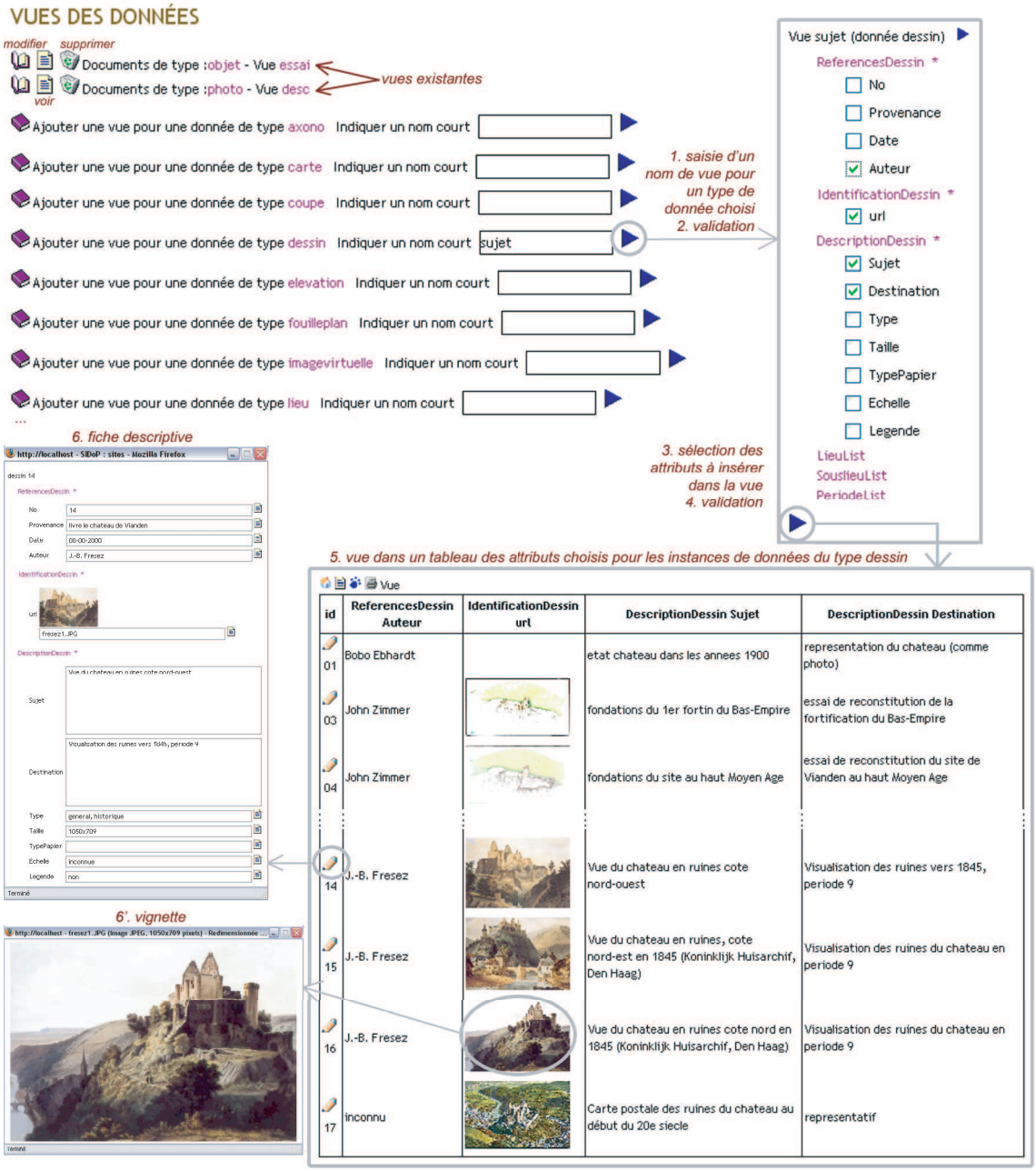


FIG. 9.2 – Procédure de création de vues des données

et les données 2D et 3D en un lien bidirectionnel : un utilisateur pourra donc par exemple retrouver à partir d'un modèle des données relatives à un lieu, mais également désormais à partir du lieu retrouver la partie de modèle correspondante. L'interaction est donc possible à la fois entre la représentation 2D ou 3D et l'utilisateur, et entre

l'utilisateur et la représentation 2D ou 3D puisqu'il va pouvoir générer "à la volée" ses propres représentations.

9.3.1 Représentations bidimensionnelles

Le principe de génération de données bidimensionnelles originales que nous proposons repose sur les données dont nous disposons sur le site de Vianden, c'est-à-dire des documents scannés. Nous ferons des expérimentations ultérieurement avec les données du site d'Echternach pour lequel nous disposons de plans vectoriels dans le format AutoCAD®, ce qui nous permettra probablement d'améliorer l'outil que nous allons présenter.
Partant de documents scannés, l'idée est de permettre à l'utilisateur de visualiser simultanément plusieurs documents ayant des points communs, sous la forme d'une seule représentation montrant leur superposition. Nous avons donc développé un outil pour générer des "compositions de plans" ou des "photomontages". La base de cet outil est que le langage PHP permet de produire, en plus des contenus HTML (utilisation classique), plusieurs autres types de contenus dont des graphismes vectoriels en SVG. En effet, pour générer d'autres types de contenus, il suffit d'indiquer au début du fichier PHP une instruction qui modifie le message HTTP du serveur. Pour que l'exécution d'un programme PHP produise un graphique SVG, il faut écrire le fichier PHP ainsi :

```
<?php header("Content-type : image/svg+xml") ; ?>
<?php
echo '<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>' ;
?>
<!DOCTYPE svg PUBLIC "-//W3C//DTD SVG 1.0//EN"
"http ://www.w3.org/TR/2001/REC-SVG-20010904/DTD/svg10.dtd">
<svg>
contenu du graphique SVG
</svg>
```

Entre les balises SVG, on décrit le graphique SVG de manière habituelle en suivant les normes du métalangage XML. L'intérêt est que si l'on souhaite ajouter des paramètres variables dans le graphique SVG, il suffit d'insérer des morceaux de code PHP entre les balises `<?php` et `?>`. De cette manière, il est possible de créer des graphiques SVG comprenant des éléments variables choisis par l'utilisateur.

Nous nous sommes servie de ce principe pour permettre à l'utilisateur de générer des graphiques SVG dont il détermine le contenu. Nous avons donc programmé différents formulaires PHP dans lesquels l'utilisateur choisi les images qu'il souhaite combiner en une seule représentation. Pour générer ces compositions de plans ou photomontages, il faut que les images proposées à l'utilisateur remplissent différentes conditions :

- il est nécessaire d'en modifier l'opacité, pour que toutes les images choisies soient visibles dans la superposition par transparence ;
- il faut que les images aient une référence géographique commune et la même échelle, pour qu'elles se superposent parfaitement.

Nous avons donc modifié certaines images conservées dans le SI selon ces conditions, pour pouvoir en proposer la composition dans les formulaires. Ces formulaires sont de type multi-critères pour qu'il soit possible d'y sélectionner plusieurs images. Pour guider l'utilisateur dans ses choix, le formulaire contient une courte description de chaque image. Le graphique SVG est alors généré en récupérant en tant que variables PHP les choix de l'utilisateur, qui correspondent chacun dans le programme à une image stockée sur le serveur. Le graphique ainsi créé s'affiche automatiquement dans le navigateur grâce à l'entête placée dans le fichier PHP, qui indique au serveur que le résultat du programme est un dessin SVG.

Après étude des données dont nous disposons sur le site de Vianden, nous avons créé six formulaires différents permettant de générer des compositions de plans ou d'images. Par l'intermédiaire de ces formulaires, l'utilisateur peut combiner les images suivantes :

- les plans de masse du château correspondant aux différentes périodes de l'histoire du site ;
- un dessin présentant une reconstitution de la terrasse du château telle qu'elle était au 17e siècle et une photographie actuelle de cette terrasse ;
- des coupes longitudinales du château tel qu'il était pendant la première et la deuxième phase romane de son histoire ;
- une élévation nord-est du château tel qu'il était vers 1200 et l'élévation correspondante actuelle ;
- une élévation sud-ouest de la physionomie du château en 1150, un dessin plus détaillé de certaines parties de cette élévation, et l'élévation correspondante actuelle ;
- une photographie actuelle de la "salle des chevaliers" du château et un dessin reconstituant le plafond à solive qui ornait cette salle vers 1200.

La Figure 9.3 illustre le fonctionnement de l'outil développé, que l'on a utilisé pour composer les images de la terrasse du château. Comme le résultat est un graphique au format SVG, toutes les fonctionnalités liées à l'affichage de dessins SVG dans un navigateur Internet sont utilisables (zooms importants, déplacements dans l'image).

Ces possibilités de compositions d'images ne sont que des exemples illustrant ce qu'il est possible de faire dans le but de permettre à l'utilisateur d'interagir avec des représentations en deux dimensions. L'utilisation de graphiques vectoriels natifs de type AutoCAD® ou SVG vectoriel pur peut permettre d'améliorer cet outil, car on pourrait proposer à l'utilisateur de créer lui-même son propre graphique (dans le sens de ce que nous proposons pour les modèles dans le paragraphe suivant). Comme nous n'avions pas ce type de graphiques sur le site de Vianden, pour l'instant l'utilisateur n'a que la possibilité de générer des compositions graphiques originales à partir d'images existantes. Nous travaillerons avec les données du site d'Echternach pour enrichir l'outil présenté.

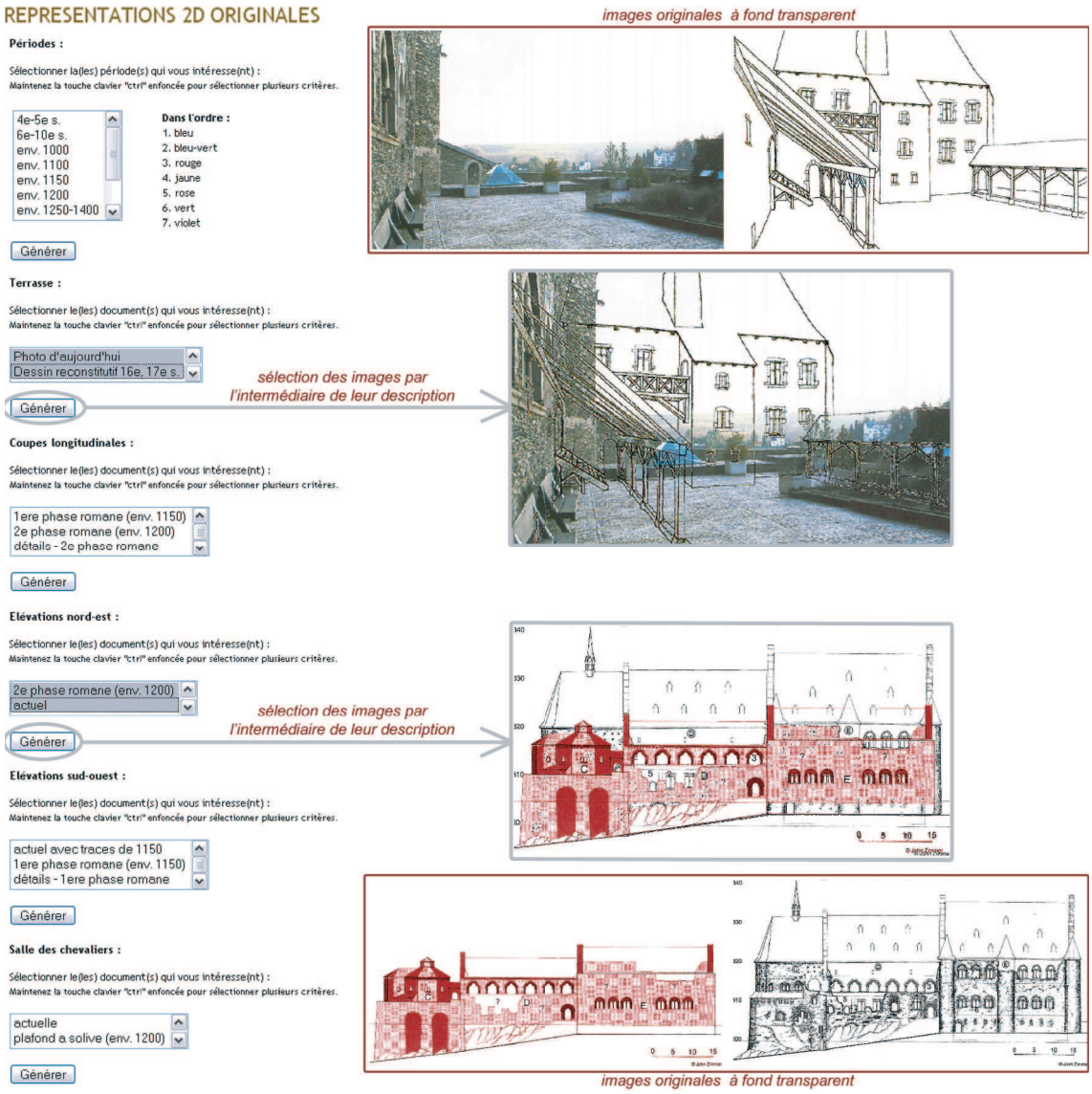


FIG. 9.3 – Procédure de génération de représentations 2D originales

9.3.2 Représentations tridimensionnelles

Pour les représentations 3D, nous proposons un outil permettant réellement de produire des modèles 3D originaux à partir d'une sélection de lieux et de périodes. Comme pour les représentations bidimensionnelles, cet outil se base sur la possibilité de PHP de produire d'autres types de contenus que le classique HTML. En effet, PHP permet par l'intermédiaire d'une instruction particulière de créer également des graphiques VRML.

Pour SVG comme pour VRML, cette possibilité de génération de contenus divers repose sur le fait que les langages à produire peuvent être décrits textuellement. L'instruction à noter comme entête du fichier PHP devant produire du contenu VRML est la suivante :

```
<?php header ("Content-type : model/vrml") ; ?>
#VRML V2.0 utf8  (entête classique d'un fichier VMRL)
contenu du modèle VRML
```

VRML n'est pas un langage à balises, le contenu du document est donc écrit directement après l'entête et rien n'indique la fin du graphique[1]. Comme pour SVG précédemment, il suffit alors d'ajouter dans le corps du graphique les balises `<?php` et `?>` pour créer un modèle 3D en prenant en compte des paramètres émanant de l'utilisateur.

Le principe de l'outil développé sur ces bases est de permettre à l'utilisateur de voir les modélisations 3D des lieux qui l'intéressent uniquement (et non plus le modèle entier systématiquement). De plus, comme nous disposons sur le site de Vianden de modèles des différentes phases historiques du château, l'utilisateur devra choisir à la fois un ou plusieurs lieux et une ou plusieurs périodes, pour afficher les parties de modèles 3D correspondantes. Ceci permet de voir dans une scène unique les modèles d'un même lieu à différentes périodes, et donc d'apprécier les évolutions architecturales du château visuellement en 3D et en profondeur, puisqu'il est possible de manipuler les modèles (zoom, rotation...) pour les examiner sous tous les angles. L'utilisateur peut donc par ce biais restituer les états successifs du site au cours de son histoire.

Partant des fichiers VRML exportés à partir de Maya®, nous avions un modèle global du château, correspondant à une phase historique particulière du site, par fichier. Pour pouvoir développer l'outil, la tâche principale a donc été le "découpage" de ces fichiers suivant les différents lieux définis dans Maya®, pour qu'il soit possible à terme d'afficher chaque lieu correspondant à chaque période individuellement. Pour effectuer ce découpage, nous avons écrit un programme PHP qui parcourt les fichiers VRML et en extrait la structure de chaque lieu et sous-lieu. En effet, comme illustré sur la Figure 8.17 au chapitre précédent, chaque lieu est repérable par son nom précédé du mot `DEF`, et son contenu est intégralement compris dans le nœud `Transform` qui suit. Sur cette base, nous avons pu placer automatiquement le code VRML correspondant à chaque lieu dans une table MySQL. Nous avons créé une table par fichier, ce qui fait que chaque table correspond à une période du site. Nous avons nommé ces tables nomperiode_lieuxVRML. Toutes les définitions d'apparences et de géométries inscrites au début de chaque fichier VRML provenant de Maya®, et réutilisées par la suite dans les structures des lieux grâce au mot `USE`, sont conservées à part dans une autre table contenant ces éléments pour toutes les périodes. Nous avons nommé cette table definitions_periodes. Ainsi, chaque lieu correspondant à chaque période est enregistré individuellement dans un tuple d'une table, ce qui va permettre par la suite de le retrouver par l'intermédiaire de requêtes

[1] contrairement aux règles de XML et c'est pour cela que X3D a été créé

SQL.

Pour permettre à l'utilisateur de composer ses propres modèles, nous avons donc programmé un formulaire PHP qui lui permet de sélectionner un ou plusieurs lieux et une ou plusieurs périodes. Les noms des lieux qui apparaissent dans le formulaire sont récupérés dans les tables précédentes, et les noms des périodes dans les noms de ces tables. L'utilisateur choisit alors un ou des lieux et une ou des périodes, et soumet le formulaire. Comme nous l'avons expliqué, chaque table correspond à une période et contient les modélisations des lieux de cette période. Il est donc indispensable que l'utilisateur sélectionne à la fois des lieux et des périodes. Lorsque l'utilisateur soumet le formulaire, nous avons programmé une fonction PHP qui écrit un nouveau fichier PHP commençant par l'entête indiquée ci-dessus (pour qu'il produise un contenu VRML), ce fichier étant composé comme suit :

- les définitions d'apparences et de géométries pour chaque période sélectionnée, qui sont récupérées par une requête sur les identifiants des périodes présents dans la table definitions_periodes ;
- les structures de chaque lieu sélectionné, qui sont récupérées par des requêtes sur les tables nomperiode_lieuxVRML de chaque période choisie.

Ce fichier (donc le modèle VRML) s'ouvre automatiquement dès la soumission du formulaire.
Si un des lieux sélectionnés n'existe pas pendant une des périodes choisies, la requête sur ce lieux sur la table de cette période ne récupère aucun élément, et rien ne s'affichera donc dans le modèle VRML pour ce lieu et cette période.
Pour pouvoir différencier les éléments de chaque période et pour pouvoir visualiser par transparence les évolutions architecturales des lieux du château, nous avons modifié les apparences des lieux dans la table definitions_periodes. Nous avons attribué une couleur à chaque période et nous avons indiqué que les éléments doivent avoir une transparence de 70%.

Ainsi, l'utilisateur sélectionne des lieux et des périodes dans le formulaire, et l'exécution de ce formulaire génère automatiquement un modèle VRML original contenant uniquement les modélisations 3D correspondantes. La Figure 9.4 illustre le fonctionnement de l'outil développé pour permettre à l'utilisateur de se créer ses propres modèles 3D à partir des modèles existants. Dans le cas présenté, nous pouvons observer les évolutions architecturales qui ont eu lieu entre *1150* et *1200* sur les lieux nommés *basse-cour*, *chapelle inférieure*, *chapelle supérieure*, *crypte*, *galerie byzantine* et *grand palais*. Une tour a par exemple été construite dans la cour, deux bâtiments (la galerie et le palais) ont été ajoutés alors qu'un autre (la crypte actuelle) qui existait en 1150 a été détruit avant 1200 pour laisser place à une terrasse.

Les deux possibilités de génération de représentations 2D et 3D originales que nous venons de détailler sont proposées à l'utilisateur dans un onglet particulier du menu général du SI. Elles permettent de compléter les représentations interactives présentées

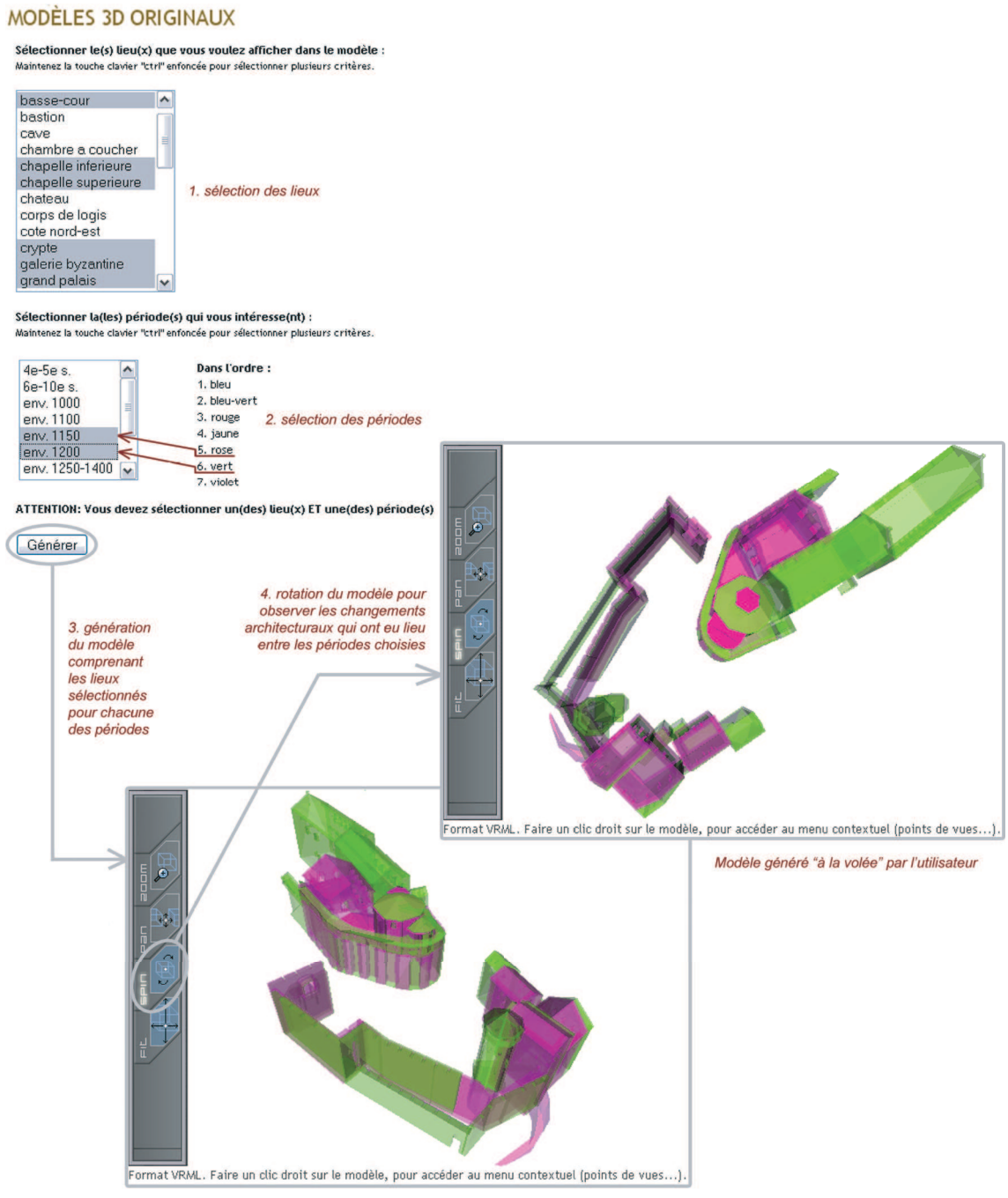


FIG. 9.4 – Procédure de génération de représentations 3D originales

précédemment, en offrant à l'utilisateur un autre moyen d'interagir avec les graphiques 2D et les modèles 3D disponibles dans la documentation du site archéologique.

Nous avons désormais expliqué toutes les fonctionnalités du Système d'Information de la conservation à la représentation des données. Nous proposons dans le dernier chapitre de ce mémoire une modélisation globale du Système d'Information incluant, en plus de la gestion des données que nous avons détaillée, les aspects spécifiques à la gestion des sites patrimoniaux et des utilisateurs du SI. Ceci nous permet finalement de proposer un modèle de Système d'Information dédié à la documentation du patrimoine.

Chapitre 10

Modélisation du Système d'Information

Pour finir ce mémoire, nous proposons dans ce chapitre un modèle global du Système d'Information que nous avons présenté. Ayant adopté une approche relationnelle pour concevoir notre SI, nous aurions pu réaliser la modélisation avec une méthode de conception et de développement de SI comme Merise. Mais nous souhaitons ouvrir notre champ d'application et montrer qu'un SI pour la documentation comme celui que nous proposons peut être conçu avec différentes techniques et différentes approches, en conservant les mêmes fonctionnalités et les mêmes concepts. Ainsi, nous proposons une modélisation basée sur les principes de l'orienté objet, qui trouvent aujourd'hui des niveaux d'applications dans le domaine de l'informatique de gestion. Pour la réaliser, nous avons utilisé UML (*Unified Modeling Language*) qui est la norme des langages de modélisation objet depuis 1997. Nous renvoyons à l'ouvrage de J. Gabay [Gabay, 2002] pour des explications détaillées des liens et différences entre Merise et UML.

10.1 Concepts de l'approche objet

Dans ce paragraphe nous présentons sommairement les principaux concepts de l'approche objet, car ce sont les fondements de l'analyse que nous avons menée pour pouvoir modéliser notre SI en UML.

Le premier concept est naturellement l'objet. Un objet représente une entité du monde réel ou virtuel (pour les objets immatériels) qui se caractérise par une identité, des états significatifs et un comportement. L'identité d'un objet est la propriété qui permet de distinguer chaque objet par rapport aux autres. L'état d'un objet correspond

aux valeurs de tous ses attributs à un instant donné, et le comportement d'un objet est défini par l'ensemble des opérations qu'il peut exécuter en réaction aux messages provenant d'autres objets.

Le deuxième concept de base est la classe. Une classe est l'abstraction d'un ensemble d'objets qui possèdent une structure identique (liste des attributs) et un même comportement (liste des opérations). Un objet est donc une instance d'une et une seule classe, et les concepts de classe et d'objet sont interdépendants. Une classe abstraite est une classe qui n'a pas d'instance.

L'approche objet se caractérise donc par une notion appelée encapsulation, qui désigne le regroupement dans une même classe, de la description de la structure des attributs et de la description des opérations. Plus précisément, les données ne sont accessibles qu'à partir des opérations définies dans la classe.

Les relations entre les classes sont appelées associations. Elles correspondent à l'abstraction des liens qui existent entre les objets du monde réel. Les cardinalités des relations sont appelées multiplicités dans l'approche objet, elles permettent de préciser le nombre d'objets participant à l'association. Il est également possible de préciser le rôle des objets qui sont associés.
Il existe une forme particulière d'association entre plusieurs classes qui est appelée agrégation. Elle exprime le fait qu'une classe est composée d'une ou plusieurs autres classes. Cette notion d'agrégation s'accompagne des notions de généralisation et de spécialisation. La généralisation de classes consiste à factoriser dans une classe appelée superclasse, les attributs et/ou les opérations des classes considérées. Si elle est appliquée à l'ensemble des classes, elle permet de réaliser une hiérarchie entre les classes. A l'inverse, la spécialisation consiste à créer à partir d'une classe, plusieurs classes dites spécialisées. Ces classes comportent, en plus des attributs ou opérations de la superclasse disponibles par héritage, des attributs ou des opérations qui lui sont propres. Une classe spécialisée est aussi appelée sous-classe. Ce mécanisme de généralisation/spécialisation facilite la réutilisation des classes.

Pour finir, le dernier concept important que nous souhaitons aborder est le polymorphisme. C'est la capacité donnée à une même opération de s'exécuter différemment suivant le contexte de la classe où elle se trouve. Ceci permet à une opération définie dans une superclasse de s'exécuter de manière différente selon la sous-classe où elle est héritée.

Nous verrons les applications de ces concepts dans le diagramme de classe que nous présenterons plus loin.

10.2 UML

UML propose un métamodèle de tous les concepts et notations associées utilisés pour réaliser une modélisation objet. Ce métamodèle est composé de neuf diagrammes qui permettent de décrire un système. Chacun de ces diagrammes correspond soit à la description d'une partie du système soit à la description du système selon un point de vue particulier. Pour les décrire brièvement, ces diagrammes sont les suivants :

- diagramme des cas d'utilisation : il est destiné à représenter les besoins des utilisateurs par rapport au système ;
- diagramme de classe : il représente la description statique du système en intégrant dans chaque classe la partie dédiée aux données et celle consacrée aux traitements. C'est le diagramme central de l'ensemble de la modélisation d'un système ;
- diagramme d'objets : il a pour but la représentation des instances des classes ;
- diagramme état-transition : il montre les différents états des objets en réaction aux événements ;
- diagramme d'activités : il donne une vision des enchaînements des activités propres à une opération ou à un cas d'utilisation ;
- diagramme de séquence : il permet de décrire les scénarios de chaque cas d'utilisation en mettant l'accent sur la chronologie des opérations en interaction avec les objets ;
- diagramme de collaboration : c'est une autre représentation des scénarios des cas d'utilisation qui met plus l'accent sur les objets et les messages échangés ;
- diagramme de composants : il représente les différents constituants logiciels d'un système ;
- diagramme de déploiement : il décrit l'architecture technique d'un système.

UML décrit les concepts et le formalisme de ces neuf diagrammes mais ne propose pas de démarche de construction. Pour modéliser notre SI, nous avons donc choisi de suivre une démarche simplifiée proposée dans [Gabay, 2002] élaborée pour la modélisation de systèmes d'information avec UML. Cette démarche est structurée en cinq étapes principales :

1. élaboration d'un diagramme de contexte du système à étudier : pour pouvoir positionner le plus précisément possible le champ du système à étudier ;
2. identification et représentation des cas d'utilisation : les besoins des utilisateurs permettent de déterminer les fonctions que le système doit intégrer. Il faut donc élaborer le diagramme des cas d'utilisation (DCU), chaque cas devant faire l'objet d'une description permettant de mieux cerner les actions remplies (scénarios) et les premières classes envisagées pour la modélisation statique (DCL) ;
3. description et représentation des scénarios : chaque scénario fait l'objet d'une description textuelle, puis est décrit sous forme graphique à l'aide du diagramme de séquence (DSE) ;
4. identification des objets et des classes : elle est fournie par la synthèse des dia-

grammes de séquence. Il est alors possible de dresser une liste de toutes les classes et éventuellement de tous les objets ;

5. élaboration du diagramme de classe : il est élaboré à partir de toutes les classes identifiées. Les classes du DCL correspondent soit à des préoccupations métier en phase d'analyse, soit à des nécessités techniques en phase de conception.

La cohérence et l'enrichissement des diagrammes sont traités par des itérations. En effet, il existe un point de validation fort entre les diagrammes de séquence et le diagramme de classe pour les opérations : pour chaque message reçu par une classe, une opération de la classe doit être prévue pour traiter ce message. Ceci permet de vérifier que toutes les classes contiennent bien toutes les opérations nécessaires pour répondre aux besoins des utilisateurs.

En suivant cette démarche, il s'agit donc d'élaborer trois types de diagrammes : le diagramme des cas d'utilisation (DCU), les diagrammes de séquence (DSE) et le diagramme de classe (DCL).

DCU. Un cas d'utilisation permet de décrire l'interaction entre les acteurs (utilisateurs du cas) et le système. La description de l'interaction est réalisée suivant le point de vue de l'utilisateur. Les cas d'utilisation constituent donc un moyen de recueillir et de décrire les besoins des acteurs du système. La représentation d'un cas d'utilisation met en jeu trois concepts : l'acteur, le cas d'utilisation, et l'interaction entre l'acteur et le cas d'utilisation. Le formalisme de base de représentation d'un cas d'utilisation est donné à la Figure 10.1.

FIG. 10.1 – Formalisme de base de représentation d'un cas d'utilisation

Afin d'optimiser les besoins en ayant recours notamment à la réutilisation de cas d'utilisation, trois relations peuvent être décrites entre cas d'utilisation : la relation d'inclusion («`include`»), la relation d'extension («`extend`») et la relation de généralisation.

DSE. Ce diagramme permet de représenter les scénarios d'un cas d'utilisation donné. Un scénario est une instance d'un cas d'utilisation. Un message reçu par un objet déclenche l'exécution d'une opération et en général renvoie un message qui correspond au résultat de l'opération. Le formalisme d'un scénario représenté par un diagramme de séquence est donné dans l'exemple type présenté sur la Figure 10.2.

DCL. Cette représentation est centrée sur le concept de classe et d'association. Chaque classe se décrit par les données et les traitements dont elle est responsable pour elle-même et vis-à-vis des autres classes. Les traitements sont matérialisés par des opérations. Un DCL représente donc les classes comprenant les attributs et

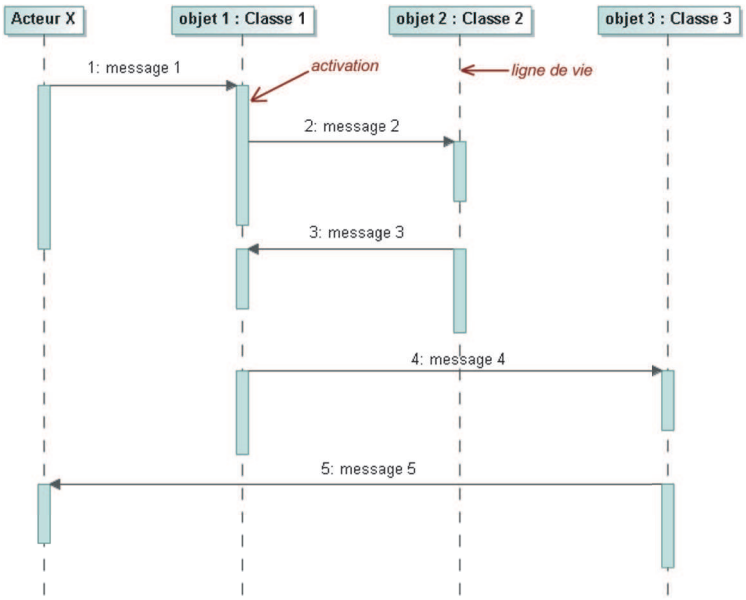


FIG. 10.2 – Formalisme du diagramme de séquence

les opérations, et les différents types d'association entre classes. Une classe se représente à l'aide d'un rectangle comportant trois compartiments de base : la désignation de la classe, la description des attributs et la description des opérations. Les classes sont manipulables en limitant le niveau de description à un nombre réduit de compartiments selon les objectifs poursuivis. La Figure 10.3 montre le formalisme général des compartiments d'une classe.

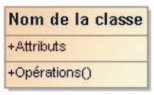


FIG. 10.3 – Formalisme général d'une classe

Un attribut est une propriété élémentaire d'une classe, qui prend une valeur pour chaque objet de la classe. Une opération est une fonction applicable aux objets d'une classe. Une opération permet de décrire le comportement d'un objet.
L'agrégation entre classes est une association qui permet de représenter un lien de type « ensemble » comprenant des « éléments ». Elle modélise donc un lien structurel entre une classe et une ou plusieurs autres classes. La composition est une relation d'agrégation particulière dans laquelle il existe une contrainte de durée de vie entre la classe `"composant"` et la ou les classes `"composé"`. Ceci signifie que la suppression de la classe `"composé"` implique la suppression de la ou des classes `"composant"`. Les formalismes de ces associations sont présentés sur la Figure 10.4, ainsi que celui de la relation spécifique de généralisation/spécialisation

qui lie des classes ayant un sous-ensemble commun d'attributs et/ou d'opérations.

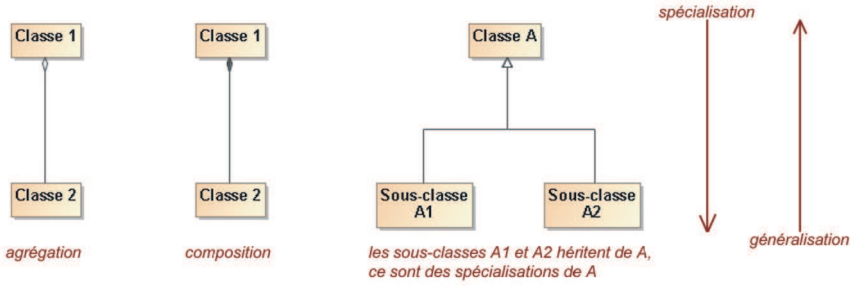


FIG. 10.4 – Formalismes de l'agrégation, de la composition et de la relation de généralisation/spécialisation

10.3 Application au SI

Nous avons utilisé les formalismes d'UML que nous venons de décrire sommairement pour mettre en œuvre la démarche d'analyse proposée par Gabay, qui nous a permis de modéliser entièrement notre Système d'Information pour la documentation de sites patrimoniaux.

Pour commencer, nous avons élaboré un diagramme du contexte du SI. Il permet de donner une vue générale de ce qu'implique la gestion d'un Système d'Information comme celui que nous avons développé.
Le Système d'Information permet la conservation de sites patrimoniaux. Chaque site est documenté par un certain nombre de données. Le SI est géré par un administrateur. Les sites et les données sont visualisables par les utilisateurs du système. L'archéologue peut gérer les sites et les données.
Les activités liées à la gestion du SI peuvent donc être regroupées en trois domaines :

- la gestion des différents sites patrimoniaux qui peuvent être intégrés dans le SI ;
- la gestion des différentes données qui documentent les sites ;
- la gestion des utilisateurs du SI.

Le diagramme de contexte est donné à la Figure 10.5.

Pour pouvoir déterminer les fonctionnalités du SI, il faut ensuite identifier les cas d'utilisation du système, c'est-à-dire les besoins des différents utilisateurs. Ces utilisateurs sont les acteurs du système. Nous en avons déterminé trois types : les administrateurs, les archéologues (ou toute personne impliquée dans la gestion d'un site et de données) et les visiteurs. Leurs besoins se répartissent dans les trois activités liées à la gestion du SI comme le montre le diagramme des cas d'utilisation à la Figure 10.6.

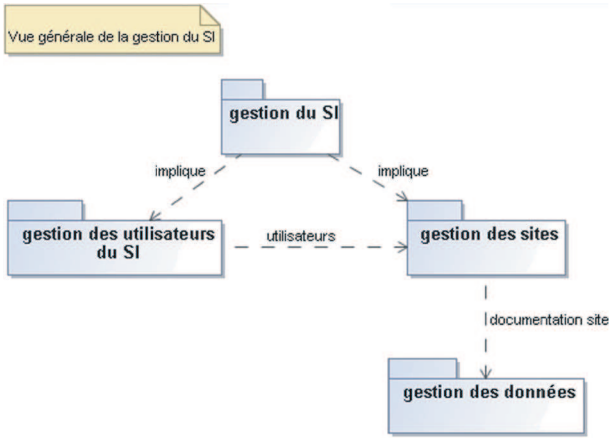


FIG. 10.5 – Diagramme de contexte du SI

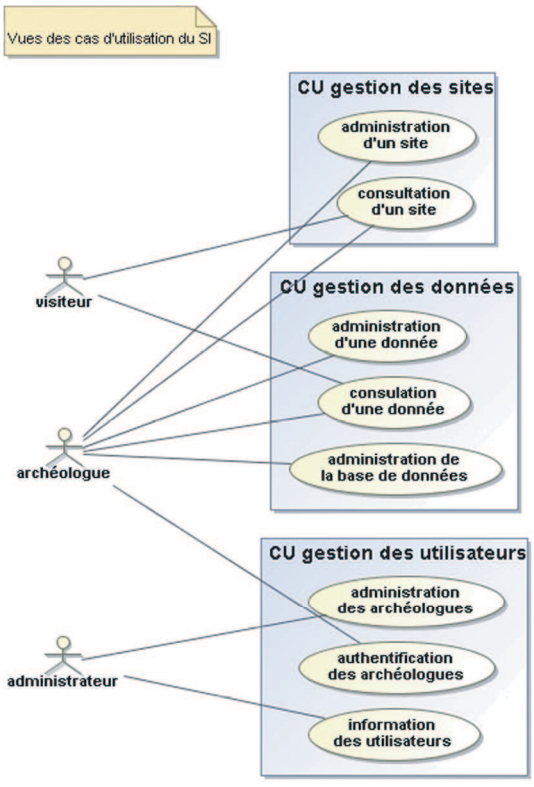


FIG. 10.6 – Diagramme des cas d'utilisation du SI

Chacun de ces cas d'utilisation implique un certain nombre d'actions que l'utilisateur doit effectuer pour pouvoir répondre à ses besoins. Nous allons détailler ces actions,

également appelées scénarios, pour chaque cas d'utilisation identifié. Chaque scénario est ensuite décrit textuellement et graphiquement par un diagramme de séquence.

Gestion des sites

Nous avons identifié deux grands cas d'utilisation (cf. Figure 10.6) :
CU1 : administration d'un site
CU2 : consultation d'un site

Scénarios
Les actions induites par la réalisation de ces cas d'utilisation sont les suivantes :
- CU1 administration du site -
S1 : création d'un site
S2 : modification et sauvegarde d'un site
S3 : suppression d'un site
- CU2 consultation du site -
S4 : visualisation d'un site

Description des scénarios
S1 création d'un site
Ce scénario consiste pour un archéologue à effectuer les actions suivantes :
- demander la visualisation de la liste des sites
- demander l'ajout d'un nouveau site en donnant son nom
- demander le transfert d'un fichier XML sur le site ou choisir de ne pas transférer de fichier XML sur le site

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.7.
Le troisième point de ce scénario est le transfert ou non d'un fichier XML sur le site. Ce fichier XML peut avoir été réalisé préalablement par l'archéologue, dans le cas où il aurait par exemple enregistré ses données dans un autre système et qu'il souhaite désormais les transférer dans le SI proposé. Ce fichier XML contient toutes les données les unes après les autres. Ces données peuvent suivre tout type de schémas XML prédéfinis (*ArcheoML* par exemple) ou non, puisqu'il suffit ensuite de modifier ces schémas suivant les règles expliquées au Chapitre 8 pour pouvoir faire des liaisons entre les données qui permettent d'utiliser les fonctionnalités développées dans le SI.
S2 modification et sauvegarde d'un site
Ce scénario consiste pour un archéologue à effectuer les actions suivantes :
- demander la modification du fichier de configuration du site
- demander la régénération du fichier XML du site à partir des fichiers XML des données
- demander la création des fichiers XML des données à partir du fichier XML du site
- demander l'envoi par courriel des fichiers XML des données

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure

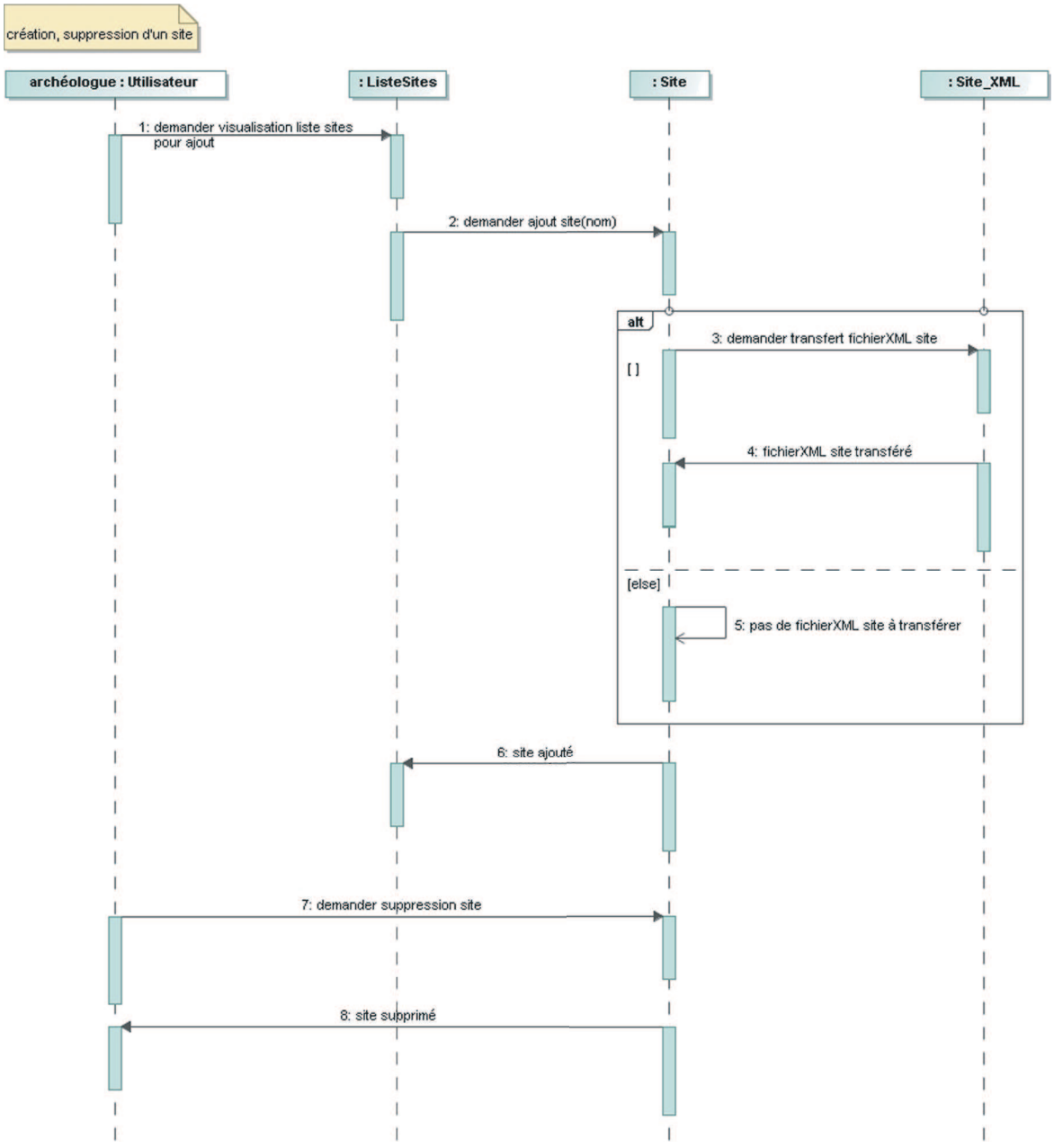


FIG. 10.7 – Diagramme de séquence décrivant la création et la suppression d'un site

10.8.

Lorsqu'un fichier XML a été transféré au départ, le troisième point de ce scénario permet de générer les fichiers XML individuels de chaque donnée, ainsi que les schémas de chaque type de donnée. Les données sont alors affichables et manipulables avec

FIG. 10.8 – Diagramme de séquence décrivant la modification et la sauvegarde d'un site

les fonctions PHP décrites dans les précédents chapitres. Il est également possible de régénérer le fichier XML global par la suite à partir des fichiers individuels de chacune des données.

S3 suppression d'un site

Ce scénario consiste pour un archéologue à effectuer les actions suivantes :
- demander la suppression d'un site

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.7 précédente.
S4 visualisation d'un site
Ce scénario consiste pour un utilisateur à effectuer les actions suivantes :
- demander la visualisation de la liste des sites
- demander la visualisation d'une instance d'un site

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.9.

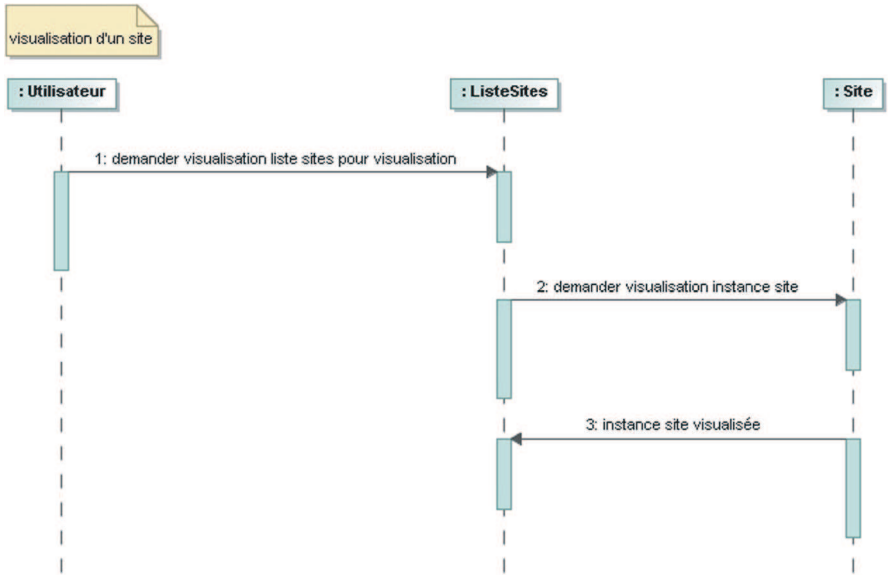


FIG. 10.9 – Diagramme de séquence décrivant la visualisation d'un site

Gestion des données[1]

Nous avons identifié trois grands cas d'utilisation (cf. Figure 10.6) :
CU3 : administration d'une donnée
CU4 : consultation d'une donnée
CU5 : administration de la base de données

Scénarios
Les actions induites par la réalisation de ces cas d'utilisation sont les suivantes :
- CU3 administration d'une donnée -
S5 : création d'une donnée

[1] Tous les scénarios cités dans cette rubrique sont détaillés dans les Chapitres 7, 8 et 9.

S6 : modification d'une donnée
S7 : suppression d'une donnée
S8 : stockage d'une donnée
S9 : génération automatique d'une donnée interactive
- CU4 consultation d'une donnée -
S10 : visualisation d'une donnée
S11 : ouverture d'une donnée
S12 : génération de vues d'une donnée
S13 : recherche d'une donnée
- CU5 administration de la base de données -
S14 : gestion de la base de données

Description des scénarios
S5 création d'une donnée
Ce scénario consiste pour un archéologue à effectuer les actions suivantes :
- demander la visualisation de la liste des données
- demander l'ajout d'une instance d'une donnée en donnant son nom
- demander la création d'un nouveau type de donnée : type simple, type hérité d'un autre type de donnée, type importé depuis les données d'un autre site

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.10.
S6 modification d'une donnée
Ce scénario consiste pour un archéologue à effectuer les actions suivantes :
- demander la visualisation de la liste des données
- demander la modification d'une instance d'une donnée
- demander le renommage d'une instance d'une donnée
- demander la duplication d'une instance d'une donnée
- demander la modification de la structure d'une donnée
- demander la définition de valeurs par défaut pour les attributs d'une donnée

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.11.
S7 suppression d'une donnée
Ce scénario consiste pour un archéologue à effectuer les actions suivantes :
- demander la visualisation de la liste des données
- demander la suppression d'une instance de donnée
- demander la suppression d'un type de donnée

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.10 précédente.
S8 stockage d'une donnée
Ce scénario consiste pour un archéologue à effectuer les actions suivantes :
- demander le transfert d'une donnée de type image
- demander le transfert d'une donnée de type graphique
- demander le transfert d'une donnée de type modèle 3D
- demander le transfert d'une donnée de type panorama

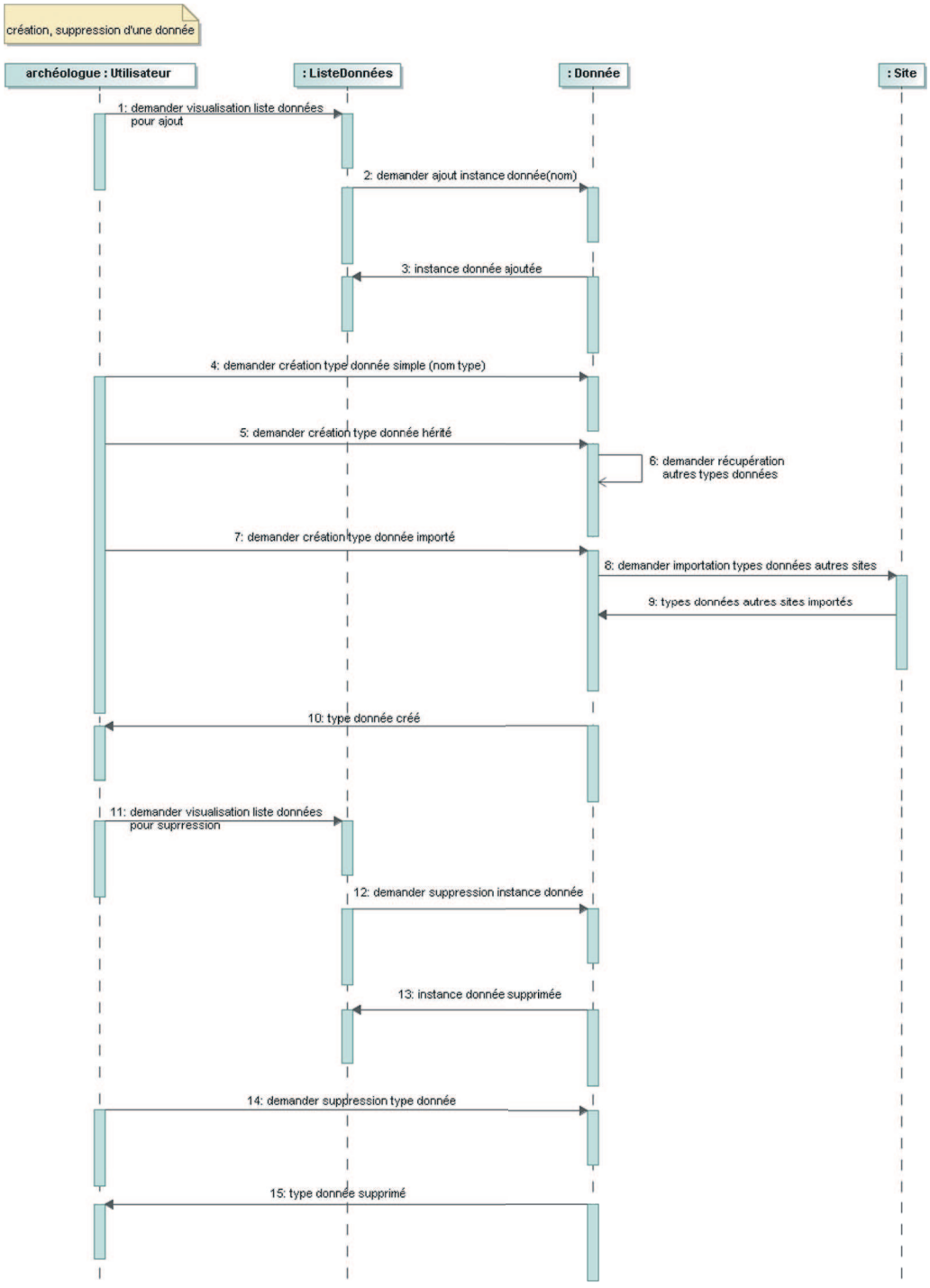


FIG. 10.10 – Diagramme de séquence décrivant la création et la suppression d'une donnée

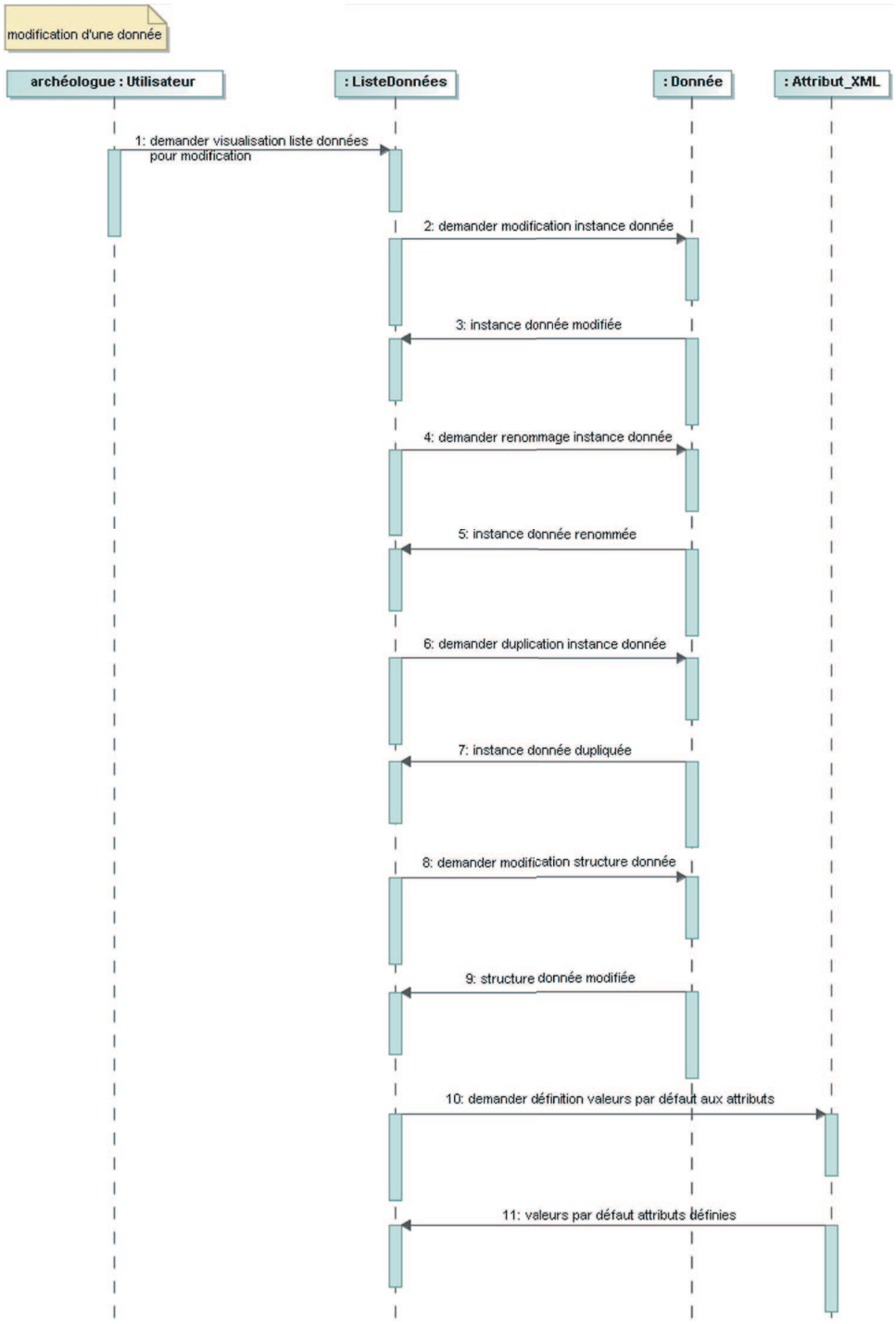


FIG. 10.11 – Diagramme de séquence décrivant la modification d'une donnée

– demander le transfert d'une donnée de type textuel

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.12.

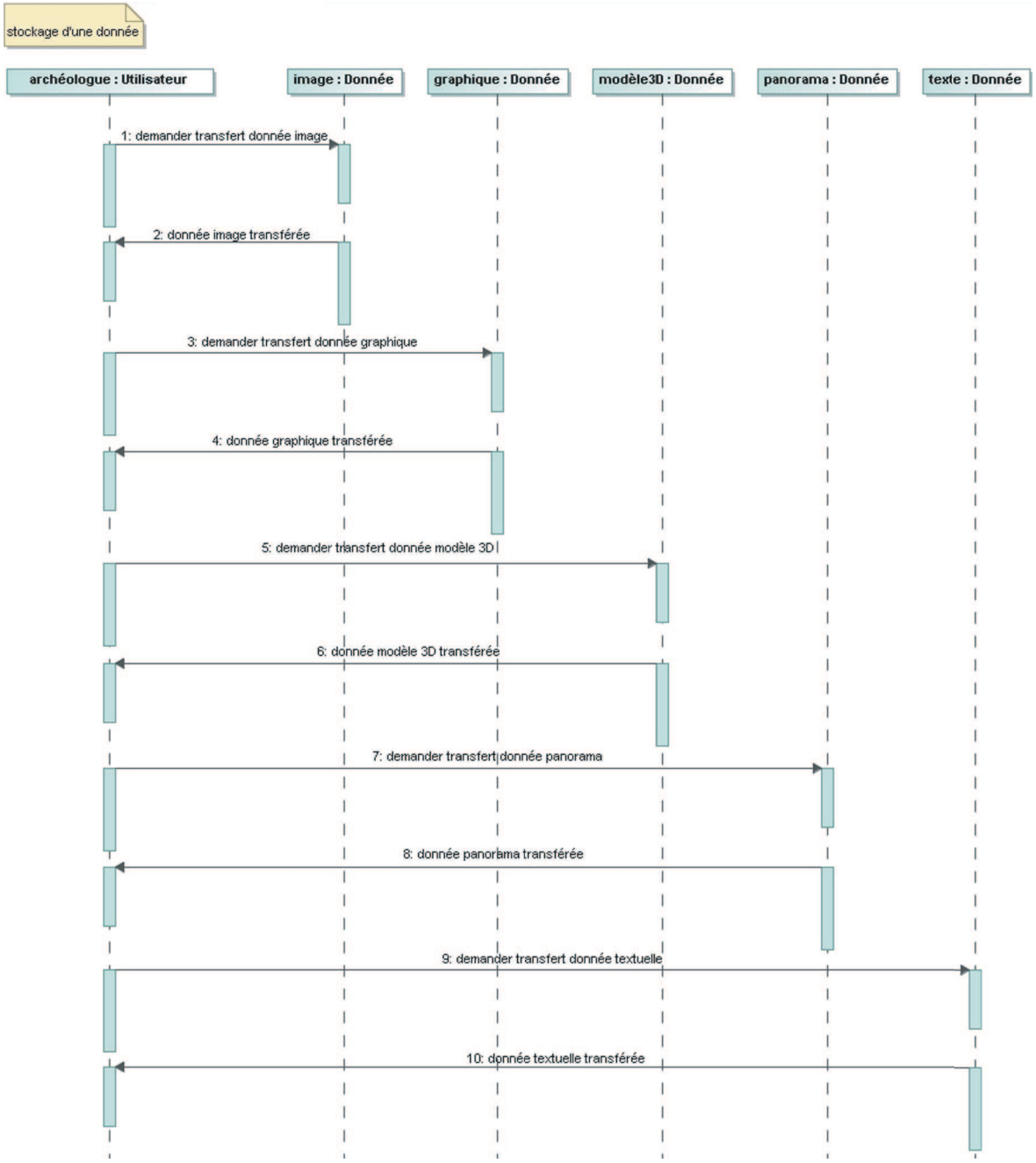


FIG. 10.12 – Diagramme de séquence décrivant le stockage d'une donnée

S9 : génération automatique d'une donnée interactive
Ce scénario consiste pour un archéologue à effectuer les actions suivantes :
- demander la génération automatique d'une donnée graphique interactif à partir d'une image
- demander la génération automatique d'une donnée modèle 3D interactif à partir d'un modèle

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.13.

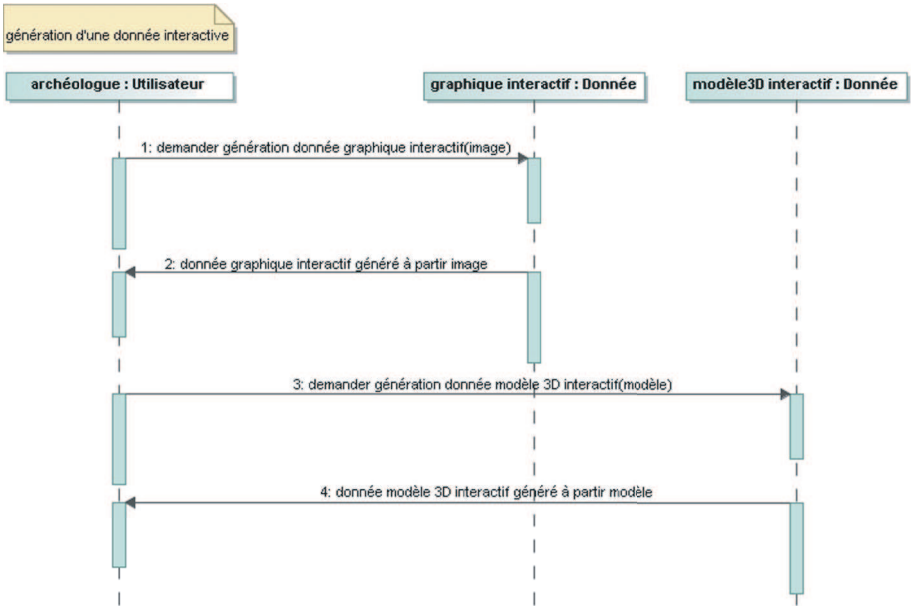


FIG. 10.13 – Diagramme de séquence décrivant la génération automatique d'une donnée interactive

S10 visualisation d'une donnée
Ce scénario consiste pour un utilisateur à effectuer les actions suivantes :
- demander la visualisation de la liste des données
- demander la visualisation d'une instance de donnée
- demander la visualisation des données liées à une instance de donnée
- demander la visualisation des sous-données d'une instance de donnée

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.14.
S11 ouverture d'une donnée
Ce scénario consiste pour un utilisateur à effectuer les actions suivantes :
- demander l'ouverture d'une donnée graphique interactif
- demander l'ouverture d'une donnée modèle 3D interactif
- demander l'ouverture d'une donnée exécutable (panorama, graphique AutoCAD, texte...)

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure

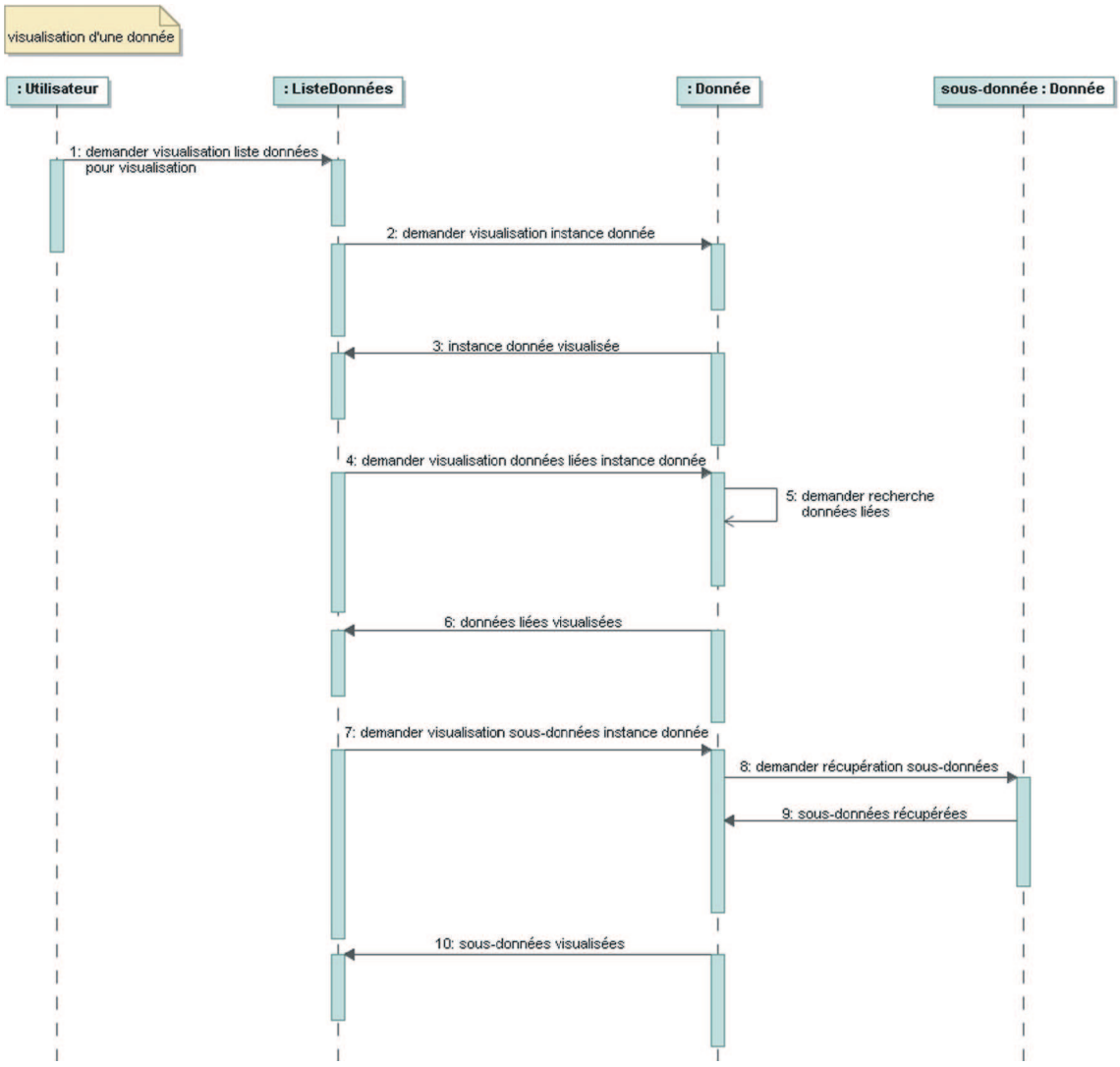


FIG. 10.14 – Diagramme de séquence décrivant la visualisation d'une donnée

10.15.

S12 génération de vues d'une donnée

Ce scénario consiste pour un utilisateur à effectuer les actions suivantes :

- demander la visualisation de la liste des données
- demander la création de vues d'une donnée dans un tableau
- demander l'affichage du corpus d'une donnée
- demander la génération d'une donnée graphique originale
- demander la génération d'une donnée modèle 3D originale

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.16.

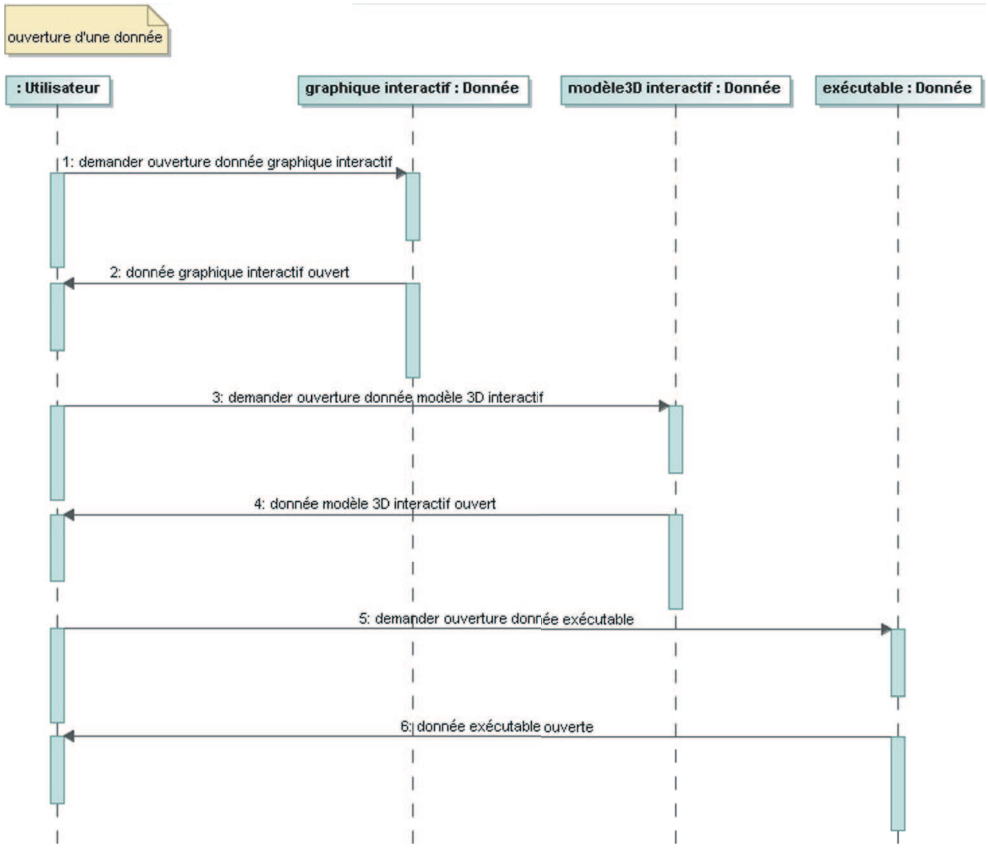


FIG. 10.15 – Diagramme de séquence décrivant l'ouverture d'une donnée

S13 recherche d'une donnée
Ce scénario consiste pour un utilisateur à effectuer les actions suivantes :
- demander la visualisation de la liste des données
- demander la recherche d'une donnée par type de donnée
- demander la recherche d'une donnée par mots-clés
- demander la recherche d'une donnée par images

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.17.
S14 gestion de la base de données
Ce scénario consiste pour un archéologue à effectuer les actions suivantes :
- demander la recréation de la structure de la BD à partir des fichiers XML des données
- demander la recréation des fichiers XML des données à partir des données de la BD
- demander l'affichage de la correspondance entre les attributs des fichiers XML des données et les colonnes de la BD

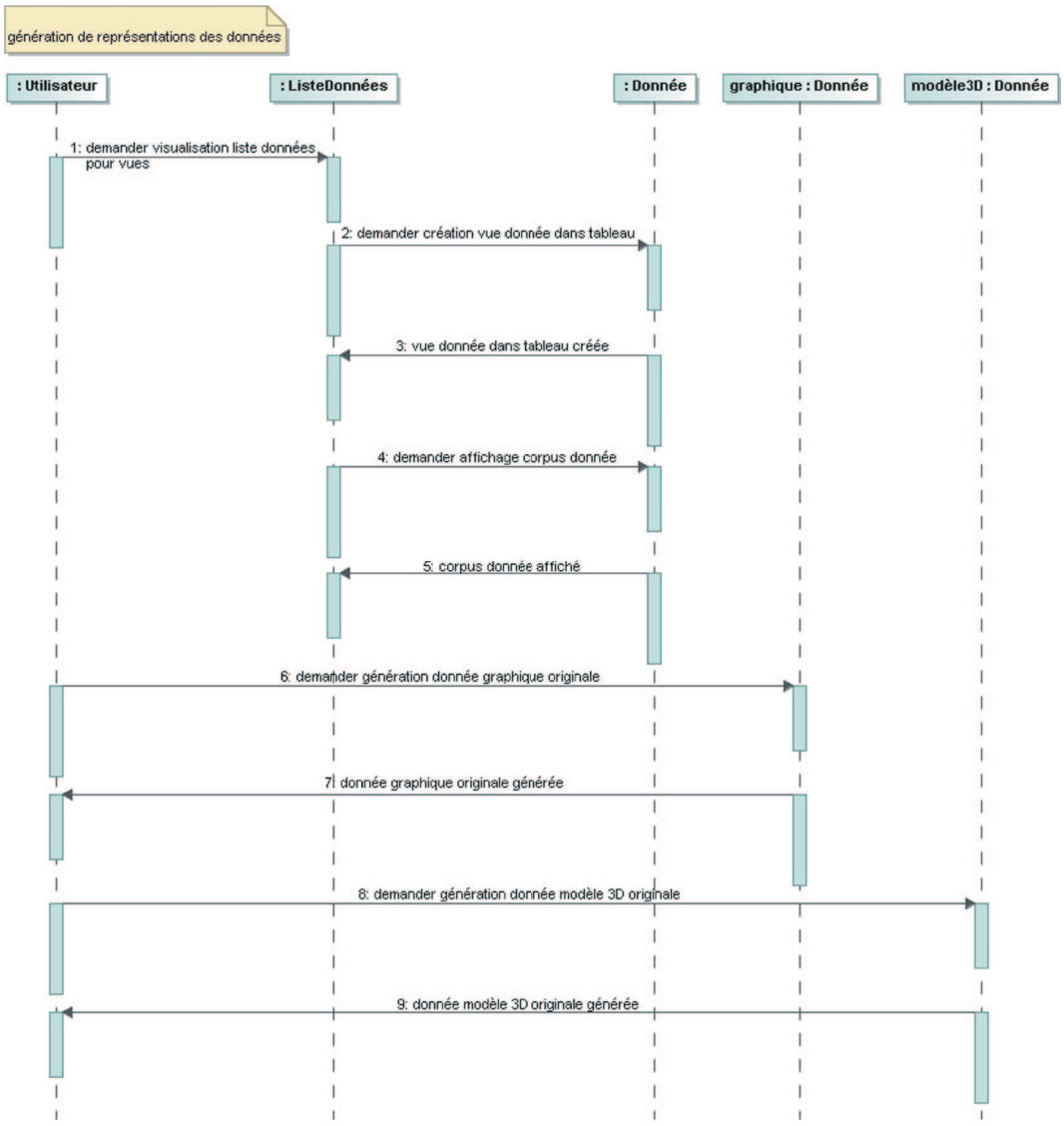


FIG. 10.16 – Diagramme de séquence décrivant la génération de vues d'une donnée

Le diagramme de séquence de ce scénario a déjà été donné à la Figure 7.8 du Chapitre 7, lorsque nous avons expliqué le pont entre les fichiers XML et la base de données MySQL.

Gestion des utilisateurs du SI

Nous avons là encore identifié trois grands cas d'utilisation (cf. Figure 10.6) :
CU6 : administration des archéologues
CU7 : authentification des archéologues

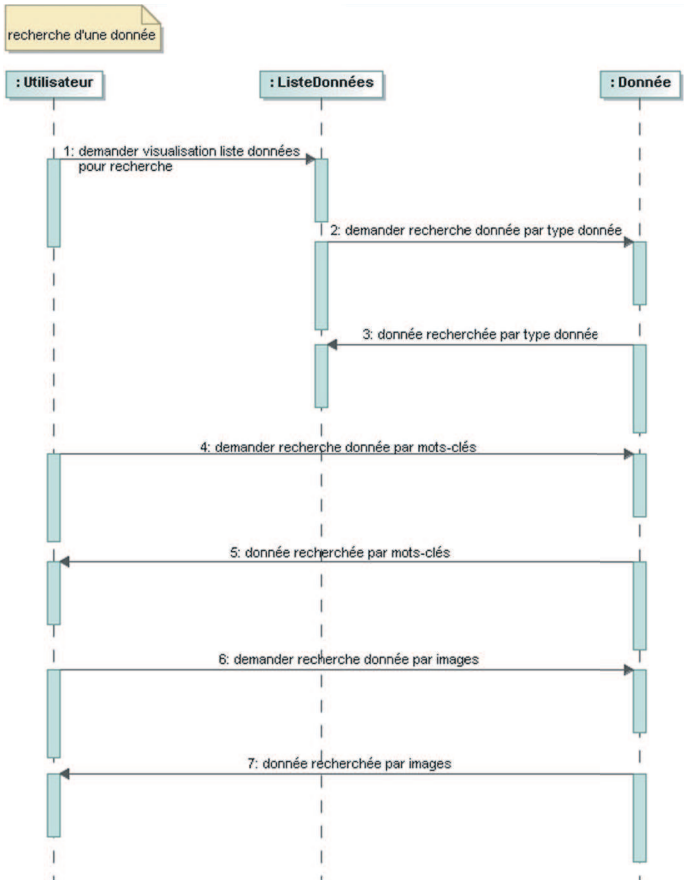


FIG. 10.17 – Diagramme de séquence décrivant la recherche d'une donnée

CU8 : information des utilisateurs

Scénarios
Les actions induites par la réalisation de ces cas d'utilisation sont les suivantes :
- CU6 administration des archéologues -
S15 : création d'un archéologue
S16 : modification d'un archéologue
S17 : suppression d'un archéologue
- CU7 authentification des archéologues -
S18 : connexion d'un archéologue
S19 : modification du mot de passe d'un archéologue
S20 : déconnexion d'un archéologue
- CU8 information des utilisateurs -
S21 : proposition d'outils d'information pour un utilisateur

Description des scénarios
S15 création d'un archéologue
Ce scénario consiste pour l'administrateur à effectuer les actions suivantes :
- demander la visualisation de la liste des archéologues
- demander l'ajout d'un archéologue par nom et mot de passe
- demander la saisie du site d'un archéologue
- demander la saisie de l'email d'un archéologue

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.18.
S16 modification d'un archéologue
Ce scénario consiste pour l'administrateur à effectuer les actions suivantes :
- demander la visualisation de la liste des archéologues
- demander le renommage d'un archéologue
- demander le changement d'email d'un archéologue

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.18 précédente.
S17 suppression d'un archéologue
Ce scénario consiste pour l'administrateur à effectuer les actions suivantes :
- demander la visualisation de la liste des archéologues
- demander la suppression d'un archéologue

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.18 précédente.
S18 connexion d'un archéologue
Ce scénario consiste pour un archéologue à effectuer les actions suivantes :
- demander la connexion par nom et mot de passe à son (ses) site(s)

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.19.
S19 modification de mot de passe d'un archéologue
Ce scénario consiste pour un archéologue à effectuer les actions suivantes :
- demander le changement de son mot de passe à l'administrateur

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.19 précédente.
S20 déconnexion d'un archéologue
Ce scénario consiste pour un archéologue à effectuer les actions suivantes :
- demander la déconnexion de son (ses) site(s)

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.19 précédente.
S21 proposition d'outils d'information pour un utilisateur
Ce scénario consiste pour un utilisateur à effectuer les actions suivantes :
- demander l'affichage de renseignements sur le SI
- demander l'affichage du plan du SI
- demander l'affichage de fichiers d'aide et de parcours utilisateurs pour l'utilisation du SI
- demander l'affichage de la FAQ du SI

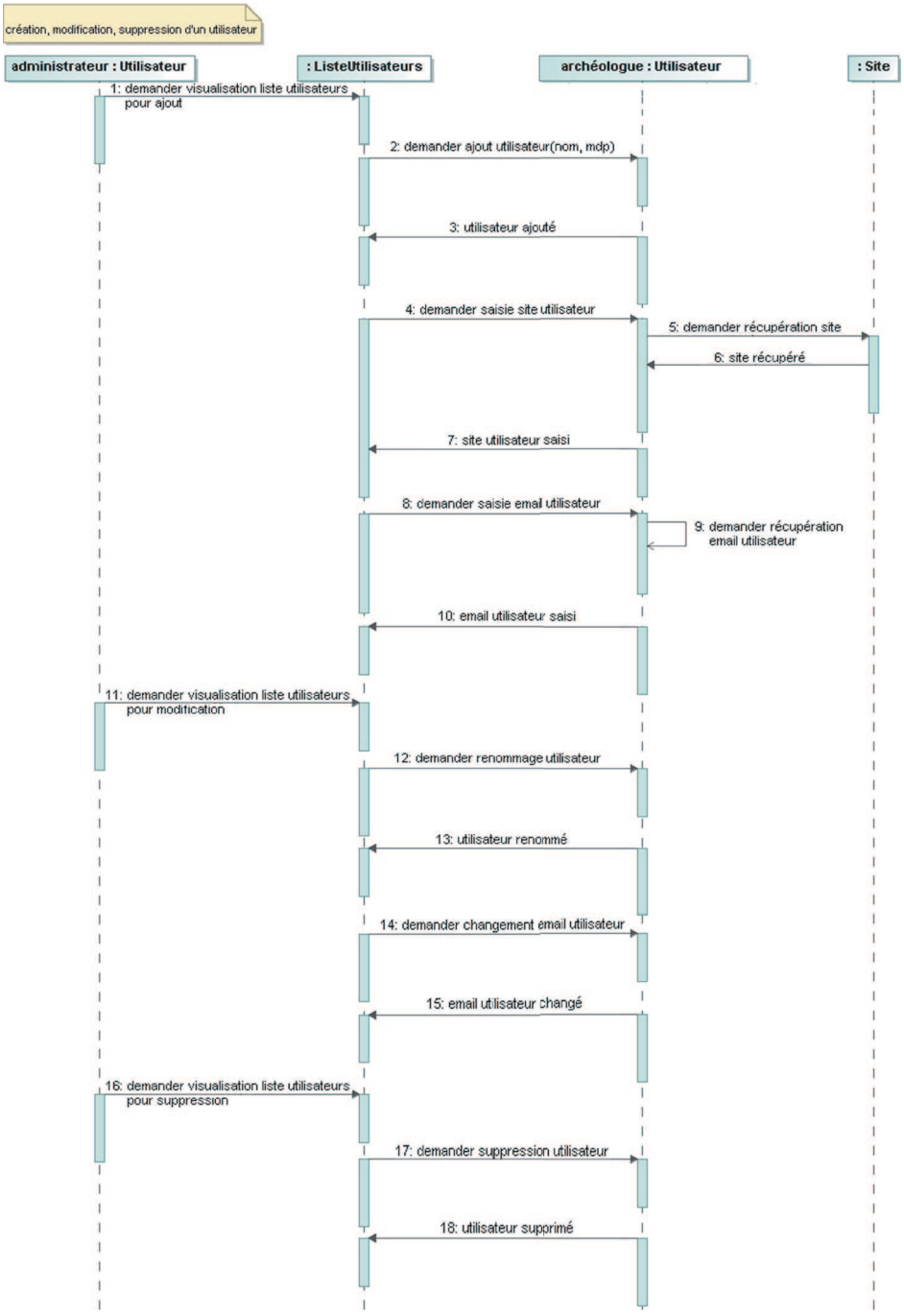


FIG. 10.18 – Diagramme de séquence décrivant la création, la modification et la suppression d'un archéologue

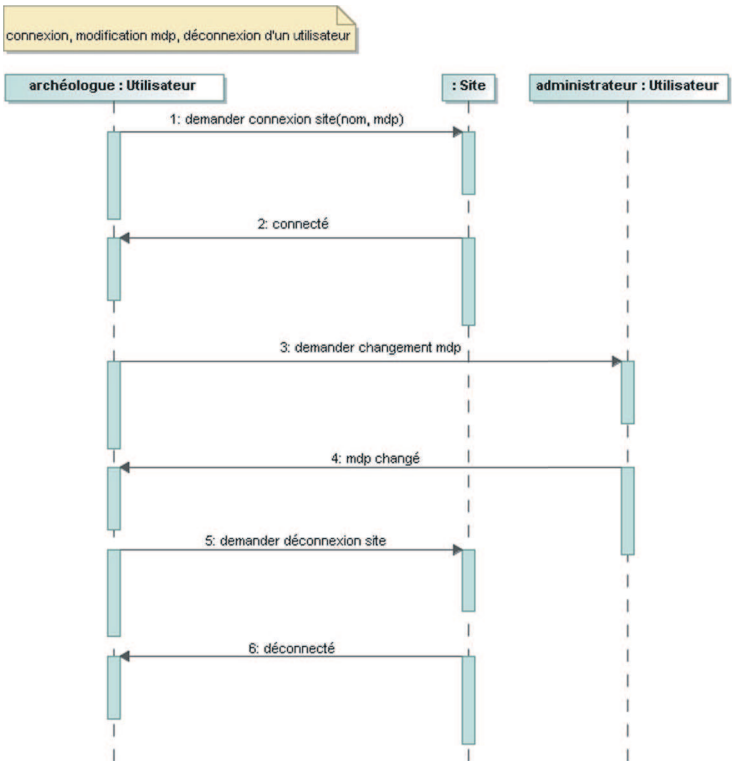


FIG. 10.19 – Diagramme de séquence décrivant la connexion, la modification de mot de passe et la déconnexion d'un archéologue

– demander à contacter l'administrateur par courriel

Ce scénario est décrit graphiquement par le diagramme de séquence donné à la Figure 10.20.

Nous ne décrirons pas dans ce mémoire les fonctions PHP développées pour permettre la gestion des utilisateurs. Ces fonctionnalités sont relativement classiques dans tout SI sur le Web et n'apportent rien de plus par rapport à notre sujet. Elles sont cependant indispensables pour le bon fonctionnement du Système d'Information et il était nécessaire de les faire apparaître dans cette modélisation globale.

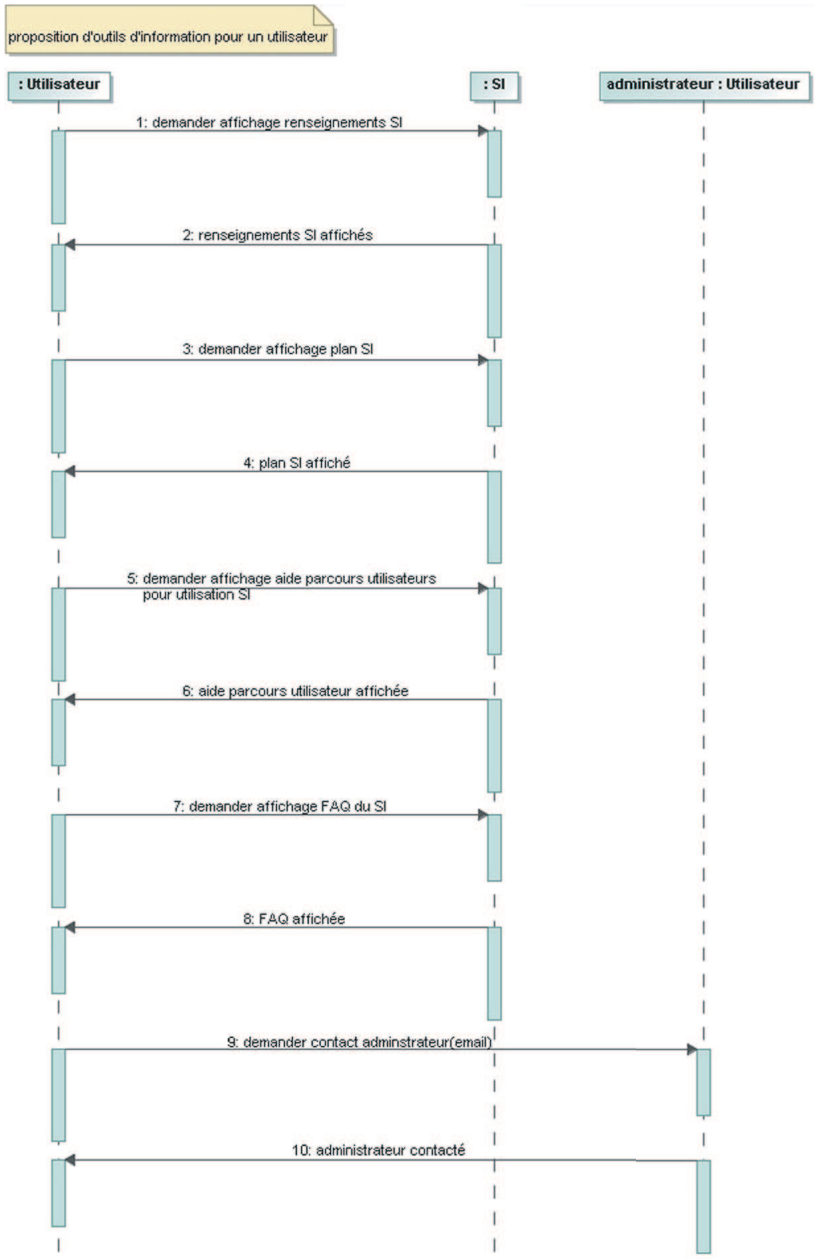


FIG. 10.20 – Diagramme de séquence décrivant la proposition d'outils d'information pour un utilisateur

Tous les diagrammes de séquence que nous avons établis permettent ensuite d'élaborer le diagramme de classe. En effet, les scénarios représentés permettent de mettre en évidence les classes suivantes (dans l'ordre d'apparition) :

- Utilisateur
- ListeSites
- Site
- Site_XML
- Config_Site
- Données_XML
- ListeDonnées
- Donnée
- Attribut_XML
- Donnée
- Base_Données
- BD_Champ
- ListeUtilisateurs
- SI

Certaines de ces classes sont abstraites, c'est-à-dire qu'elles n'ont pas d'instances propres (comme ListeSites). Ce sont les classes qui en font partie par agrégation, composition ou spécialisation qui en ont (comme Site). Ces diagrammes donnent également un aperçu des catégories de données : image, graphique (interactif), modèle 3D (interactif), panorama, texte, sous-donnée (sous-lieu et sous-période). De même pour les catégories d'utilisateur : archéologue, administrateur.
Une fois les classes provenant des diagrammes de séquence identifiées, nous pouvons déterminer les opérations qu'elles doivent permettre de réaliser. En effet, à chaque message reçu par une classe doit correspondre une opération permettant de traiter ce message. Il faut également ajouter d'autres classes pour que le modèle soit complet.

Le diagramme de classe réalisé sur cette base est donné à la Figure 10.21. On y retrouve toutes les classes citées précédemment, ainsi que les sous-classes que sont les types de données (*axonométrie*, *carte*, *coupe*...) et les sous-données (*souslieu*, *souspériode*). Pour chacune des classes sauf les sous-classes[2], nous avons développé les compartiments pour montrer les attributs et les opérations. Ces opérations correspondent aux messages reçus et émis par les classes dans les diagrammes de séquence. Celles concernant les données et bases de données ont été expliquées dans le détail dans les chapitres précédents, car elles correspondent aux fonctionnalités principales du SI. Dans la partie appelée "métamodèle XML", on peut voir clairement le double enregistrement des données en XML et dans la base de données MySQL, avec la correspondance entre les attributs XML et les champs des tables de la base de données. La partie nommée "acteurs" montre les types d'utilisateurs et les méthodes liées à leur gestion.

[2]La liste des métadonnées pour chaque type de donnée se trouve en Annexe C.

Ce diagramme de classe représente le modèle global du Système d'Information pour la documentation patrimoniale que nous proposons. En cela il peut servir de métamodèle pour la conception d'un système qui réponde aux mêmes besoins que celui que nous avons développé, mais en utilisant d'autres approches (objet par exemple) ou d'autres technologies. Nous pouvons donc ouvrir notre champ d'application à d'autres domaines que l'archéologie, comme l'architecture, le génie civil ou la conservation du patrimoine au sens large, car le modèle de SI que nous proposons est souple et ouvert. Il peut donc être utilisé pour documenter tout type de bâtiments ou de lieux, en permettant notamment de réaliser des interactions bidirectionnelles entre les utilisateurs du système et les représentations 2D et 3D des objets d'étude.

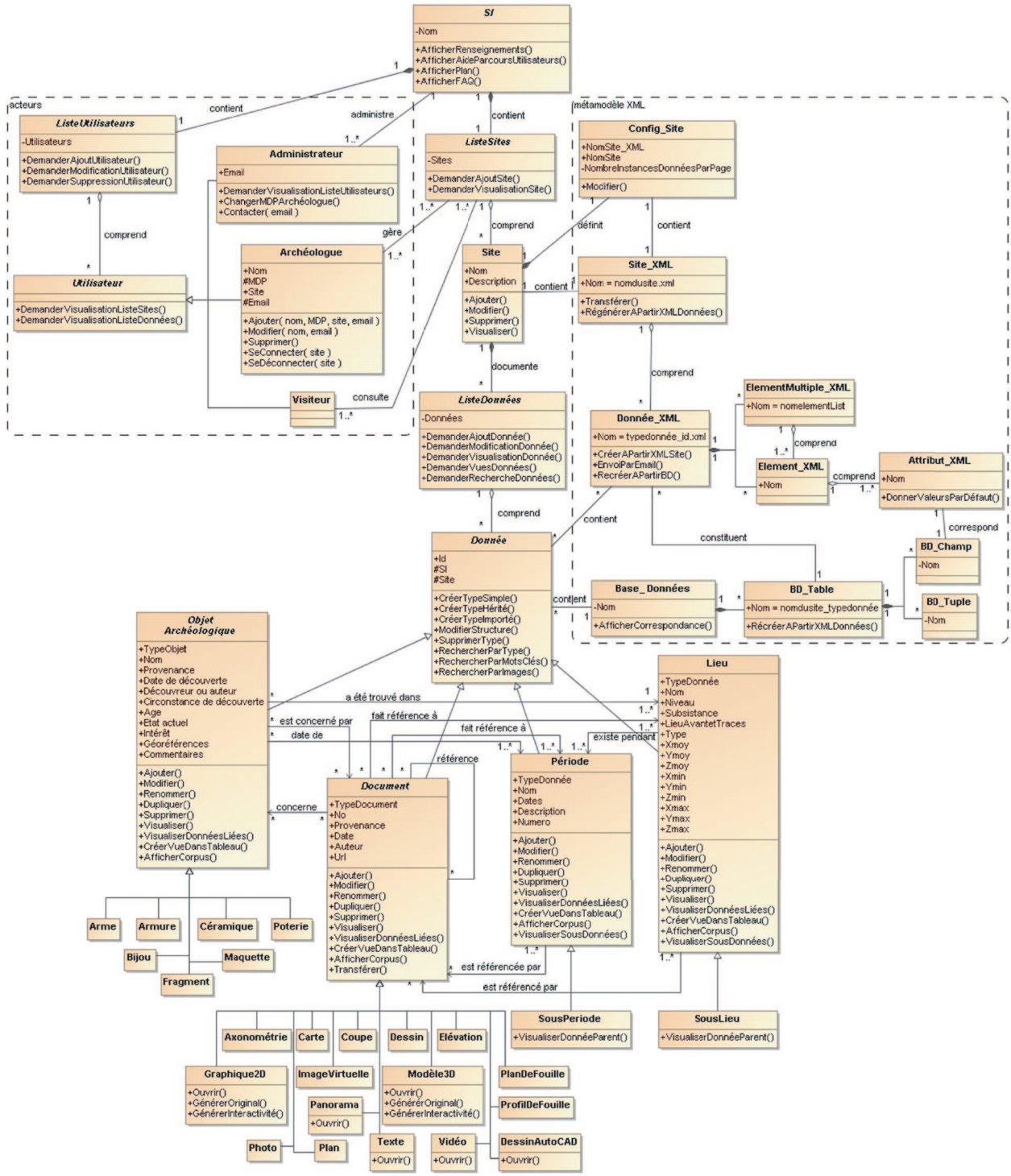


FIG. 10.21 – Diagramme de classe du Système d'Information

Conclusion générale

Bilan de la recherche

L'enregistrement du patrimoine, sa documentation et la gestion d'informations le concernant sont les activités essentielles du processus de conservation d'une ressource culturelle. Avec le développement des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC), les activités liées à la documentation du patrimoine (archéologique en particulier) évoluent rapidement et permettent d'effacer progressivement la distinction traditionnelle entre publication et archive. En effet, permettre à la communauté des conservateurs du patrimoine ainsi qu'au grand public d'accéder librement sur Internet à des ressources documentaires complètes sur des monuments architecturaux ou des sites archéologiques favorise les recherches, la planification et les échanges de connaissances, mais également l'éducation en augmentant l'intérêt du public pour la préservation du patrimoine.

C'est dans ce cadre que nous avons soutenu la thèse qu'un Système d'Information sur Internet permettant la saisie, la gestion et la représentation de ressources culturelles très hétérogènes provenant de tout type de sites patrimoniaux peut assister les professionnels du domaine pour réaliser une documentation complète de leurs travaux et pour la partager avec leurs collègues et avec le grand public.

Afin de justifier la pertinence d'un tel Système d'Information pour documenter le patrimoine archéologique en particulier, nous avons commencé par étudier les intérêts des outils essentiels à l'informatisation des ressources archéologiques. Nous avons tout d'abord souligné l'adéquation des bases de données relationnelles permettant l'enregistrement de données hétérogènes et de leurs relations, pour une conservation organisée et pérenne des données archéologiques irremplaçables. Ensuite, nous avons montré que les Systèmes d'Information Géographique sont très utilisés à une échelle territoriale en archéologie, mais qu'ils le sont moins à l'échelle d'un site. En effet, à cette échelle les données sont plus diversifiées et requièrent des Systèmes d'Information qui ne soient pas uniquement spatiaux. Nous avons mis en évidence leurs avantages indéniables pour la prise en compte de l'ensemble des données et de leurs relations (spatiales et tempo-

relles en particulier) par l'intermédiaire des traitements thématiques et interactifs qu'ils incluent. Enfin, nous avons insisté sur les outils de visualisation utilisés par les archéologues pour valoriser leurs travaux. Nous avons particulièrement souligné les intérêts liés à la possibilité de créer aujourd'hui des modèles tridimensionnels des monuments ou des sites. En effet, les modèles 3D donnent une représentation synthétique de grandes quantités d'informations résultant des études archéologiques. Il peuvent être à la fois des vecteurs de visualisation des connaissances, de navigation dans des jeux de données et d'interactivité, mais également des supports pour les phases d'interprétations des connaissances.

Cette étude des utilisations et des avantages de ces technologies dans le domaine archéologique s'est accompagnée de la mise en évidence d'un certain nombre de recommandations et de besoins des archéologues, qui ont guidé nos choix pour la conception du système. En effet, de nombreux organismes travaillent à la standardisation des pratiques informatiques en archéologie et éditent des guides pour une adaptation de ces outils technologiques à ce domaine particulier. Ces recommandations permettent donc à des personnes extérieures au monde de l'archéologie (ce qui est notre cas) de proposer des systèmes informatiques en adéquation avec les habitudes et les besoins des archéologues. Le recensement de ces besoins (cf. 3.2) nous a permis de constituer un cahier des charges pour l'implémentation de notre Système d'Information et pour les fonctionnalités à y intégrer.

En adéquation avec les attentes exprimées par les professionnels du domaine, le Système d'Information que nous avons conçu permet principalement :

- un double enregistrement souple et évolutif de tout type de données patrimoniales dans le format standard XML et dans le SGBD MySQL. Les schémas de données sont créés par l'expert en fonction de ses besoins spécifiques et modifiables à tout moment. Les données primaires (brutes) et secondaires (contextes, documents, analyses) sont intégrées, et les métadonnées les décrivant précisément sont choisies par l'expert ;
- la liaison des données sur des critères spatiaux et temporels, mais également la mise en relation des différents types de données entre eux. Ceci permet de faire des requêtes croisées sur toutes les données, et des recherches sur ces critères spatio-temporels et sur les métadonnées ;
- la transformation de graphiques 2D et de modèles 3D, faisant partie de la documentation, en interfaces privilégiées permettant d'accéder à tous les autres documents. Les graphiques et les modèles permettent alors à la fois de visualiser de grandes quantités d'informations sur le site et de naviguer de manière spatiale et temporelle dans les jeux de données conservées ;
- la représentation des données selon leur corpus ou par l'intermédiaire de vues thématiques paramétrables, et la génération de représentations 2D et 3D originales pour retrouver des parties des données originales sur des critères spatiaux et temporels. Ceci permet par exemple de modéliser en trois dimensions et "en temps réel" les évolutions architecturales du site au cours de son histoire.

Conçu avec des applications Web, l'utilisation du Système d'Information est totalement gratuite. Une fois installé sur un serveur, toutes les fonctionnalités sont utilisables en réseau par plusieurs professionnels travaillant à distance sur le même site par exemple, et il est également possible de publier les données en ligne sur Internet pour les partager avec le grand public.
Tous les formats choisis pour la conception et l'enregistrement des données sont recommandées par le *World Wide Web Consortium* ou standardisés par des normes. Ils correspondent également aux recommandations d'organismes spécialisés en archéologie comme l'*Archaeology Data Service* que nous avons souvent cité. En effet, dans leur guide sur la réalité virtuelle [Austin et al., 2002], ils dressent une liste des formats d'enregistrement et d'échange pour différents types de données :

- pour les données textuelles, ils recommandent ASCII, HTML et XML ;
- pour les bases de données, ils recommandent XML ;
- pour les données de réalité virtuelle, ils recommandent VRML et X3D ;
- pour les données images, ils recommandent TIFF et SVG.

Ainsi, les données intégrées dans le Système d'Information sont en conformité avec les standards internationaux, ce qui est important pour l'accessibilité et le partage avec un maximum d'utilisateurs.

Les apports essentiels du Système d'Information que nous proposons sont donc qu'il est simple d'utilisation, multi-utilisateurs, multi-sites et utilisable pour tout type de données documentaires. Les interactions bidirectionnelles entre l'utilisateur et les données tridimensionnelles en particulier, font des représentations 3D du site ou monument les interfaces privilégiées d'interrogation de la base de données ou de génération de modélisations originales "à la volée" selon des critères choisis par l'utilisateur. De plus, il est possible d'importer des données sous forme de fichiers XML, de sorte à profiter des fonctionnalités du système proposé pour l'exploitation d'informations qui auraient préalablement été enregistrées dans d'autres systèmes de bases de données. Enfin, toutes les données sont exportables en XML sous forme d'un fichier unique, ce qui simplifie les échanges avec d'autres institutions.

Le métamodèle du système proposé en clôture de ce mémoire permet d'ouvrir le champ d'application à d'autres domaines que l'archéologie, comme l'architecture ou le génie civil. Il permet de s'affranchir des choix technologiques effectués pour s'attacher uniquement aux fonctionnalités et aux buts du Système d'Information. La souplesse de ce modèle par rapport aux types de données et aux métadonnées illustre son adaptabilité pour la conservation du patrimoine au sens large.

L'objectif final qui a guidé notre travail a été la création d'un outil simple et accessible de partout pour tous les conservateurs de sites patrimoniaux qui veulent à la fois pouvoir gérer les quantités de données dont ils disposent et pouvoir les représenter, pour se servir de ce Système d'Information Patrimoniale comme d'une vitrine pour la valorisation, la communication et la publication électronique de leurs travaux.

Limites de notre travail

Les premières limites qu'il faut soulever sont directement liées à l'interdisciplinarité de notre travail. En effet, notre formation initiale de topographe nous a donné une approche particulière du sujet, qui n'aurait pas été la même s'il avait été traité par un archéologue ou un informaticien. Pour aboutir à une proposition de système informatique destiné à être utilisé par des archéologues, nous avons donc dû prendre connaissance à la fois de concepts archéologiques et informatiques. Ces concepts sont nombreux et complexes si l'on souhaite les traiter en profondeur. Malheureusement, dans la durée limitée d'une thèse, nous n'avons pas pu les approfondir chacun individuellement même si cela aurait été très intéressant.
Ainsi, nous ne nous sommes pas focalisés sur un type particulier de travail archéologique (par exemple la fouille) ou sur une période particulière, car nous aurions dû y être formé plus en profondeur pour pouvoir le traiter de manière adéquate. Nous sommes donc volontairement restés ouverts et vagues par rapport à ces préoccupations, de sorte à proposer un système pour la conservation du patrimoine en général, ce qui est plus dans nos attributions de départ en tant que professionnels du relevé.
De même, du point de vue de l'informatique, les choix que nous avons faits pour développer notre Système d'Information sont critiquables par rapport au fait que nous n'utilisons pas les technologies les plus récentes et les plus robustes. Nous avons choisi de proposer un système qui fonctionne avec des technologies simples et répandues, ce qui vient au détriment de la sécurité d'utilisation et des performances. De plus, pour l'instant, nous n'avons pas traité un certain nombre de problèmes comme les accès concurrents entre les utilisateurs, la robustesse des bases de données ou l'efficacité des moteurs de recherche. Nous avons réalisé le métamodèle objet en UML du système pour mettre en évidence le fait qu'il pourrait être réimplémenté par un informaticien avec d'autres concepts et technologies.

Une autre limite importante, voire essentielle, est la validation de l'outil proposé auprès des professionnels. A l'heure de rédaction de ce mémoire, nous n'avons pas encore eu le temps ni l'opportunité de faire expérimenter le Système d'Information en situation réelle. En effet, il a été difficile d'avoir assez tôt un système entièrement développé pour pouvoir le faire tester par des professionnels avant la fin du temps imparti pour la thèse. Nous n'avons donc pas encore expérimenté l'utilisation du système par des archéologues pour la documentation de leurs travaux. Par contre, nous avons des éléments de validation par rapport aux remarques et discussions que nous avons pu rassembler dans les différents congrès auxquels nous avons participé. En effet, nous avons présenté nos travaux dans des congrès dont les participants étaient principalement des archéologues, et leurs appréciations nous ont encouragé dans nos choix. De plus, nous avons montré au Service des Sites et Monuments Nationaux du Luxembourg le fonctionnement du Système d'Information et les résultats que nous avons obtenus avec les données issues des sites de Vianden et d'Echternach. Ils ont estimé le travail très intéressant et nous comptons continuer à collaborer avec eux pour qu'ils puissent documenter tous les sites

dont ils s'occupent grâce au Système d'Information que nous avons développé. Ce sera probablement la première validation du système, auquel nous allons les former et que nous allons leur installer pour qu'ils puissent l'utiliser simplement. Enfin, nous avons pu tester la clarté et la simplicité d'utilisation des fonctionnalités du système grâce aux étudiants qui ont travaillé dans le cadre de notre thèse. En effet, les étudiants, comme les archéologues qui utiliseront le système plus tard, ne connaissaient pas le système ni les formalismes utilisés. Les remarques qu'ils nous ont faites par rapport aux différents outils développés nous ont donc permis de les améliorer pour qu'ils puissent être compris et utilisés par tous.

Perspectives de développement et d'utilisation

Du point de vue du développement du Système d'Information, nous avons deux perspectives principales.

Premièrement, nous prévoyons de transformer nos schémas de données pour les mettre en conformité avec le modèle sémantique de référence CICOC-CRM (cf. 1.1.2). En effet, le CIDOC-CRM a été publié en tant que norme internationale ISO 21127 :2006. Il s'agit d'un modèle sémantique qui constitue une "ontologie" de l'information relative au patrimoine culturel, c'est-à-dire une formalisation des relations qui unissent les concepts fondamentaux de ce type d'information. Sa présentation est basée sur l'approche "orientée objet", ce qui nous rapproche également de notre idée de redéveloppement du système avec les concepts de l'approche objet. Le modèle CRM vise fondamentalement à fournir un langage commun à des gisements d'information hétérogènes et à permettre leur intégration, par delà leurs éventuelles incompatibilités tant sémantiques que structurelles. Il s'agit donc de faciliter l'échange et la recherche d'informations dans le domaine du patrimoine culturel[3]. En ce sens, l'utilisation de ce modèle pour décrire nos données pourrait conférer une valeur encore plus importante à notre Système d'Information par rapport à une application à tout type de sites patrimoniaux et par rapport à la faculté d'échange des informations qui y sont conservées. Pour effectuer cette transformation dans le modèle CIDOC-CRM, nous avons déjà suivi un atelier d'une journée donné dans un congrès par les concepteurs du modèle, destiné à former sommairement les personnes désirant décrire leurs données suivant ce modèle. Nous pensons donc être capables de conformer nos données à ce modèle relativement rapidement.

Ensuite, nous souhaiterions coupler le Système d'Information tel qu'il est aujourd'hui avec une application purement géographique. En effet, ajouter une extension de type SIG au système peut permettre des applications supplémentaires et complémentaires grâce au géoréférencement de toutes les données qui peuvent l'être (graphiques, modèles 3D). Ceci pourrait permettre de traiter des sites plus étendus et de faire des requêtes

[3]Définition de la Bibliothèque nationale de France (BnF).

spatiales sur des coordonnées et non plus uniquement sur des noms de lieux. Le couplage des technologies que nous avons utilisé pour le moment (Apache, PHP et MySQL) est en effet possible avec des systèmes de bases de données comme PostGIS, associés à un serveur géographique comme MapServer et à une interface de visualisation du type MapBlender. [Haine et al., 2006] proposent un exemple de système de ce type associant un Système d'Information à l'échelle d'un ouvrage bâti avec un SIG, le tout fonctionnant sur Internet. Nous étudierons les opportunités et les besoins de développement de cette perspective en impliquant notamment les étudiants en topographie qui sont formés au SIG spécifiquement.

Du point de vue des perspectives d'utilisation, nous pouvons citer plusieurs exemples de travaux déjà réalisés, en cours ou en projet, dans lesquels nos développements s'intègrent.

Le premier exemple d'utilisation des concepts développés dans le cadre de notre thèse a été un projet mené pour le compte de la Région Alsace par le laboratoire MAP-PAGE auquel nous sommes rattachés. La région Alsace administre 77 lycées dont le patrimoine est géré par la direction des services techniques. L'intendance de ce patrimoine vaste et hétérogène (bâtiments neufs, anciens, avec des fonctions diverses) entraîne la mise en place de méthodes de gestion et de suivi des opérations garantissant la connaissance du patrimoine immobilier et des équipements, de son état, de la gestion des demandes et des interventions. Un projet visant la mise à disposition d'outils informatiques a été lancé en 2005 pour atteindre ces objectifs. Il s'agissait, dans un premier temps, de constituer la documentation des ouvrages, de l'organiser (dans une armoire à plans numériques pour les projections classiques de la représentation de l'architecture). Ensuite, ces éléments ont dû être complétés avec une base de données métier permettant l'intégration de données issues de considérations patrimoniales à partir de l'existant. Dans la continuité, il est prévu, à partir de 2007, de se doter d'une plateforme logicielle permettant d'intégrer les informations de type graphique et alphanumérique et cela en couvrant les besoins relatifs à la gestion stratégique du patrimoine (gestion de la maintenance préventive, curative, des contrats de maintenance et d'entretien, gestion des opérations, par exemple). Dans ce cadre, nous avons mené une première expérimentation de cette plateforme sur le Lycée International de Pontonniers de Strasbourg. Nous avons créé une interface tridimensionnelle pour la gestion du lycée en trois étapes. La première correspond à une documentation complète par photogrammétrie multi-image dans Photomodeler. Elle est suivie d'une phase de définition et qualification de la géométrie dans Sketchup et AutoCAD avec les données mesurées afin d'obtenir un modèle dans le format VRML. L'intégration du modèle, ainsi que de toutes données à disposition (photographies et orthophotographies, plans, diagnostics, rapports), dans une base de données MySQL a été effectuée en dernier lieu. Le résultat permet un accès rapide et ergonomique à toutes les données relatives à la gestion du lycée par le modèle 3D visualisé dans une interface Web. Nos développements permettant de lier un modèle 3D en VRML à des données conservées dans une base de données MySQL ont donc été réutilisés dans le cadre de ce projet, comme les codes pour l'ancrage du modèle. [Alby et al., 2007]

Un deuxième exemple se situe dans le cadre des projets communs de recherche et de technologie gérés par le Programme d'Actions Intégrés (PAI) de l'association Egide. Ce projet sur deux ans (2005-2007) est mené conjointement par le MAP-PAGE et un laboratoire grec de l'Université Aristotle de Thessalonique, et a pour but le développement d'un prototype simple de système pour l'enregistrement et la gestion de fouilles archéologiques. L'outil doit permettre à terme d'effectuer rapidement et précisément le relevé, la cartographie et la documentation d'un site archéologique, en utilisant des images numériques sans altérations en recouvrement et "un navigateur 3D" convivial, donnant une vue réaliste des objets avec des capacités de mesures précises, et permettant un accès simple et interactif aux données enregistrées. De plus, les données seront prétraitées *in situ* et les tâches de traitement seront distribuées aux utilisateurs à distance. Le site de fouille sera reconstitué en trois dimensions de manière très précise (centimétrique) par photogrammétrie et la documentation résultant du relevé devra être effectuée pratiquement en temps réel. Différents rendus devront être possibles pour diverses utilisations : graphique vectoriel 3D, mosaïques d'orthophotos, modèles 3D surfaciques, visualisation des objets en 3D et modèles 3D interactifs liés avec des bases de données contenant la documentation et les données géographiques. C'est dans ce dernier axe que s'incrit la réutilisation de nos travaux. Nous sommes chargés dans le cadre de ce projet de l'enregistrement de toute la documentation disponible dans une base de données, et de l'interfaçage des modèles 3D pour qu'ils puissent servir de vecteurs privilégiés d'accès à cette documentation et données spatiales provenant des relevés photogrammétriques. Ces travaux sont actuellement en cours avec les chercheurs grecs et doivent aboutir pour début 2008. [Patias et al., 2006]

Pour finir, nous avons soumis un projet de coopération scientifique inter-universitaire (PCSI) à l'Agence Universitaire de la Francophonie dans le cadre de leur programme de "Soutien et renforcement de l'excellence universitaire". S'il est accepté, ce projet sera mené en 2008-2009 par le GRCAO (Groupe de Recherche en Conception Assistée par Ordinateur) de l'Université de Montréal, l'Académie Libanaise des Beaux Arts (ALBA) et notre laboratoire. Le titre du projet que nous souhaitons mener est "Expériences méthodologiques et validation de nouvelles orientations basées sur des dispositifs numériques pour la création d'un espace-mémoire pour des sites historiques." L'apport scientifique de ce projet de coopération inter-universitaire offrira un terrain propice au transfert de connaissances entre les trois équipes, dont l'expertise est multidisciplinaire, tout en resserrant les liens déjà établis et il devrait induire des avancées importantes dans le domaine du patrimoine et des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC). Ce projet d'expériences méthodologiques pour des sites historiques sera un véritable laboratoire de création de lieux d'émergence et de nouvelles approches de mise en valeur de la "mémoire" d'un lieu. Plusieurs sites patrimoniaux au Liban et dans différentes villes à travers le monde pourront profiter des résultats de ce projet de recherche partagé qui permettra le développement d'une plus grande coopération entre universités du Nord et du Sud. L'idée de ce projet de recherche est le résultat d'une synergie engendrée à la suite d'une expérience acquise par le GRCAO dans un projet

de recherche sur le site de Byblos [De Paoli et El-Khoury, 2006] et des travaux réalisés dans le cadre de notre thèse pour le développement du Système d'Information dédié à la documentation du patrimoine que nous avons présenté. Ce projet propose alors des expériences méthodologiques pour définir et valider de nouvelles orientations dans la manière de comprendre, de structurer et de transférer les connaissances acquises sur un complexe monumental donné.

Ce projet de recherche et de formation à la recherche vise dans un premier temps, l'étude de méthodes innovantes pour la préparation de la plate-forme de communication virtuelle, et dans une deuxième étape le développement d'une structure d'information nécessaire pour les expériences méthodologiques, avec les partenaires du projet et les chercheurs universitaires. Cette approche qui rallie les domaines des beaux-arts, des communications et de l'informatique, permettra une synergie autour de l'élaboration d'un nouveau procédé pouvant avoir une répercussion importante sur les outils de restitution et de représentation de l'environnement bâti. À ce propos notre travail de thèse sera complémentaire aux travaux d'une doctorante de Montréal, qui met l'accent sur la définition et le développement d'espaces d'information et de nouvelles méthodes de modélisation numérique. Ces méthodes seront accompagnées d'une flexibilité d'organisation, de présentation et de traitement des diverses connaissances impliquées dans les processus de compréhension d'un patrimoine. Plus précisément, nous souhaitons proposer de nouvelles façons de structurer et de décrire les informations d'un processus pour révéler et rendre disponible l'évolution d'un savoir-faire et des modes de vie anciens. En effet, le relevé des arts et monuments antiques est une activité préalable essentielle avant tout essai de compréhension et de reconstitution en archéologie, mais peu d'outils informatiques adaptés sont mis à la disposition des archéologues et de leurs équipes. L'objectif est de développer des outils de mesure, de compréhension, de représentation et de gestion du patrimoine archéologique à partir des techniques photogrammétriques et lasergrammétriques. Ces travaux permettront de contribuer à l'évolution des méthodes de travail sur le terrain (fouilles, relevé, archivage) ainsi qu'à la gestion, la normalisation, l'exploitation des données et leur représentation dans un Système d'Information Patrimoniale.

C'est avec ces objectifs que nous avons développé notre Système d'Information et nous espérons que ce projet nous permettra de l'utiliser en situation réelle et de valider les outils développés dans le cadre de cette thèse.

Glossaire

Termes[4] **:**

Base de données : ensemble structuré d'éléments d'information, généralement agencés sous forme de tables, dans lesquels les données sont organisées selon certains critères en vue de permettre leur exploitation.

Conservation : garde des documents et ensemble de mesures adoptées pour les protéger. Préservation des documents d'archives et ensemble des mesures prises pour leur sauvegarde en vue de leur consultation.

Documentation : collecte et traitement permanents et systématiques de l'information enregistrée permettant son stockage, sa recherche, son utilisation ou sa transmission. Travail spécialisé consistant à rechercher, sélectionner, classer, diffuser et conserver tous documents portant sur un ensemble de sujets ou un sujet particulier. La réunion, le classement et la diffusion de connaissances fixées à un support, en tant que constituant une activité homogène ou intégrée.

Entité : réalité abstraite considérée comme un être autonome, capable d'agir auprès d'un système, notamment pour une demande d'accès ou de service. Élément représentant un phénomène (personne, concept, événement) et qui peut être traité comme une unité indépendante ou un membre d'une catégorie particulière, et à propos duquel des données peuvent être stockées.

Identifiant : tout nom, caractère ou indicatif caractérisant une donnée et permettant de l'identifier ou de la reconnaître comme telle dans toute technique de recherche.

Image de synthèse : image fixe ou animée, généralement tridimensionnelle, qui est créée par ordinateur, exclusivement à l'aide de calculs mathématiques définissant sa structure et sa texture.

Instance : objet créé, en programmation orientée objet, sur le modèle de la classe à laquelle il appartient.

Interactivité : propriété d'un programme informatique qui permet à l'utilisateur d'interagir avec le système en modifiant le déroulement ou le contenu du programme.

Interface : ensemble des moyens qui permettent la connexion et l'interrelation entre le matériel, le logiciel et l'utilisateur. Ensemble de la conception graphique qui permet à l'utilisateur de se servir d'un ordinateur, cartes, connecteurs et autres dispositifs qui re-

[4] `http://www.granddictionnaire.com` [réf. du 02 juillet 2007]

lient les composants de l'ordinateur, pilote capable de convertir des formats de fichiers, etc.
INTERGICIEL : logiciel qui sert d'intermédiaire transparent entre des applications appartenant à des systèmes hétérogènes liés en réseau, lesquels entretiennent le plus souvent des relations basées sur le modèle client-serveur.
LASERGRAMMÉTRIE : technique consistant à effectuer des relevés topographiques en trois dimensions à l'aide d'un scanner laser.
LOGICIEL : ensemble des programmes destinés à effectuer un traitement particulier sur un ordinateur. Le logiciel est nécessaire au matériel pour gérer les données.
MÉTADONNÉE : donnée qui renseigne sur la nature de certaines autres données et qui permet ainsi leur utilisation pertinente.
MÉTAMODÈLE : modèle de niveau supérieur à une première modélisation logicielle ayant pu être réalisée auparavant. Un métamodèle sert à exprimer les concepts communs à l'ensemble des modèles d'un même domaine.
MONDE VIRTUEL : représentation numérique d'un environnement en 3D, imitant le monde réel ou proposant un monde imaginaire, dans lequel on peut évoluer de façon interactive.
MONDE VRML : monde virtuel en 3D composé d'un ensemble de scènes VRML, qui est affichable dans le Web et dans lequel on peut se déplacer.
NAVIGATEUR : logiciel client capable d'exploiter les ressources hypertextes et hypermédias du Web ainsi que les ressources d'Internet dans son ensemble, qui permet donc la recherche d'information et l'accès à cette information.
ONTOLOGIE (informatique) : ensemble d'informations dans lequel sont définis les concepts utilisés dans un langage donné et qui décrit les relations logiques qu'ils entretiennent entre eux.
ORTHOPHOTOGRAPHIE : technique de traitement d'image qui consiste à corriger les distorsions apparaissant sur les photographies aériennes de la zone traitée, de manière à représenter la surface du sol par un document ayant à la fois l'aspect d'une image photographique et les qualités métriques d'un plan topographique. Ortho-image obtenue à partir d'une ou de plusieurs photographies aériennes, en corrigeant les déformations perspectives causées par l'inclinaison des axes de prise de vue, par la distorsion de l'objectif et par le relief.
PARSEUR : programme de traitement du langage qui, à partir d'un texte en langue naturelle, aboutit à une représentation intermédiaire du sens de ce texte.
PATRIMOINE : Culturel, historique : ensemble des richesses d'ordre culturel ou historique appartenant à une communauté et transmissibles d'une génération à une autre. Architectural : bâtiments, monuments et ensembles d'urbanisme considérés comme méritant d'être conservés et protégés.
PHOTOGRAMMÉTRIE : technique permettant, à partir d'un couple stéréoscopique de photographies ou à partir de plusieurs photographies convergentes, d'étudier et de définir avec précision les formes, les dimensions et la position dans l'espace d'un phénomène quelconque. La photogrammétrie permet, notamment, l'établissement des cartes topographiques modernes en prenant comme base des photographies aériennes.
RÉALITÉ VIRTUELLE : technologie permettant une simulation interactive et en temps

réel de la réalité, par la création par ordinateur, à l'aide d'images de synthèse, d'un environnement virtuel en 3D dans lequel on peut évoluer, et donnant l'impression d'une immersion dans un monde réel.
RECONSTITUTION, RESTITUTION (termes utilisés indifféremment) : figuration d'un monument ou d'un ouvrage, par des dessins, des images virtuelles ou des modèles 3D, tel qu'il existait à son origine.
RECONSTRUCTION : action de construire un ou plusieurs nouveaux bâtiments à l'emplacement d'un ou plusieurs bâtiments sinistrés, endommagés, ruinés.
REPRÉSENTATION GRAPHIQUE : image ou dessin produit sur un dispositif graphique et qui illustre un objet ou une scène. Transformation de données géométriques en un modèle graphique.
STANDARD : se dit de produits matériels ou logiciels dont la conception et la réalisation ont été effectuées à partir de spécifications techniques reconnues dans le but d'uniformiser. Ensemble de règles techniques propres à une organisation ou à une industrie ou communes à des organisations et des industries qui, pour des raisons d'expérience pratique, sont devenues des références pour la production de biens livrables, la prestation de services, la réalisation de processus divers ou la description de savoir-faire.
SYSTÈME D'INFORMATION : système constitué des ressources humaines (le personnel), des ressources matérielles (l'équipement) et des procédures permettant d'acquérir, de stocker, de traiter et de diffuser les éléments d'information pertinents au fonctionnement d'une entreprise ou d'une organisation.
VISUALISATION : représentation temporaire sur un écran des résultats d'un traitement d'informations. Procédé de visualisation qui permet de faire apparaître un graphique ou des caractères sur un écran.

Sigles :
ADS : *Archaeology Data Service.*
CAO : Conception Assistée par Ordinateur.
CIDOC : Comité International pour la DOCumentation du conseil international des musées.
CIDOC-CRM : Modèle conceptuel de référence (Conceptual Reference Model CRM) du Comité International pour la DOCumentation du Conseil international des musées.
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique.
CRM : *Cultural Resource Management.*
CSA : *Center for the Study of Architecture/Archaeology.*
SCA : *Supreme Council of Antiquities* (Conseil Suprême des Antiquités Égyptiennes).
DAO : Dessin Assisté par Ordinateur.
DC : *Dublin Core Metadata Element Set.*
DRASSM : Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines.
EAD : *Encoded Archival Description.*
EPF : École Polytechnique Fédérale.
EPOCH : *The European Research Network of Excellence in Open Cultural Heritage.*
FISH : *Forum on Information Standards in Heritage.*

GCI : *Getty Conservation Institute.*
GPR : *Ground-penetrating radar.*
GRI : *Getty Research Institute.*
IADB : *Integrated Archaeological DataBase.*
INRIA : Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique.
IRD : Institut de Recherche pour le Développement.
IRHT : Institut de Recherche et d'Histoire des Textes.
JISC : *Joint Information Systems Committee.*
JRE : *Java Runtime Environment.*
JWS : *Java Web Start.*
LCD : Language de Contrôle de Données.
LDD : Language de Description de Données.
LMD : Language de Manipulation de Données.
MCD : Modèle Conceptuel de Données.
MDA : *Museum Documentation Association.*
MGE : *Modular GIS Environment.*
MNT : Modèle Numérique de Terrain.
NSDL : *National Science Digital Libraries.*
NDSU ATL : *North Dakota State University Archaeology Technologies Laboratory.*
OGC : *Open Geospatial Consortium, Inc.*
RKMS : *RecordKeeping Metadata Schema.*
SFPT : Société Française de Photogrammétrie et Télédétection.
SGBD : Système de Gestion de Base de Données.
SGBDR : Système de Gestion de Base de Données Relationnelles.
SI : Système d'Information.
SIG : Système d'Information Géographique.
SIMES : Système d'Information Multimédia pour l'Environnement Sub-saharien.
SMA : *Society of Museum Archaeologists.*
SSMN : Service des Sites et Monuments Nationaux.
SVG : *Scalable Vector Graphics.*
UCLA : *University of California in Los Angeles.*
UMR : Unité Mixte de Recherche (CNRS).
VRML : *Virtual Reality Modeling Language.*
W3C : *World Wide Web Consortium.*
X3D : *eXtensible 3D.*
XML : *eXtensible Markup Language.*
YAT : *York Archaeological Trust.*

Bibliographie

[Alby et al., 2007] Alby, E., . Meyer, P. Grussenmeyer, et M. Rampazzo : 2007, 'Gestion d'ouvrage architectural : de la saisie photogrammétrique à l'interface 3D d'accès aux données patrimoniales'. *Revue XYZ (Association Française de Topographie)* (110), 45–53.

[Arlaud et al., 1993] Arlaud, C., M. Hammache, et J.-M. Lurol : 1993, 'Les fouilles de la Presqu'île à Lyon'. *Archéologia* **294**, 58–66.

[Arroyo-Bishop et Lantada Zarzosa, 1995] Arroyo-Bishop, D. et M. Lantada Zarzosa : 1995, 'To be or not to be : will an object-space-time GIS/AIS become a scientific reality or end up an archaeological entity ?'. *Archaeology and Geographical Information Systems : a European Perspective* pp. 43–54. Lock, G., and Stani, Z. (eds.), Taylor and Francis, London.

[Aubry et al., 2004] Aubry, L., P. Blanc, O. Daune-Lebrun, et V. Laniepce : 2004, 'Avant-propos de la table ronde "Villes et SIG : Quels sont les besoins en géomatique de l'archéologie urbaine ?"'. *Cahier V - 2003/2004, Table ronde - Villes et SIG : Quels sont les besoins en géomatique de l'archéologie urbaine ? : Autour du thème 7 et du thème 8* pp. 265–266. `http://www.mae.u-paris10.fr/arscan/Cahiers/FMPro?-db=cahiers.fp5&-format=detailfasc.htm&-lay=cahiers&Theme=geomatique*&-recid=33145&-find=` [réf. du 21 mars 2007].

[Austin et al., 2002] Austin, T., R. Beach, K. Allen, A. Bergstrom, S. Exon, M. Fabri, C. Fencott, K. Fernie, M. Gerhard, C. Grout, S. Jeffrey, L. Sites, A. McCall, M. Pringle, J. Richards, D. Robinson, N. Ryan, et M. Terras : 2002, 'Creating and Using Virtual Reality : a Guide for the Arts and Humanities [En ligne]'. Kate Fernie and Julian D. Richards (eds.), Arts and Humanities Data Service (AHDS), University of York, King's Manor, York. Endorsed by the Council for British Archaeology, `http://vads.ahds.ac.uk/guides/vr_guide/index.html` [réf. du 23 avril 2007].

[Autran, 2001] Autran, J. : 2001, 'Analyse des Processus d'Urbanisation et Systèmes d'Information Géographique - Construction de bases de données historiques et visualisation cartographique'. Rapport de Recherche de l'UMR MAP 694 CNRS.

[Banning, 1993] Banning, E. B. : 1993, 'Hypermedia and archaeological publication : The Wadi Ziqlab project'. *Computing the Past. CAA92 : Computer Applications and*

Quantitative Methods in Archaeology pp. 441–447. Andresen, J., Madsen, T., and Scollar, I. (eds.), Aarhus University Press, Aarhus.

[Barcelò et al., 2004] Barcelò, J., O. De Castro, D. Travet, et O. Vicente : 2004, 'A 3D Model of an Archaeological Excavation'. *The Digital Heritage of Archaeology. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 2003.* Doerr, M., and Sarris, A. (eds.), Hellenic Ministry of Culture. Archive of Monuments and Publications.

[Barcelò, 2000] Barcelò, J. A. : 2000, 'Visualizing what might be. An introduction to virtual reality techniques in archaeology.'. *Virtual Reality in Archaeology.* J.A. Barcelò, D. Sanders, M. Forte (eds), Archéopress, Oxford.

[Barge et al., 2004] Barge, O., X. Rodier, G. Davtian, et L. Saligny : 2004, 'L'utilisation des systèmes d'information géographique appliquée à l'archéologie française'. *Revue d'Archéométrie* **28**, 15–24.

[Bishop et al., 1998] Bishop, M. H., C. Gray, et G. Palumbo : 1998, 'New Documentation Technologies at the Getty Conservation Institute [En ligne]'. CRM Online, Bringing the Past into the Future : New Technologies for CRM 21(5). `http://crm.cr.nps.gov/archive/21-5/21-5-21.pdf` [réf. du 09 mai 2007].

[Biswell et al., 1995] Biswell, S., L. Cropper, J. Evans, V. Gaffney, et P. Leach : 1995, 'GIS and excavation : A cautionary tale from Shepton Mallet, Somerset, England'. *Archaeology and Geographical Information Systems : A European Perspective* pp. 269–285. Lock, G., and Stani, Z. (eds.), Taylor and Francis, London.

[Blaise et al., 1999] Blaise, J., P. Drap, et I. Dudek : 1999, 'An architectural model compiler dedicated to archaeological hypothesis. An experiment on Krakow's kramy Bogate'. *Actes de la conférence HCP'99, Human Centered Processes.*

[Blaise et al., 2005] Blaise, J.-Y., F. Ameziane, P. Bénistant, I. Dudek, et A. Durand : 2005, 'Multi-représentations dans un système d'informations sur le patrimoine architectural et urbain pour le réseau Internet'. Rapport de Recherche de l'UMR MAP 694 CNRS.

[Blaise et al., 2004] Blaise, J.-Y., F. De Domenico, L. De Luca, et I. Dudek : 2004, 'Acquisition de données vs gestion de connaissances patrimoniales : le cas des vestiges du théâtre antique d'Arles'. EGC 2004 - 4èmes journées d'Extraction et de Gestion des Connaissances. `www3.unibo.it/archeologia/homepage/Documenti/Nuove_frontiere/L_De_Luca.pdf` [réf. du 21 mars 2007].

[Blaise et al., 2001] Blaise, J.-Y., I. Dudek, et M. Florenzano : 2001, 'Le programme ARKIW - Un système d'information et de représentation des connaissances relatives aux édifices patrimoniaux et à leurs évolutions architecturales. Le cas du rynek gòwny à Cracovie.'. Rapport de Recherche de l'UMR MAP 694 CNRS.

[Blaise et al., 2002] Blaise, J.-Y., I. Dudek, M. Florenzano, A. Kadluczka, M. Lukacz, et Z. Wiklacz : 2002, 'On how to link patrimonial information and 3D simulations : a methodology for enhanced exploitation and visualisation of architectural documentation, experimented on Kraków's historical centre'. UNESCO World Heritage Virtual

Congress, Technology and New Media for Documentation, Preservation, Management, Sustainable Tourism and Education.

[Brassel et Weibel, 1988] Brassel, K. et R. Weibel : 1988, 'A review and conceptual framework of automated map generalization'. *International Journal on Geographical Information Systems (IJGIS)* **2**(3), 229–244.

[Brown et Perrin, 2000] Brown, A. et K. Perrin : 2000, 'A model for the description of archaeological archives'. *English Heritage, Centre for Archaeology, Information Management and Collections.*

[Buchsenschutz et al., 2004] Buchsenschutz, O., C. Gandini, et A. Maussion : 2004, 'L'archéologie à la conquête de l'espace : les 'cartes à pois' et le poids des cartes, de la Carte archéologique au Système d'Information Archéologique'. *Revue d'Archéométrie* **28**, 5–13.

[Burnard, 1991] Burnard, L. : 1991, *Computing for archaeologists*, Chap. 5, pp. 99–109. Oxford University Committee for Archaeology.

[Burnouf et al., 1994] Burnouf, J., C. Arlaud, M. Hammache, et J.-M. Lurol : 1994, 'Informatisation des archives du sol en archéologie de sauvetage : les expériences lyonnaises, 1984-1994'. *Le Médiéviste et l'Ordinateur* **29**. ISSN 0223-3843. Disponible en ligne sur `http://lemo.irht.cnrs.fr/29/mo2911.htm` [réf. du 17 janvier 2007].

[Carlson, 2001] Carlson, D. : 2001, *Modélisation d'applications XML avec UML.* Eyrolles. ISBN 2-212-09297-0.

[Carozza, 2005] Carozza, J.-M. : 2005, 'Les modèles spatiaux en archéologie : un état des lieux [En ligne]'. Documents de l'IAG (Institut d'Analyse Géographique. `http://www.iag.asso.fr/articles/modelisation_spatiale_archeologie.htm` [réf. du 08 mars 2007].

[CASSINI, 1999] CASSINI : 1999, 'Représentation de l'espace et du temps dans les SIG'. Paris : Hermès. `http://www-cassini.univ-mrs.fr/` [réf. du 26 janvier 2007].

[Chalmers et al., 1997] Chalmers, A., S. Stoddart, M. Belcher, et M. Day : 1997, 'An Interactive Photo-Realistic Visualisation System for Archaeological Sites [En ligne]'. `http://www.cs.bris.ac.uk/~alan/Arch/INSITE/research/comvis/insite2.htm` [réf. du 01 mai 2007].

[Chenhall, 1967] Chenhall, R. G. : 1967, 'The description of archaeological data in computer language'. *American Antiquity* **32**(2), 161–167.

[Chorochronos, 1998] Chorochronos : 1998, 'Second Chorochronos Newsletter [En ligne]'. éditée par M. Boehlen. `http://www.dbnet.ece.ntua.gr/~choros/TRs/Newsletter/nl2.ps.gz` [réf. du 26 janvier 2007].

[Clark et al., 2001] Clark, J., B. Slator, A. Bergstrom, F. Larson, R. Frovarp, J. Landrum, et W. Perrizo : 2001, 'Preservation and Access of Cultural Heritage Objects through a Digital Archive Network for Anthropology'. *Proceedings of the Seventh International Conference on Virtual Systems and Multimedia, Enhanced Realities : Augmented and Unplugged* pp. 253–262. Los Alamitos, CA, IEEE Computer Society Press.

[Clark et al., 2002] Clark, J., B. Slator, W. Perrizo, J. Landrum, R. Frovarp, A. Bergstrom, S. Ramaswamy, et W. Jockheck : 2002, 'Digital Archive Network for Anthropology'. *JODI* **2**(4). Disponible en ligne sur `http://jodi.ecs.soton.ac.uk/Articles/v02/i04/Clark/` [réf. du 19 janvier 2007].

[Codd, 1970] Codd, E. F. : 1970, 'A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks'. *Communications of the ACM (Association for Computing Machinery).*

[Condron et al., 1999] Condron, F., J. Richards, D. Robinson, et A. Wise : 1999, 'Strategies for Digital Data. Findings and recommendations from Digital Data in Archaeology : A Survey of User Needs [En ligne]'. Archaeology Data Service, University of York, King's Manor, York. `http://ads.ahds.ac.uk/project/strategies/` [réf. du 01 décembre 2006].

[Cosmas et al., 2001] Cosmas, J., T. Itegaki, D. Green, E. Grabczewski, F. Weimer, L. Van Gool, A. Zalesny, D. Vanrintel, M. Grabner, K. Karner, F. Leberl, K. Schindler, M. Gervautz, S. Hynst, M. Waelkens, M. Pollefeys, R. DeGeest, R. Sablatnig, et M. Kampel : 2001, 'A novel multimedia system for archaeology'. *Proceedings of The International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST 2001).* Disponible en ligne sur `http://epubs.cclrc.ac.uk/bitstream/928/MURALE01.pdf` [réf. du 20 mai 2007].

[DANA-WH, 2004] DANA-WH : 2004, 'Using DANA-WH [En ligne]'. Concepteurs du projet DANA-WH. `http://dana-wh.net/using_dana.pdf` [réf. du 22 janvier 2007].

[D'Andrea et al., 2006] D'Andrea, A., G. Marchese, et T. Zoppi : 2006, 'Ontological Modelling for Archaeololgical Data'. *VAST 2006. Joint event of VAST/CIPA/EG WS GCH/EuroMed. Eurographics Symposium Proceedings.* pp. 211–218. M. Ioannides, D. Arnold, F. Niccolucci, K. Mania (eds.). In cooperation with ACM SIGGRAPH. ISBN 3-905673-42-8. Disponible en ligne sur `http://diglib.eg.org` [réf. du 16 janvier 2007].

[De Castro Guerra, 2007] De Castro Guerra, E. : 2007, *Inkscape : Apprenez, pratiquez, créez.* Collection Starter Kit, Editions Pearson Education. ISBN 978-2-7440-2158-9.

[De Paoli et El-Khoury, 2006] De Paoli, G. et N. El-Khoury : 2006, 'The backstage of Byblos' Roman theatre : New Digital Devices using Information and Communications Technology (ICT)'. *VAST 2006. Joint event of VAST/CIPA/EG WS GCH/EuroMed. Eurographics Symposium Proceedings.* M. Ioannides, D. Arnold, F. Niccolucci, K. Mania (eds.). In cooperation with ACM SIGGRAPH. ISBN 3-905673-42-8.

[Denegre et Salge, 1996] Denegre, J. et F. Salge : 1996, *Les systèmes d'information géographique*, Que sais-je ? PUF. n.3122.

[Didier, 1990] Didier, M. : 1990, 'Utilité et valeur de l'information géographique'. *Economica.* STU, CNIG.

[Doerr, 2003] Doerr, M. : 2003, 'The CIDOC CRM - An Ontological Approach to Semantic Interoperability of Metadata'. *AI Magazine* **24**(3).

[Drap, 2001] Drap, P. : 2001, 'Un système de gestion de documents hétérogènes dédiés au patrimoine archéologique - l'épave Étrusque du Grand Ribaud'. Rapport de Recherche de l'UMR MAP 694 CNRS.

[Drap et al., 2002] Drap, P., E. Bruno, L. Long, A. Durand, et P. Grussenmeyer : 2002, 'Underwater Photogrammetry and XML based documentation system : The case of the 'Grand Ribaud F' estruscan wreck'. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XXXIV, part 5**.

[Drap et al., 2005a] Drap, P., A. Durand, R. Provin, et L. Long : 2005a, 'Integration of Multi-Source Spatial Information and XML information system in underwater archaeology'. *CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage* **XX-2005**, 765–771. ISSN 0256-1840.

[Drap et al., 2005b] Drap, P., A. Durand, R. Provin, et L. Long : 2005b, 'Virtual Reality in underwater archaeology : First results on the case study "L'Anse des Catalans", Marseille'. *VSMM2005 Eleventh International Conference on Virtual System and Multimedia.*

[Drap et al., 2005c] Drap, P., A. Durand, J. Seinturier, G. Vannini, et M. Nucciotti : 2005c, 'Full XML documentation from Photogrammetric survey to 3D visualization. The case study of shawbak castle in Jordan'. *CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage* **XX-2005**, 771–777. ISSN 0256-1840.

[Drap et Grussenmeyer, 2000] Drap, P. et P. Grussenmeyer : 2000, 'A digital photogrammetric workstation on the web'. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **55**(1), 48–58.

[Drap et al., 2004] Drap, P., P. Grussenmeyer, P. Curtinot, J. Seinturier, et G. Gaillard : 2004, 'Presentation of the web based ARPENTEUR tools : towards a Photogrammetry based Heritage Information System'. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XXXV-B6**.

[Drap et al., 2003] Drap, P., J. Seinturier, et L. Long : 2003, 'A photogrammetric process driven by an Expert System : A new approach for underwater archaeological surveying applied to the 'Grand Ribaud F' Etruscan wreck'. Applications of Computer Vision in Archaeology ACVA'03 Monona Terrace Convention Center, Madison, Wisconsin, USA.

[Dudek et Blaise, 2003] Dudek, I. et J. Blaise : 2003, 'New experimentation of a generic framework for architectural heritage data visualisation'. *Journal of WSCG, WSCG'2003* **11**(1). ISSN 1213-6972.

[Economou, 2003] Economou, M. : 2003, 'New media for interpreting archaeology in museums : Issues and challenges'. *The Digital Heritage of Archaeology. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 2002.* Doerr, M. and Sarris A. (eds). Hellenic Ministry of Culture.

[Eiteljorg, 1995] Eiteljorg, H. I. : 1995, 'The Archaeological Data Archive Project'. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1994* **600**, 245–247. Huggett, J., and Ryan, N. (eds.), BAR International Series, Oxford.

[Eiteljorg, 2000] Eiteljorg, H. I. : 2000, 'The Compelling Computer Image - a double-edged sword [En ligne]'. Internet Archaeology 8. `http://intarch.ac.uk/journal/issue8/eiteljorg_index.html` [réf. du 10 mai 2007].

[EPFL, 2000] EPFL : 2000, 'Conception d'un système d'information géographique pour un inventaire et la gestion des monuments historiques de la Vallée du Drâa - Présentation de l'état actuel de la conception de la base de données [En ligne]'. Inventaire du patrimoine architectural de la Vallée du Drâa. `http://photpc15.epfl.ch/draa/html2/description/documents/presentation.pps` [réf. du 29 janvier 2007].

[Fagan, 1999] Fagan, B. M. : 1999, *Archaeology, A Brief Introduction.* 7th ed. (New Jersey : Prentice Hall, 1999), 49.

[Fargette, 1985] Fargette, F. : 1985, *Données de base pour base de données.* Eyrolles, Paris.

[Ferguson et Murray, 1997] Ferguson, L. M. et D. M. Murray : 1997, 'Archaeological documentary archives : preparation, curation and storage'. *Institut of Field Archaeologists Papers* **1**.

[Fletcher et Spicer, 1992] Fletcher, M. et D. Spicer : 1992, *Archaeology and the Information Age : A Global Perspective*, Vol. 21 of *One World Archaeology Series*, Chap. 10, pp. 97–118. Routledge, London and New York.

[Fromentin et al., 2006] Fromentin, F., S. Lauzanne, et A. Ropars : 2006, 'L'inventaire archéologique national'. *Dabs M. et al., La Prospection. Paris : Errance, coll. «Archéologiques»* pp. 8–12. ISBN : 2-87772-328-3.

[Fronza et al., 2003] Fronza, V., A. Nardini, et M. Valenti : 2003, 'An Integrated Information System for Archaeological Data Management : Latest Developments'. *The Digital Heritage of Archaeology. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 2002.* Doerr, M. and Sarris A. (eds). Hellenic Ministry of Culture.

[Gabay, 2002] Gabay, J. : 2002, *Merise et UML pour la modélisation des systèmes d'information - 4e édition.* Dunod. ISBN 2-10-007821-6.

[GCI, 2003] GCI : 2003, 'Integrating Conservation and Archaeology'. *The Getty Conservation Institute Newsletter* **18**(1), 4–25. `http://www.getty.edu/conservation/publications/newsletters/18_1/` [réf. du 11 janvier 2007].

[Geroimenko et Chen, 2005] Geroimenko, V. et C. Chen : 2005, *Visualising Information Using SVG and X3D. XML-based Technologies for the XML-based Web.* Springer-Verlag. ISBN 1-85233-790-7.

[Gilliland-Swetland, 2000] Gilliland-Swetland, A. J. : 2000, 'Enduring Paradigms, New Opportunities : The Value of the Archival Perspective in the Digital Environment.'. *Washington, D.C. : Council on Library and Information Resources.*

[Gillings et al., 1998] Gillings, M., P. Halls, G. Lock, P. Miller, G. Phillips, N. Ryan, D. Wheatley, et A. Wise : 1998, 'GIS Guide to Good Practice [En ligne]'. Mark Gillings and Alicia Wise (eds.), Arts and Humanities Data Service (AHDS), University of York, King's Manor, York. Endorsed by the Council for British Archaeology, ISSN 1463-5194, `http://ads.ahds.ac.uk/project/goodguides/gis/` [réf. du 13 mars 2007].

[Ginouvès, 1971] Ginouvès, R. : 1971, 'Archéographie, archéométrie, archéologie. Pour une informatique de l'archéologie gréco-romaine.'. *Revue archéologique* pp. 93–126.

[Ginouvès, 1985] Ginouvès, R. : 1985, 'L'archéologie et l'homme'. *Le grand Atlas de l'archéologie*. Encyclopaedia Universalis.

[Ginouvès, 1990] Ginouvès, R. : 1990, 'Des banques de données pour l'archéologie ?'. *Traitement de l'information en archéologie* **15**, 97–107. Brises (CNRS).

[Ginouvès et Guimier-Sorbets, 1992] Ginouvès, R. et A.-M. Guimier-Sorbets : 1992, 'L'image dans l'archéologie'. *Bulletin du CTHS, L'image et la science* pp. 231–248.

[Glorieux et Bougoüin, 2004] Glorieux, F. et C. Bougoüin : 2004, 'Schéma DAPA Ű version 1.0 Ű Une structure documentaire pour le patrimoine [En ligne]'. AJLSM pour le Ministère de la culture et de la communication. `http://projets.ajlsm.com/sdapa/schema/` [réf. du 05 juin 2007].

[Goodall et al., 2004] Goodall, S., P. H. Lewis, K. Martinez, P. A. S. Sinclair, F. Giorgini, M. J. Addis, M. J. Boniface, C. Lahanier, et J. Stevenson : 2004, 'SCULPTEUR : Multimedia Retrieval for Museums'. *Actes de Image and Video Retrieval : Third International Conference, CIVR 2004* pp. 638–646.

[Green et al., 2001] Green, D., J. Cosmas, T. Itegaki, E. Grabczewski, M. Waelkens, R. DeGeest, A. Zalesny, D. Vanrintel, M. Grabner, K. Karner, F. Leberl, K. Schindler, M. Gervautz, S. Hynst, F. Weimer, M. Pollefeys, L. Van Gool, R. Sablatnig, et M. Kampel : 2001, 'A Real Time 3D Stratigraphic Visual Simulation System for Archaeological Analysis and Hypothesis Testing'. *Actes de The International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST 2001).*

[GRI, 2000] GRI : 2000, 'Introduction to Metadata. Pathways to Digital Information. [En ligne]'. Getty Research Institute. `http://www.getty.edu/research/conducting_research/standards/intrometadata/` [réf. du 11 janvier 2007].

[Grussenmeyer et Drap, 2001] Grussenmeyer, P. et P. Drap : 2001, 'ARPENTEUR, a web-based photogrammetry tool'. *Actes de SPIE. Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurements VII, Electronic Imaging and Photonics Symposium* pp. 117–225. ISSN 0277-7868, ISBN 0-8194-3987-8.

[Guillot, 1994] Guillot, D. : 1994, 'La carte archéologique de la France : une base de données au service de la gestion du patrimoine archéologique'. *Le Médiéviste et l'Ordinateur* **29**. ISSN 0223-3843. Disponible en ligne sur `http://lemo.irht.cnrs.fr/29/mo2916.htm` [réf. du 14 mars 2007].

[Guimier-Sorbets, 1990] Guimier-Sorbets, A.-M. : 1990, *Bases de données en archéologie : conception et mise en oeuvre.* Paris : Ed. du C.N.R.S. Préface de René Ginouvès.

[Haine et al., 2006] Haine, K., C. Brasse, et U. Wulf : 2006, 'WWW-Based Building Information System for "Domus Severiana" Palace at Palatine in Rome by Open Source Software'. *VAST 2006. Joint event of VAST/CIPA/EG WS GCH/EuroMed. Eurographics Symposium Proceedings.* pp. 75–82. M. Ioannides, D. Arnold, F. Niccolucci, K. Mania (eds.). In cooperation with ACM SIGGRAPH. ISBN 3-905673-42-8.

[Harris, 1989] Harris, E. : 1989, *Principles of Archaeological Stratigraphy.* 2nd ed. Academic Press : London.

[Heyworth et al., 1995] Heyworth, M. P., S. Ross, et J. D. Richards : 1995, 'Internet Archaeology : An international electronic journal for archaeology'. *The Field Archaeologist* **24**, 12–13.

[Heyworth et al., 1996] Heyworth, M. P., S. Ross, J. D. Richards, et A. Vince : 1996, 'Internet Archaeology : An international electronic journal for archaeology'. *Archeologia e Calcolatori* **7**, 1195–1206.

[Huggett, 1995] Huggett, J. W. : 1995, 'Democracy, data and archaeological knowledge'. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1994* **600**, 23–26. Huggett, J., and Ryan, N. (eds.), BAR International Series, Oxford.

[Ioannides et Wehr, 2002] Ioannides, M. et A. Wehr : 2002, '3D-Reconstruction Re-Production in Archaeology'. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XXXIV, Part 5**.

[Ioannidis et al., 2003] Ioannidis, C., C. Potsiou, et S. Soile : 2003, 'An Integrated Spatial Information System for the Development of the Archaeological Site of Mycenae'. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XXXIV-5/W10**.

[Jacob, 1992] Jacob, C. : 1992, *Bibliothèque Albin Michel, Histoire. Paris, 1992.* Taylor and Francis : London. ISBN 2-226-06083-9.

[Kantner, 2000] Kantner, J. : 2000, 'Realism vs Reality : creating virtual reconstructions of prehistoric architecture'. *Virtual Reality in Archaeology.* J.A. Barcelò, D. Sanders, M. Forte (eds), Archéopress, Oxford.

[Karega-Munene, 1992] Karega-Munene : 1992, *Archaeology and the Information Age : A Global Perspective*, Vol. 21 of *One World Archaeology Series*, Chap. 3, pp. 41–46. Routledge, London and New York.

[Kölbl et al., 2001a] Kölbl, O., D. El Alaoui, C. Hunziker, et M. Boussalh : 2001a, 'Conception d'un système d'information géographique [En ligne]'. Inventaire systématique par photographies aériennes du patrimoine culturel de la vallée du Drâa. `http://photpc15.epfl.ch/draa/html2/description/documents/poster.pdf` [réf. du 29 janvier 2007].

[Kölbl et al., 2001b] Kölbl, O., A. Fadli, M. Boussalh, H. Hostettler, et C. Hunziker : 2001b, 'An Integrated 3D-GIS for an Inventory of the Historic Monuments Applied to the South of Morocco'. *The CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage* **XVIII**, 78–85. ISSN 0256-1840.

[Koehl, 1997] Koehl, M. : 1997, 'Cours de SIG'. ENSAIS.

[Kvamme, 1990] Kvamme, K. L. : 1990, 'The fundamental principles and practice of predictive archaeological modeling'. *Mathematics and Information Science in Archaeology : A Flexible Framework, Studies in Modern Archaeology* **3**, 297–305. Voorrips, A. (ed.), Holos-Verlag, Bonn.

[Kvamme, 1992a] Kvamme, K. L. : 1992a, 'Geographic Information Systems and Archaeology'. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1991* **577**, 77–84. Lock, G. and Moffett, J. (eds.), International Series, Tempus Reparatum, Oxford. British Archaeological Reports.

[Kvamme, 1992b] Kvamme, K. L. : 1992b, 'A predictive site location model on the High Plains : An example with an independent test'. *Plains Anthropologist* **56**(2), 19–40.

[Landrum et al., 2003] Landrum, J., J. Clark, A. Bergstrom, B. Slator, R. Frovarp, R. Kranitz, et W. Perrizo : 2003, 'The Digital Archive Network for Anthropology and World Heritage (DANA-WH) : Current Content and Future Potentials'. *The Fifth World Archaeological Congress, Washington DC.*

[Lang, 1997] Lang, N. : 1997, 'GIS and Archaeology'. *MDA Information (Information Letter for the Museums Documentation Association)* **2**(3), 26–34.

[Lang, 1993] Lang, N. A. R. : 1993, 'From model to machine : procurement and implementation of Geographical Information Systems for County Sites and Monuments Record'. *Computing the Past. CAA92 : Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology* pp. 167–176. Andresen, J., Madsen, T., and Scollar, I. (eds.), Aarhus University Press, Aarhus.

[Llobera, 2001] Llobera, M. : 2001, 'Building Past Landscape Perception With GIS : Understanding Topographic Prominence'. *Journal of Archaeological Science* **28**(9), 1005–1014.

[Louhivuori, 1996] Louhivuori, M. : 1996, 'The East Mediterranean pottery project : Exchange of specialized data on the information superhighway'. *Archeologia e Calcolatori* **7**, 997–1002.

[Luttermann et Grauer, 1999] Luttermann, H. et M. Grauer : 1999, 'VRML History : Storing And Browsing Temporal 3D-Worlds'. *Proceedings of 4. Symposium on VRML* pp. 153–160. ACM-Press.

[Lyall et Powlesland, 1996] Lyall, J. et D. Powlesland : 1996, 'The application of high resolution fluxgate gradiometry as an aid to excavation planning and strategy formulation [En ligne]'. Internet Archaeology 1. `http://intarch.ac.uk/journal/issue1/lyall/himag.html` [réf. du 14 mars 2007].

[Mac Lean, 1996] Mac Lean, M. G. H. : 1996, 'Capturing the past : documentation and conservation'. *The Getty Conservation Institute Newsletter* **11**(2). `http://www.getty.edu/conservation/publications/newsletters/11_2/` [réf. du 09 mai 2007].

[McAdam, 1995] McAdam, E. : 1995, 'CD-ROM - The publishers' view'. *The Field Archaeologist* **24**, 17–18.

[MDA, 1997] MDA : 1997, *SPECTRUM : the UK museum documentation standard.* 2e édition.

[Meffert, 1995] Meffert, M. : 1995, 'Spatial relations in Roman Iron Age settlements in the Assendelver Polders, The Netherlands'. *Archaeology and Geographical Information Systems : A European Perspective* pp. 287–299. Lock, G., and Stani, Z. (eds.), Taylor and Francis, London.

[Miller, 1995] Miller, A. P. : 1995, 'How to Look Good and Influence People : Thoughts on the Design and Interpretation of an Archaeological GIS'. *Archaeology and Geographic Information Systems : A European Perspective* pp. 319–333. Lock, G. R. and Stancic, Z., Taylor and Francis, London.

[Miller et Richards, 1995] Miller, A. P. et J. D. Richards : 1995, 'The good, the bad, and the downright misleading : Archaeological adoption of computer visualization'. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1994* **600**, 19–22. Huggett, J., and Ryan, N. (eds.), BAR International Series, Oxford.

[Monga, 2001] Monga, O. : 2001, 'SIMES : Final Project Report [En ligne]'. SIMES. `http://www.ercim.org/simes/final-report.pdf` [réf. du 24 janvier 2007].

[Neubauer, 2001] Neubauer, W. : 2001, 'Magnetische Prospektion in der Archäologie.'. *Mitteilungen der Prähistorischen Kommission, Wien* **44**, 1–326.

[Neubauer, 2004] Neubauer, W. : 2004, 'GIS in Archaeology - the Interface between Prospection and Excavation'. *Archaeological Prospection* **11**, 159–166.

[Niccolucci, 2002] Niccolucci, F. : 2002, 'XML and the future of humanities computing'. *Applied Computing Review* **10**(1), 43–47. Disponible en ligne sur `http://doi.acm.org/10.1145/568235.568244` [réf. du 04 juin 2007].

[OGC, 2003] OGC : 2003, 'OGC Reference Model [En ligne]'. Reference number : OGC 03-040. Version : 0.1.3. Editor : George Percivall. `http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=3836` [réf. du 29 janvier 2007].

[Pateraki et al., 2002] Pateraki, M., E. Baltsavias, et P. Patias : 2002, 'Image Combination into Large Virtual Images for Fast 3D Modelling of Archaeological Sites'. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XXXIV, Part 5**.

[Patias et al., 2006] Patias, P., S. Sylaiou, L. Sechidis, I. Spartalis, P. Grussenmeyer, . Meyer, T. Landes, et E. Alby : 2006, 'A proposed low-cost system for 3D archaeological documentation'. *VAST 2006. Joint event of VAST/CIPA/EG WS GCH/EuroMed. Eurographics Symposium Project Papers.* pp. 145–149. M. Ioannides, D. Arnold, F. Niccolucci, K. Mania (eds.). EPOCH Publication. ISBN 963 8046 75 9.

[Pearce-Moses, 2003] Pearce-Moses, R. : 2003, 'Archaeological Records in a Geographical Information System : Research in the American Southwest [En ligne]'. Proposal for an InterPARES 2 Case Study. `http://www.interpares.org/display_file.cfm?doc=pearce-moses_omeara_archaelology(20031210).pdf` [réf. du 15 mars 2007].

[Peterman, 1993] Peterman, G. L. : 1993, 'GIS and archaeology in Jordan'. *Computing the Past. CAA92 : Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology* pp. 189–194. Andresen, J., Madsen, T., and Scollar, I. (eds.), Aarhus University Press, Aarhus.

[Pillot et Florenzano, 2001] Pillot, P. et M. Florenzano : 2001, 'Revue électronique, documents XML et logiciels libres. Etude de faisabilité.'. Rapport de Recherche de l'UMR MAP 694 CNRS.

[Pollefeys et al., 1999] Pollefeys, M., R. Koch, M. Vergauwen, et L. Van Gool : 1999, 'An Automatic Method for Acquiring 3D Models from Photographs : applications to an Archaeological Site'. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XXXII, Part 5W11**, 76–80.

[Pomaska et Dementiev, 2005] Pomaska, G. et N. Dementiev : 2005, 'XML basierte Datenformulierung zur Web-konformen Dokumentation photogrammetrischer Bauaufnahmen'. *Photogrammetrie . Fernerkundung . GeoInformation 4/2005* pp. 291–301.

[Puyol-Gruart, 1999] Puyol-Gruart, J. : 1999, 'Computer Science, Artificial Intelligence and Archaeology'. *New Techniques for Old Times. Computer Applications in Archaeology 1998.* **757**. British Archaeological Reports International series, J. A. Barceló, A. Vila and I. Briz, editors, Oxford : Tempus reparatum. Invited paper.

[Quesada et al., 1995] Quesada, P., J. Baena, et C. Blasco : 1995, 'An application of GIS to intra-site spatial analysis : The Iberian Iron Age cemetery at El Cigarralejo (Murcia, Spain)'. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1994* **600**, 137–146. Huggett, J. and Ryan, N. (eds.), BAR International Series.

[Rahtz et al., 1992] Rahtz, S., W. Hall, et T. Allen : 1992, *Archaeology and the Information Age : A Global Perspective*, Vol. 21 of *One World Archaeology Series*, Chap. 22, pp. 360–383. Routledge, London and New York.

[Rahtz et Sinclair, 1994] Rahtz, S. et P. Sinclair : 1994, 'Multimedia information systems for East African archaeology'. *Archeologia e Calcolatori* **5**, 219–236.

[Razdan et Farmer, 2002] Razdan, A. et R. Farmer : 2002, 'Proposal for the 3D Knowledge Project [En ligne]'. PRISM, Arizona State University. `http://3dk.asu.edu/research/PROPOSAL/PROPOSAL.PDF` [réf. du 20 mai 2007].

[Reilly, 1991] Reilly, P. : 1991, 'Towards a virtual archaeology'. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1990* pp. 133–139. Lockyear, K. Rahtz, S. P. Q. (eds), Tempus Reparatum, Oxford.

[Reilly, 1992] Reilly, P. : 1992, *Archaeology and the Information Age : A Global Perspective*, Vol. 21 of *One World Archaeology Series*, Chap. 12, pp. 147–170. Routledge, London and New York.

[Richards, 1998] Richards, J. D. : 1998, 'Recent Trends in Computer Applications in Archaeology'. *Journal of Archaeological Research* **6**, 331–382. DOI 10.1023/A :1022879819064, `http://dx.doi.org/10.1023/A:1022879819064` [réf. du 12 mars 2007].

[Rodier, 2000] Rodier, X. : 2000, 'Le système d'information géographique TOTOPI : TOpographie de TOurs Pré-Industriel'. *Le petits cahiers d'Anatole* **4**. `http://www.univ-tours.fr/lat/pdf/F2_4.pdf` [réf. du 15 mars 2007].

[Rodier, 2006] Rodier, X. : 2006, 'L'archéologue et la carte'. *Mappemonde* **83**. `http://mappemonde.mgm.fr/num11/edito.html` [réf. du 21 mars 2007].

[Ross et al., 1991] Ross, S., J. Moffett, et J. Henderson : 1991, *Computing for archaeologists.* Oxford University Committee for Archaeology.

[Ryan, 1995] Ryan, N. S. : 1995, 'The excavation archive as hypertext document ?'. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1994* **600**, 211–219. Huggett, J., and Ryan, N. (eds.), BAR International Series, Oxford.

[Ryan, 1996] Ryan, N. S. : 1996, 'Computer based visualization of the past : Technical "realism" and historical credibility'. *Imaging the Past : Electronic Imaging and*

Computer Graphics in Museums and Archaeology. British Museum Occasional Paper **114**, 95–108. Higgins, T., Main, P., and Lang, J. (eds.).

[Ryan, 2004] Ryan, N. S. : 2004, 'Managing Complexity : Archaeological Information Systems. Past, Present, Future [En ligne]'. Computing Laboratory, University of Kent at Canterbury. Dernière mise à jour en 2004, `http://www.cs.kent.ac.uk/people/staff/nsr/arch/baas.html` [réf. du 08 mai 2007].

[Sapin, 1994] Sapin, C. : 1994, 'L'archéologie face aux images de synthèse'. *Le Médiéviste et l'Ordinateur* **29**. ISSN 0223-3843. Disponible en ligne sur `http://lemo.irht.cnrs.fr/29/mo2911.htm` [réf. du 17 janvier 2007].

[Schloen, 1999] Schloen, J. D. : 1999, 'Networking the Past. Archaeological Data Models and Electronic Publication on the World-Wide Web'. *The Oriental Institute News and Notes* **160**. Disponible en version numérique avec la permission de l'éditeur (dernière révision le 7 février 2007) : `http://oi.uchicago.edu/research/pubs/nn/win99_schloen.html` [réf. du 13 mars 2007].

[Schloen, 2001] Schloen, J. D. : 2001, 'Archaeological Data Models and Web Publication using XML'. *Computer and the Humanities* **35**, 123–152.

[Scholl et al., 1998] Scholl, P., M. Fauvet, et J. Canavaggio : 1998, 'Un modèle d'historique pour un SGBD temporel'. *Revue TSI - Spécial Bases de données* **17**(3), 379–399.

[Seinturier et al., 2005a] Seinturier, J., P. Drap, O. Papini, G. Vannini, et M. Nucciotti : 2005a, 'A merging data tool for knowledge based photogrammetry : The case study of the castle of shawbak, Jordan'. *CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage* **XX-2005**, 538–544. ISSN 0256-1840.

[Seinturier et al., 2005b] Seinturier, J., P. Drap, N. Vincent, F. Cibecchini, O. Papini, et P. Grussenmeyer : 2005b, 'Orthophoto imaging and GIS for seabed visualization and underwater archaeology'. In : *Proceedings of CAA2004, Computer Applications and quantitative Methods in Archaeology*. Prato, Italie.

[Shiode et Grajetzki, 2000] Shiode, N. et W. Grajetzki : 2000, 'A virtual exploration of the lost labyrinth : developing a reconstructive model of Hawara labyrinth pyramid complex'. *CASA Working Paper Series* **29**. ISSN : 1467-1298, `http//www.casa.ucl.ac.uk/paper29.pdf` [réf. du 01 mai 2007].

[SMA, 1995] SMA : 1995, 'Towards an Accessible Archaeological Archive Guidelines'. Society of Museum Archaeologists. ISBN 1 871855 09 8, Out of print, `http://www.socmusarch.org.uk/docs/Towardsaccessiblearchive.pdf` [réf. du 15 janvier 2007].

[Smith, 1992] Smith, N. : 1992, 'An experiment in electronic exchange and publication of archaeological field data'. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1991* **577**, 49–57. Lock, G. and Moffett, J. (eds.), International Series, Tempus Reparatum, Oxford. British Archaeological Reports.

[Sowa, 1984] Sowa, J. F. : 1984, *Conceptual structures : information processing in mind and machine*. Reading, Mass : Addison-Wesley.

[Stewart et al., 2004] Stewart, R., A. Clarke, et M. Fulford : 2004, 'Promoting inclusion : facilitating access to the Silchester 'town life' project'. *Journal World Archaeology* **36**(2), 220–235.

[Tangelder et Veltkamp, 2004] Tangelder, J. W. H. et R. C. Veltkamp : 2004, 'A Survey of Content Based 3D Shape Retrieval Methods'. *Actes de Shape Modeling International* pp. 145–156.

[Tschaen, 1989] Tschaen, L. : 1989, 'La Topographie au service de l'Archéologie'. *Journal "Arts et Industries" (Revue informelle des anciens élèves de l'ENSAIS), "Topographie et Archéologie"* **219**, 7–13. ISSN 0004-3982.

[UCLA, 2000] UCLA : 2000, 'The Digital Imprint [En ligne]'. The Regents of the University of California. `http://www.sscnet.ucla.edu/ioa/labs/digital/imprint/imprint.html` [réf. du 07 mai 2007].

[Van Leusen, 1995] Van Leusen, P. M. : 1995, 'GIS and Archaeological Resource Management : A European Agenda'. *Archaeology and Geographic Information Systems : A European Perspective* pp. 27–41. Lock, G. R. and Stancic, Z., Taylor and Francis, London.

[Vergnieux, 1996] Vergnieux, R. : 1996, 'Le fac-similé électronique ou les restitutions virtuelles'. *Informatique et Égyptologie* **10**. Actes des Rencontres "Informatique et Égyptologie" 1994, Utrecht - Paris.

[Walker, 1990] Walker, K. : 1990, 'Guidelines for the Preparation of Excavation Archives for Long-term Storage'. Archaeology Section of the United Kingdom Institute for Conservation, London.

[Wheatley et Gillings, 2002] Wheatley, D. et M. Gillings : 2002, *Spatial Technology and Archaeology : a Guide to the Archaeological Applications of GIS*. Taylor and Francis : London.

[Wise et Miller, 1997] Wise, A. et A. P. Miller : 1997, 'Why metadata matters in archaeology [En ligne]'. Internet Archaeology 2. `http://intarch.ac.uk/journal/issue2/wise_index.html` [réf. du 10 mai 2007].

[Wolle et Shennan, 1996] Wolle, A.-C. et S. J. Shennan : 1996, 'A tool for multimedia excavation reports - A prototype'. *Interfacing the Past. CAA95 : Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Analecta Praehistorica Leidensia* **28**, 489–495. Kamermans, H. and Fennema, K. (eds.).

[Wood et Wood, 2007] Wood, S. et B. Wood : 2007, 'Nabonidus Archaeology [En ligne]'. Présenté lors du Congrès du Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 2007. `http://www.nabonidus.org/documents/CAA2007.ppt` [réf. du 21 mai 2007].

[Wüst et al., 2004] Wüst, T., S. Nebiker, et R. Landolt : 2004, 'Applying 3D GIS DILAS to Archaeology and Cultural Heritage Projects - Requirements and first results'. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **34, Part XXX**.

[Zimmer et al., 1981] Zimmer, J., J. Metzler, et L. Bakker : 1981, *Ausgrabungen in Echternach*. Ed. Publications nationales, Luxembourg.

Table des figures

1.1 Structure physique des données [Fargette, 1985] 8

1.2 Structure d'une relation [Fargette, 1985] 9

1.3 Vue de l'interface client du système DANA-WH [DANA-WH, 2004] . . . 27

1.4 Schéma d'un Système d'Information Géographique : données et réalité [Denegre et Salge, 1996] 30

1.5 Changement de la proéminence topographique avec l'échelle [Llobera, 2001] 47

1.6 Modèle Numérique de Terrain de l'Acropole [Ioannidis et al., 2003] . . . 54

1.7 Modèle 3D du château de Wildenstein [Wüst et al., 2004] 55

2.1 Modèle 3D réalisé par extraction automatique à partir de photographies. Bains du site de Sagalassos [Pollefeys et al., 1999] 68

2.2 Surfaces de contacts [Barcelò et al., 2004] 69

2.3 Modèles tridimensionnels du plateau de Gizeh 70

2.4 Relief scanné [Ioannides et Wehr, 2002] 70

2.5 L'outil VLMA pour la visualisation de collections de musées 73

2.6 Modèles de l'Acropole d'Athènes 75

2.7 Modèles 3D navigables du complexe d'Hawara [Shiode et Grajetzki, 2000] 76

2.8 Codages graphiques dans des scènes 3D [Blaise et al., 2005] 78

2.9 Recherche de données dans la bibliothèque électronique ETANA-DL . . 82

3.1 Flux des processus archéologiques dans 3D Murale [Cosmas et al., 2001] 93

3.2 Perspective 3D de la stratigraphie montrant les artéfacts incorporés [Cosmas et al., 2001] 94

3.3 Vue d'ensemble schématique du projet 3DK [Razdan et Farmer, 2002] . 96

3.4 Fonctionnement du système SCULPTEUR [Goodall et al., 2004] 98

3.5 Accès aux informations sur les contextes dans Nabonidus 100

3.6 Visualisation des périodes de fouilles du site de Silchester 102

3.7 Diagramme matriciel interactif du site de Silchester 103

3.8 Diagramme structurel du site de Silchester 104

3.9 Guide interactif du site de Silchester 105

5.1 Architecture client-serveur dynamique 118

5.2 Modèles 3D de l'évolution du Château de Vianden réalisés au CRAI . . 121

5.3 Images virtuelles de la villa d'Echternach réalisées au CRAI 123

6.1 Schéma synoptique du système de gestion de documentation de la fouille de l'épave du Grand Ribaud [Drap, 2001] 127

6.2 Représentation VRML du relevé photogrammétrique d'une zone particulière du site des Catalans [Drap et al., 2005a] 128

6.3 Schéma synoptique des relevés sur le site des Catalans et du système ISA-PX [Drap et al., 2005a] 129

6.4 Interfaces 3D et 2D de ISA-PX [Drap et al., 2005c] 131

7.1 Anatomie d'un document XML (traduit de [Geroimenko et Chen, 2005]) 139

7.2 Formalisation XML des conditions de découverte d'un objet archéologique dans le schéma DAPA 145

7.3 Schémas XML pour les données de types *lieu* et *période* 147

7.4 Schéma XML pour les données de type *coupe* et *modele3D* 147

7.5 Schéma XML pour les données de type *armure* 148

7.6 Correspondance entre un tuple d'une table MySQL et un fichier de donnée XML 150

7.7 Correspondance entre éléments/attributs XML et champs de la table MySQL 151

7.8 Diagramme de séquence décrivant la gestion de la base de données MySQL en fonction des données XML 153

7.9 Procédure de création d'un nouveau type de donnée *imagevirtuelle* . . . 155

7.10 Schéma XML du nouveau type de donnée *imagevirtuelle* 156

7.11 Procédure pour l'ajout d'une donnée de type *imagevirtuelle* 158

7.12 Affichage HTML d'un document XML par l'intermédiaire d'un analyseur syntaxique PHP et d'une feuille de style CSS 160

7.13 Procédure d'affichage des métadonnées et de l'image d'une *coupe* du site de Vianden à partir de l'interface du SI 161

7.14 Procédure de modification de la structure du schéma XML du type de donnée *imagevirtuelle* 163

8.1 Diagramme de classes présentant les relations entre les données du SI . . 166

8.2 Formalisation en XML du principe de liaison des différents types de données 168

8.3 Procédure d'ajout dans un schéma XML d'un élément multiple permettant de lier des données 169

8.4 Correspondance entre de l'ajout de références dans un fichier XML et la création d'une table de liaison dans MySQL 170

8.5 Mise en évidence de la relation d'inclusion entre les données de types *souslieu* et *lieu* 171

8.6 Interface du SI pour le site de Vianden présentant la liste des lieux remarquables de ce site et les données liées à une instance 175

8.7 Interface du SI pour le site d'Echternach présentant la liste des textes enregistrés et l'ouverture d'un fichier .doc stocké 176

8.8 Procédure de recherche par type de donnée 179

8.9 Procédure de recherche des données par mots-clés 181

8.10 Procédure de recherche des données par images 183

8.11 Définition de zones spatiales sur un plan raster du site de Vianden . . . 187

8.12 Géométrie d'un polygone en SVG 188

8.13 Structure d'un dessin SVG représentant une image raster avec des zones définissant des lieux 189

8.14 Ajout d'un hyperlien sur une zone pour retrouver toutes les données liées au lieu représenté 190

8.15 Interface 2D interactive pour l'accès aux données liées aux lieux représentés 192

8.16 Modèle 3D et "hypergraph" de Maya® avec mise en évidence d'un groupe de surfaces définissant un lieu 195

8.17 Structure VRML d'un lieu comportant plusieurs surfaces 197

8.18 Ajout d'une ancre sur un graphique 3D pour retrouver toutes les données liés au lieu modélisé 198

8.19 Interface 3D interactive pour l'accès aux données liées aux lieux modélisés et à la période du modèle 201

9.1 Procédure de représentation des corpus de métadonnées 207

9.2 Procédure de création de vues des données 209

9.3 Procédure de génération de représentations 2D originales 212

9.4 Procédure de génération de représentations 3D originales 215

10.1 Formalisme de base de représentation d'un cas d'utilisation 220

10.2 Formalisme du diagramme de séquence 221

10.3 Formalisme général d'une classe 221

10.4 Formalismes de l'agrégation, de la composition et de la relation de généralisation/spécialisation 222

10.5 Diagramme de contexte du SI 223

10.6 Diagramme des cas d'utilisation du SI 223

10.7 Diagramme de séquence décrivant la création et la suppression d'un site 225

10.8 Diagramme de séquence décrivant la modification et la sauvegarde d'un site 226

10.9 Diagramme de séquence décrivant la visualisation d'un site 227

10.10Diagramme de séquence décrivant la création et la suppression d'une donnée229

10.11Diagramme de séquence décrivant la modification d'une donnée 230

10.12Diagramme de séquence décrivant le stockage d'une donnée 231

10.13Diagramme de séquence décrivant la génération automatique d'une donnée interactive 232

10.14Diagramme de séquence décrivant la visualisation d'une donnée 233

10.15Diagramme de séquence décrivant l'ouverture d'une donnée 234

10.16Diagramme de séquence décrivant la génération de vues d'une donnée . 235

10.17Diagramme de séquence décrivant la recherche d'une donnée 236

10.18Diagramme de séquence décrivant la création, la modification et la suppression d'un archéologue 238

10.19Diagramme de séquence décrivant la connexion, la modification de mot de passe et la déconnexion d'un archéologue 239

10.20Diagramme de séquence décrivant la proposition d'outils d'information pour un utilisateur 240

10.21Diagramme de classe du Système d'Information 243

Liste des tableaux

3.1 Récapitulatif des intérêts et des attentes des archéologues par rapport à un Système d'Information pour la documentation 107

8.1 Exemples de conversion d'éléments VRML en X3D [Geroimenko et Chen, 2005]202

Annexes

Annexe A - Le Château de Vianden

Notre 1er site d'expérimentation a été le Château de Vianden situé au nord-est du Luxembourg. Ce château a été acquis par l'État Luxembourgeois en 1977 et a depuis bénéficié d'importantes mesures de restaurations et d'aménagements. Parallèlement un programme de documentation de l'architecture en élévation et de recherches archéologiques a été réalisé par les soins du Musée de l'État et du Service des Sites et Monuments Nationaux. Les données résultant de ces travaux ont permis de compléter dans une large mesure les connaissances sur l'histoire architecturale de cet important château.

Gaby Frantzen-Heger
Site Internet du château : http://www.castle-vianden.lu/francais/index.html .

Le château de Vianden fut construit pendant la période du 11e au 14e siècle sur les assises d'un castel romain et d'un refuge carolingien. Château-Palais portant la marque des Hohenstaufen, il est une des plus grandes et plus belles résidences féodales des époques romanes et gothiques de notre Europe.
Jusqu'au début du 15e siècle, il fut la demeure des puissants comtes de Vianden qui se vantaient de leurs relations avec la cour impériale et dont le plus glorieux, Henri Ier (1220-1250) avait même pour épouse une parente par les liens du sang des Capétiens rois de France. En 1417, le Comté et le château furent légués par héritage à la branche cadette de la maison allemande de Nassau, qui, en 1530, recueillit également la principauté française d'Orange.
La chapelle, le Petit Palais et le Grand Palais, les pièces les plus remarquables du château, ont été réalisées vers la fin du 12e et dans la première moitié du 13e siècle. Le Quartier de Juliers à l'ouest du Grand Palais, aujourd'hui disparu, date du début du 14e siècle. Le Quartier de Nassau ne fut érigé qu'au début du 17e siècle.
En 1820, sous le règne du Roi Guillaume Ier d'Orange-Nassau, comte de Vianden, la vente du château et la décomposition en ses éléments aboutissait à l'état de ruine. Le château échut en 1890 au Grand-Duc Adolphe de la branche aînée de Nassau et resta

la propriété de la famille Grand-Ducale jusqu'en 1977 où il devint Domaine de l'État. Restauré depuis cette année-là dans le respect des formes historiques, le château est aujourd'hui un monument de rang européen.

John Zimmer
Rédaction / Dessins : John Zimmer
Musée National d'Histoire et d'Art, Luxembourg
Service des Sites et Monuments Nationaux, Luxembourg

Le fortin du Bas-Empire

Période 1 (4e - 5e siècles)

L'éperon rocheux qui surplombe la vallée de l'Our a connu une première occupation au Bas-Empire. La situation géographique ainsi que l'apport des fouilles archéologiques laissent présumer que cette fortification fut occupée, durant la deuxième moitié du 4e siècle et la première moitié du 5e siècle, par une garnison officielle de l'armée romaine à l'instar de bon nombre de castella de hauteur du pays de Trèves.

Les explorations archéologiques du sous-sol du château principal ont révélé des structures de cette fortification romaine. L'extrémité sud de l'éperon était gardée par une tour carrée d'environ 10,50 m de côte. Deux courtines partaient des coins nord-est et ouest de la tour, en suivant la ligne de rupture des pentes. Hormis quelques trous de pieux, aucune trace de l'aménagement intérieur de ce fortin n'a été conservée.

Le versant Nord-Ouest du monticule était protégé par une large fosse taillée dans le schiste naturel.

Le fortin surplombant le passage de l'Our fait partie d'un ensemble de fortifications de hauteur destinées, surtout dans la deuxième moitié du 4e, et la première moitié du 5e siècle, à la surveillance des voies de communication de l'arrière-pays de Trèves.

Vers le milieu du 5e siècle, le fortin fut en partie détruit par le feu.

Dessin du château vers le 5e siècle

Le haut Moyen-Age

Période 2 (6e - 10e siècles)

Les récentes recherches archéologiques effectuées dans la basse-cour, située en contrebas de la chapelle castrale, ont permis de compléter nos connaissances sur l'évolution architecturale de cet important château. Ces recherches étant encore en cours, nous nous limiterons, dans le cadre de cette contribution, à retracer une esquisse sommaire des installations du haut Moyen-Age. Les fouilles entreprises dans la basse-cour ont révélé de nombreuses structures taillées dans la roche naturelle. Des trous de poteaux, creusés dans le schiste du monticule sud-ouest, servaient à la fondation d'une palissade en bois. Une autre surprise archéologique fut la découverte d'un chemin creux permettant l'accès à pied par la pente sud-ouest.

Le mobilier archéologique (tessons, etc.) récupéré au cours des fouilles a permis d'attribuer ces structures au haut Moyen-Age, c'est-à-dire aux périodes mérovingienne et carolingienne. Les fouilles archéologiques indiquent que la tour de l'antique fortin romain était encore utilisée à cette époque. En contrebas de cette tour carrée, une fortification en bois fut ajoutée pour protéger un chemin d'accès à partir de la vallée de l'Our.

Au stade actuel de notre connaissance des sites mérovingiens et carolingiens de cette région, il est difficile de risquer une interprétation concernant la fonction exacte de cette installation du haut Moyen-Age.

Les seules fortifications de cette époque mentionnées par les textes sont attribuées à la protection de grandes abbayes carolingiennes, aménagées dans le contexte des incursions normandes (Prüm et Echternach).

La première fonction de cette fortification était essentiellement administrative ; en effet, les textes du haut Moyen Age attestent que les taxes fluviales et terrestres faisaient partie intégrante du "système économique" (fiscus) des époques mérovingienne et carolingienne. Un emplacement propice à la perception de ces taxes était donc nécessaire.

Dessin du château vers le 10e siècle

Le premier château fort du Moyen-Age

Période 3 (vers l'an 1000)

L'élément principal du premier château fort médiéval consiste en un mur d'enceinte à plan ovale. Sur la pointe de l'éperon, la tour antique était intégrée à ce dispositif de défense.

Du côté nord-est, une porte, avec un cadre en blocs de grès jaune et de grès bigarré, perçait l'enceinte et donnait accès à la cour intérieure. Le fait que cette entrée soit située à une certaine hauteur dans la courtine atteste l'existence d'une passerelle en bois ancrée dans le rocher.
Un bâtiment à plan trapézoïdal de type hall (aula) s'appuyait contre la courtine sud-ouest du château. L'essai de reconstitution de cette première installation médiévale, probablement érigée aux alentours de l'an 1000, nous montre un château déjà doté des deux principales composantes des futures résidences princières, c'est-à-dire d'un hall (aula) et d'une chapelle (capella). Seule la tour d'habitation faisait encore défaut. Ainsi le château de Vianden des alentours de l'an 1000 n'était probablement pas encore la résidence permanente d'une famille noble, mais avait, comme au haut Moyen-Age, une fonction essentiellement administrative.

Dessin du château vers l'an 1000

Le premier château résidentiel
Période 4 (vers 1100)
C'est probablement sous le règne de Bertholphe "Comes de Vianne" que fut ajouté un donjon carré sur le côté nord de la fortification, dominant l'ancien fossé. Au même moment, l'aula subit d'importantes transformations. Le rez-de-chaussée de ce grand bâtiment comportait à cette époque une cuisine ainsi que des pièces d'habitation et des latrines. Ces éléments nous permettent de conclure que le château de Vianden était utilisé, vers 1100, comme résidence permanente d'une famille aristocratique. Cette résidence des comtes de Vianden est dotée alors des trois bâtiments essentiels du château fort du Moyen-Age, à savoir le palais (aula), la chapelle (capella), le donjon (camera). Dans l'ancienne partie basse de la fortification, un ensemble de bâtiments à fonctions diverses constituait une première basse-cour. L'ancien chemin d'accès fut intégré à un porche d'entrée avec un passage voûté. A la même époque, l'ancienne palissade de bois qui protégeait la basse-cour fut remplacée par une première enceinte en construction massive. Une détermination exacte des fonctions des bâtiments dégagés dans le sous-sol de la basse-cour serait prématurée au stade actuel de la recherche.

Dessin du château vers 1100

Le deuxième château résidentiel

Période 5 (1re phase romane, vers 1150)

Il est probable que c'est sous le règne du comte Frédéric Ier de Vianden, que le château principal a subi de profondes modifications au niveau architectural. L'ancienne chapelle, installée dans la tour carré du Bas-Empire, fut remplacée par une chapelle monumentale à plan décagonal. Le sanctuaire castral était constitué de deux étages avec une communication centrale ainsi qu'un choeur orienté au sud-est.

Afin de rehausser la valeur représentative du palais, l'étage supérieur fut doté de tous cotés de grandes baies à fenêtres jumelées. Au cour du même programme de construction, l'ancien donjon fut remplacé par une tour d'habitation à trois étages dont les restes subsistent dans la façade sud-ouest du château. Dans cette même façade sont conservés les piliers des arcades qui portaient les courtines à cette époque. Pour gagner de l'espace, le nouveau chemin de ronde qui reliait tous les bâtiments du château était placé sur des arcades extérieures. En ce qui concerne la basse-cour, les fouilles archéologiques en cours ne laissent entrevoir aucune transformation d'envergure.

Dessin du château vers 1150

Le troisième château résidentiel

Période 6 (la grande période romane, vers 1200)

Tout au début du 13e siècle, le château des comtes de Vianden allait subir une réorganisation architecturale de grande envergure. Dans une première phase de construction, un nouveau palais, de 10 x 30 m, fut érigé sur le côté nord-ouest de l'éperon. Au-dessus de l'ancien fossé du Bas-Empire, une cave monumentale était découpée dans le rocher. En même temps, l'étage supérieur de la chapelle fut adapté au style roman de cette époque. Ces deux grands bâtiments - l'un à vocation profane et l'autre à vocation religieuse - furent reliés par une galerie monumentale dont plusieurs baies trilobées sont encore conservées. Tous ces bâtiments représentatifs sont disposés en enfilade avec façades principales orientées au nord-est, c'est-à-dire vers l'Empire. Les bâtiments d'habitation - qui ne sont conservés qu'en partie - sont dirigés vers le sud-ouest. La très riche architecture de transition entre le roman et le gothique confère à l'ensemble architectural du château des Comtes de Vianden une allure de palais plutôt que de site défensif.

Peut-être à la même époque, ou quelques années plus tard, une tour à plan octogonal fut érige dans l'ancienne basse-cour à l'extrémité sud du rocher. Cette tour monumentale continuait l'enfilade des bâtiments représentatifs (palais, galerie, chapelle) du château supérieur. Une porte d'entrée, dont la richesse de la décoration reflète l'importance du site, perçait le mur d'enceinte de la basse-cour. Un deuxième porche pour piétons (poterne), dont la face ornementée s'ouvrait vers la basse-cour, remplaçait l'ancien accès à pied à partir du bourg. Le maître d'ouvrage de cette dernière grande période romane fut certainement Frédéric III, vassal assidu de l'Empire, c'est-à-dire des Gibelins.

Dessin du château vers 1200

La phase gothique

Période 7 (vers 1250)

Conformément à l'esprit de l'époque, le château de Vianden fut transformé intégralement en style gothique vers le milieu du 13e siècle. Tous les bâtiments représentatifs "Grand Palais", galerie monumentale, chapelle castrale, furent dotés de hauts pignons

gothiques en forme d'escalier. La tour d'habitation fut agrandie et un quartier d'habitation supplémentaire, le "Vieux Juliers", fut ajouté au coin nord-ouest du "Grand Palais". Cet ensemble de bâtiments fut également coiffé de hautes toitures gothiques. A la même époque, deux tours étaient ajoutées aux angles du bastion nord-ouest. C'est à ce moment que le château de Vianden acquit la silhouette caractéristique qu'il a gardée jusqu'au siècle dernier. Au cours de ce même programme de transformation, tous les plafonds des bâtiments représentatifs furent dotes de voûtes en ogives. Les remparts de la basse-cour furent prolongés du côté sud-ouest pour mieux garder l'accès au château. Ces bâtiments grandioses représentaient le pouvoir des comtes de Vianden vis-à-vis de leurs sujets. Mais ils attestaient aussi l'ambition des comtes par rapport aux Grands de l'Empire et surtout par rapport aux comtes de Luxembourg, leurs rivaux directs. Ces grands travaux de transformation furent réalisés sous le règne de Henri 1er, comte de Vianden et de Namur.

Dessin du château vers 1250

Le déclin

Période 8

Une gravure éditée par Mathias Merian nous montre le château de Vianden peu avant 1620. A ce moment, près de trois siècles se sont écoulés depuis la dernière grande période de construction, qui avait marqué l'apogée politique des Comtes de Vianden et le début des Temps Modernes. A la fin du 13e siècle, la Maison de Vianden tombe sous la suzeraineté des comtes de Luxembourg et perd rapidement toute son importance. Après la mort, en 1417, de la comtesse Marie de Sponheim et de Vianden, dernière descendante de la lignée de Vianden, le comté (avec le château) devint la propriété par héritage de la branche ottonienne des Orange-Nassau.

Avec l'extinction de la lignée de Vianden, l'architecture du château perdit sa fonction représentative et la plupart des éléments d'apparat furent transformés en de grandes structures de stockage (début 15e siècle).

Lorsque furent construits, au cours de la première moitié du 17e siècle, deux nouveaux quartiers ("de Nassau") d'habitation pour les intendants (baillis) au centre du château, Vianden avait depuis longtemps perdu son rayonnement politique. Durant la longue période de démantèlement de cette ancienne résidence princière, toutes les constructions

médiévales de la basse-cour furent rasées et remplacées par de nouvelles constructions agricoles et artisanales (écuries, ferronneries, brasserie, logements de gardiens). Le château perdit les dernières traces de son prestige en août 1820, quand le bourgeois Wenceslas Coster de Vianden devint propriétaire par adjudication publique du domaine. Après l'acquisition du château, le nouveau maître des lieux entama aussitôt le démantèlement et la vente des matériaux (surtout les poutres des toitures et des greniers, ainsi que le plomb et le cuivre des gouttières).

Dessin du château vers 1620

Annexe B - La Villa gallo-romaine d'Echternach

Après les premières expérimentations sur le site de Vianden, nous nous sommes servis des données et des travaux réalisés sur la villa d'Echternach pour tester notre Système d'Information. Ce site luxembourgeois est également géré par le Service des Sites et Monuments Nationaux du Luxembourg.
Pour donner un aperçu de l'histoire de ce site et des travaux de restitution qui y ont été réalisés, nous proposons ci-dessous un article écrit par les chercheurs du MAP-CRAI qui les ont effectués.

Restitution de la villa gallo-romaine d'Echternach

Didier Bur

CRAI-MAP
Participants : D. Bur, D. Laroche, J-P. Perrin
Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie
UMR 694 CNRS «Modèles et simulations pour l'Architecture, l'urbanisme et le paysage».
Ecole d'Architecture de Nancy Ű 2 rue Bastien Lepage 54000 Nancy
http ://www.crai.archi.fr

SSMN
Participants : J. Metzler, J. Zimmer
Service des Sites et Monuments Nationaux du Luxembourg
26 rue Münster L-2160 Luxembourg

La reconstitution comme composante d'une muséographie

Lorsqu'au cours des années 1975 et 1976, le Service des Sites et Monuments Nationaux du Luxembourg entreprit des fouilles sur le site de la villa gallo-romaine d'Echternach. Les différents relevés, stratigraphies, fragments, fournirent quantité d'informations qui furent ensuite analysées et rassemblées en 1981 dans l'ouvrage de référence traitant de ce site : « Ausgrabungen in Echternach ».
Les techniques et matériels informatiques de l'époque étaient loin de permettre une quelconque reconstitution spatiale par ordinateur qui aurait pu illustrer ou étayer les hypothèses volumétriques qui furent alors élaborées. Le site archéologique fut au fil des années quelque peu délaissé, puis dans le cadre de l'aménagement du pôle touristique environnant, une remise en valeur a été décidée. Elle se caractérise principalement par la construction d'un musée aux abords même des vestiges.
L'idée centrale de ce musée est de présenter aux visiteurs une approche de la vie quoti-

dienne dans ce palais-villa à la fin du premier siècle après J-C : maquettes, ambiances, objets, présentations des différentes pièces d'habitation et occupations qui s'y déroulaient.
Le Service des Sites et Monuments Nationaux du Luxembourg a confié au CRAI la réalisation de tous les documents numériques devant être présentés au public, que ce soit dans le musée ou sur des panneaux *in situ*, permettant aux visiteurs de faire un rapport immédiat entre ce qui subsiste et les hypothèses de reconstitution.

Architecture

Comme beaucoup de villas des alentours et du Nord de la Gaule (Abbeville, Estrées-sur-Noye) le plan d'origine de la maison est composé de corps de bâtiments symétriques de part et d'autre d'un axe traversant une cour, ici entourée d'un portique et agrémentée d'un bassin. Les ordres présents à Echternach sont l'ordre ionique, corinthien et surtout toscan, l'ensemble de l'architecture évoquant le traité de Vitruve.
La partie centrale de la villa (118m x 62m) s'organise autour d'une salle d'apparat monumentale flanquée de pièces à vivre, chambres, cuisines, etc. De chaque côté de ce bâtiment principal se trouvent deux cours à péristyle menant pour l'une à un très grand triclinium et pour l'autre à l'ensemble balnéaire (Fig. 1).

Fig. 1 : vue aérienne de la villa

Aux extrémités Nord du portique entourant la cour se trouvent deux petits bâtiments dont l'un à l'Est semble être un triclinium d'été et l'autre à Ouest dont l'usage reste indéterminé. Plus loin ont été localisés d'après des photographies aériennes d'autres bâtiments : logements d'esclaves, granges, écuries, etc. La villa (située sur la voie romaine menant à Trèves) était sans doute destinée à l'élevage de chevaux vendus à l'armée romaine.
La construction de la villa a été datée des années 70 après J-C (peu avant la destruction de Pompeï). Nombre de fragments indique qu'une partie de la décoration en marbre avait été importée de Rome, ce qui laisse à penser que l'architecture et la décoration étaient fortement influencées par celle de l'Empire. Enfin, le sol de plusieurs pièces était recouvert de mosaïques, de même que les parois des bassins ; la cour et son bassin

piscicole (ce dernier fonctionnant toujours) ont été restitués par référence à la villa de Fishbourne (GB).

Méthode

Outre les hypothèses et propositions de reconstitution existantes, les plans de relevés originaux, les sources principales d'informations et de références se situent bien dans l'architecture et la décoration pompéienne du 1er siècle ainsi que dans les villas similaires de la Gaule du Nord (Nennig, Borg, Reinheim...).
Si elle n'est plus originale ni innovante, une reconstitution virtuelle a cependant le mérite de « forcer » son auteur à donner une mesure à toute chose, à compulser et croiser exhaustivement la documentation dont il dispose et ce faisant, de mettre à jour des erreurs, les oublis, qui n'auraient pas été détectés lors d'une reconstitution « traditionnelle » et même de soulever des questionnements restés jusqu'alors inexplorés : nature des matériaux employés, méthodes de mise en oeuvre (systèmes constructifs des charpentes, dimensions et proportions des ouvertures...).
Ainsi, la reconstitution originale montrait le portique principal interrompu dans sa partie centrale par un portique corinthien plus haut, supportant la toiture de la salle centrale, bien que le site n'ait pas été fouillé à cet endroit. Lors de la saisie, la mesure d'entrave des colonnes se trouvait réduite de moitié de part et d'autre de l'ensemble corinthien, alors que s'il était poursuivi de façon continue sur toute la façade, le positionnement des colonnes montrait un ensemble de 22 colonnes plus satisfaisant et c'est donc cette option de restitution qui fut retenue (Fig. 2 et 3).

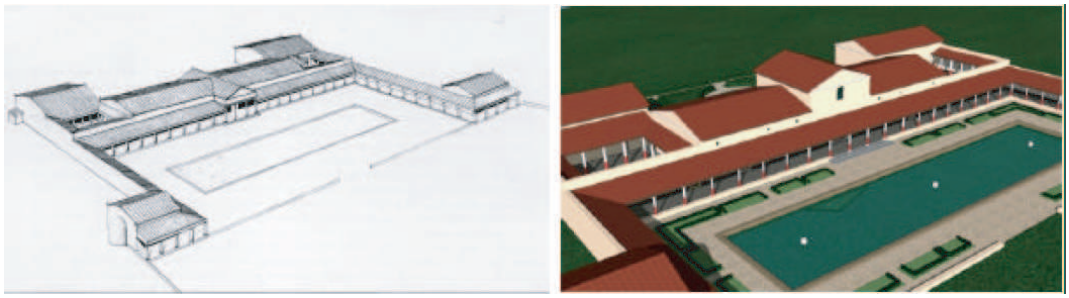


Fig. 2 et 3 : la restitution originale de 1981 et celle proposée aujourd'hui

De même, l'abside du grand triclinium était restituée à l'origine couverte par une coupole. La modélisation de ce volume a montré que la hauteur sous plafond du triclinium aurait alors dépassé les sept mètres, et que le rayon au sol de cette abside surmonté d'une telle coupole créait un volume assez disgracieux dans la cour à péristyle. Par ailleurs, une toiture en terrasse aurait été plus problématique essentiellement à cause du climat local (le bassin de la cour à portique des bains a par exemple rapidement été transformé en jardin). C'est donc une troisième hypothèse de toiture conique qui fut adoptée. Les fouilles n'ont pas permis de déterminer s'il y avait des ouvertures dans les maçonneries de l'abside ; plusieurs versions ont été simulées et celle retenue

montre quelques petites ouvertures comme à Nennig (Fig 4 et 5).

Fig. 4 et 5 : hypothèses de restitution du triclium

Il est à noter également que les nombreuses rencontres inter-disciplinaires (archéologues-architectes-infographistes) furent le lieu privilégié des réactions et nouveaux questionnements : les images en cours d'élaboration sont un facteur « déclencheur » indéniable pour l'archéologue. Il réagit sur la nature et l'aspect des matériaux, la conformation des éléments architecturaux, les proportions ou encore les procédés constructifs qui sont *de facto* mieux cernés, la visualisation tridimensionnelle met en évidence des points habituellement laissés dans l'ombre. C'est principalement pour cette raison que la phase de reconstitution proprement dite est plus porteuse d'avancées dans la connaissance archéologique du bâtiment ou du site que les résultats visuels qui en sont tirés.
La maquette détaillée a été élaborée en superposition au fond de plan des fouilles et d'après les relevés des fragments de bases, chapiteaux, éléments décoratifs, tuiles, etc. Le caractère symétrique et répétitif de l'architecture a conduit à la création d'une bibliothèque 3D constituée pour l'occasion, chacun de ses éléments étant inséré de nombreuses fois dans la maquette globale.

Résultats

Une première série d'images montrant les différents corps de bâtiments et la manière avec laquelle il composent l'édifice d'origine a été produite (Fig. 6 et 7), se poursuivant avec l'adjonction de bâtiments supplémentaires lors de la deuxième période de construction au début du 2e siècle. Certaines de ces images ont été calculées depuis un point de vue virtuel identique à celui d'un observateur situé devant le panneau sur lequel est imprimée l'image, lui permettant d'imaginer la volumétrie du bâtiment en fonction des restes devant lesquels il se trouve.

Une autre série d'images montrant le « programme décoratif » a été réalisée (Fig. 8 et 9). Les fresques murales utilisées pour ces images sont des images scannées de peintures pompéiennes retravaillées. La quasi-absence de fragments de fresques retrouvés

Fig. 6 et 7 : façade sur cour et façade « arrière » du bâtiment central

à Echternach autorise seulement à présenter ces décorations comme probables du point de vue de leurs couleurs et de leur géométrie générale.

Fig. 8 et 9 : décoration intérieure de la salle centrale et de la cour à péristyle devant les bains

Pour les images détaillées en extérieur, la villa virtuelle devant être incrustée dans son site réel, une prise de vue photographique à 360ř et retravaillée pour y faire disparaître tout élément contemporain (ainsi que tous les arbres résineux absents au premier siècle) a été élaborée (Fig. 10 et 11).

Réalisme de la représentation et vérité archéologique

Une interrogation récurrente en matière de reconstitution informatique provient paradoxalement du caractère hyper-réaliste des résultats graphiques obtenus. En effet, n'est-ce pas « abuser » le spectateur que de lui donner à voir des images de qualité photographiques dans lesquelles il ne peut distinguer ce qui est de l'ordre de l'hypothèse, de la probabilité ou de la certitude ? Différents moyens de représentation à notre

Fig. 10 et 11 : la villa et ses dépendances dans son site

disposition auraient pu être employés : niveaux de transparence, netteté ou flou, fausses couleurs. Cependant l'évocation des ambiances plutôt que celle de vérités archéologiques indiscutables nous a conduit à ne pas mettre en évidence les points sur lesquels cette reconstitution est le résultat d'extrapolations cependant clairement référencées. L'exemple typique de cette attitude est le portique principal et ses fresques pariétales : la connaissance partielle de son état original aurait voulu que les images le montrent sans fresques peintes puisque peu de fragments colorés ont été retrouvés. Un des objectifs de ces images étant de montrer un aspect souvent méconnu du grand public - l'abondance des décors et des couleurs dans l'architecture romaine, figurer le portique sans ses fresques du quatrième style pompéien lui aurait fait perdre une grande partie de son sens (Fig. 12 et 13).
Les images doivent de plus être indissociables du propos les accompagnant. Il est impératif d'y joindre un avertissement stipulant que le réalisme quasi-photographique est le vecteur d'une traduction aussi fidèle que possible des ambiances mais que pour autant ces images sont le fruit d'un faisceau d'hypothèses probables plutôt que de la mise en équation de certitudes.

Fig. 12 et 13 : aile ouest du portique de la cour

Bibliographie

« Ausgrabungen in Echternach » Johny Zimmer, Jeannot Metzler, Lothar Bakker
Ed. Publications nationales, Luxembourg 1981.
« Das Badegebäude der römischen villa von Borg » Miron, Brück, Frey, Kühnen
Ed. Kulturstiftung für den Landkreis MerzigWadern
« BliesbrückReinhein, parc archéologique européen » Petit, Schaub
Ed. Imprimerie nationale.
« La villa, de la Rome antique à Le Corbusier » Ackermann
Ed. Hazan.
« Architecture romaine » WardPerkins
Ed. Electa.
« Quelques apports récents à l'étude de l'habitat rural gallo-romain dans la région mosane » Van Ossel
In 51e suppl. Gallia.
« Implantation et esquisse d'une typologie des villas galloromaines en Alsace et en Lorraine » Poinsignan
In Cah. Alsac. Arch. Art hist. 30.

Annexe C - Intégralité des données et des métadonnées

Nous avons décrit sommairement dans le Chapitre 7 les types de données relatifs aux sites de Vianden et d'Echternach. Nous donnons ici une description précise de ces types de données avec toutes les métadonnées les décrivant. Le schéma ci-dessous présente les différents types de données avec leurs attributs.

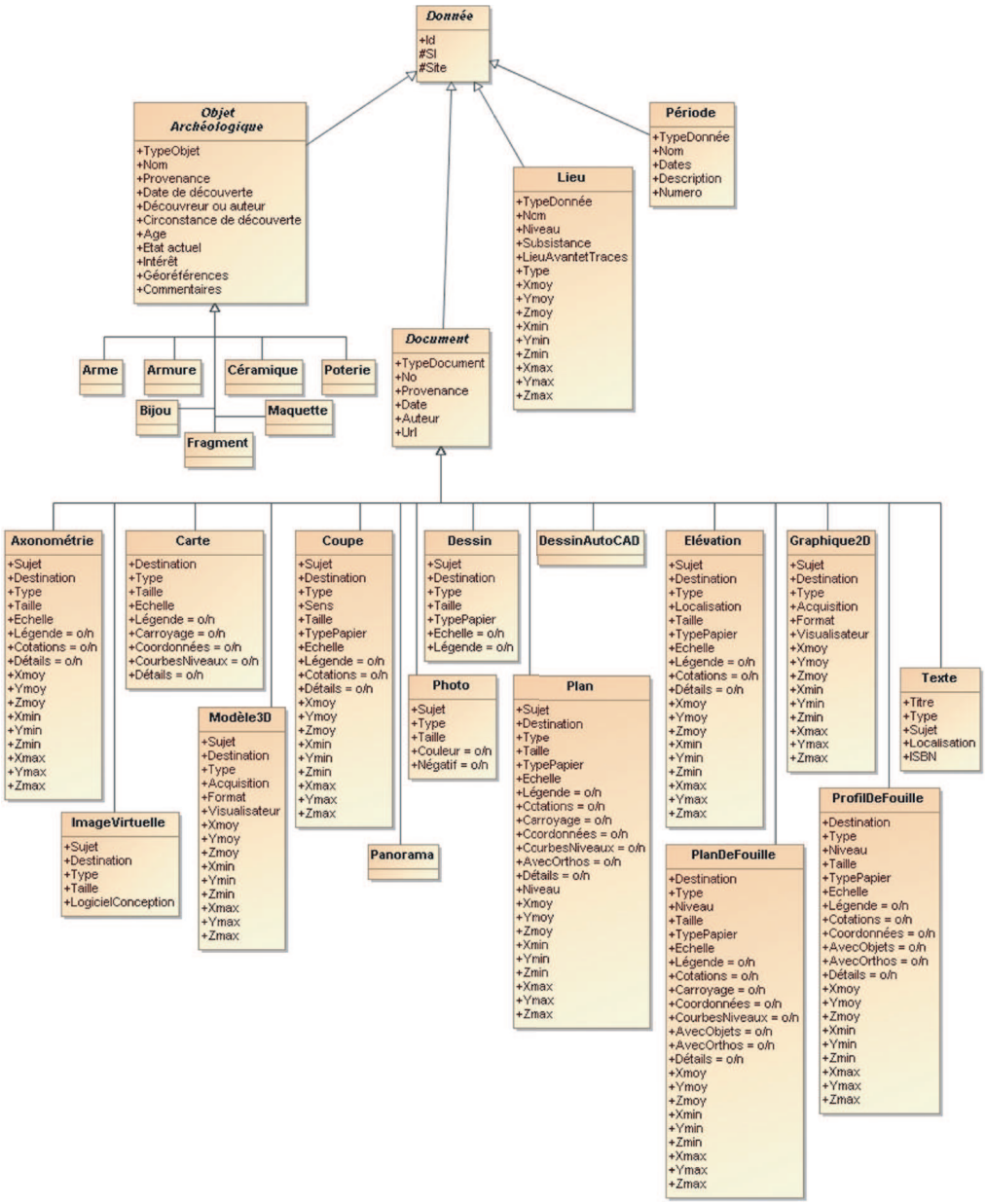


Schéma présentant les données, leurs métadonnées et la manière dont elles sont liées

Ce schéma illustre les concepts suivants :

- toutes les données ont un identifiant (Id), sont gérées par le Système d'Information (SI) et appartiennent à un site (Site) ;
- il y a quatre catégories de données : Lieu, Période, *Objet Archéologique* et *Document* (ces catégories sont abstraites car elles n'ont pas d'instances directes) ;
- les catégories de données héritent des attributs Id, SI et Site qui caractérisent toutes les données ;
- chaque catégorie a ses attributs propres qui, dans le cas des catégories de données abstraites (*Objet Archéologique* et *Document*) sont communs à toutes les données qui en font partie ;
- les données Axonométrie, Carte,..., Texte font partie de la catégorie *Document* : elles ont leurs attributs propres (Sujet, Destination, Type...) et héritent des attributs communs à tous les documents (No, Provenance, Date...) ;
- les données Arme, Bijou,..., Poterie font partie de la catégorie *Objet Archéologique* : elles n'ont pas pour l'instant d'attributs propres mais héritent des attributs communs à tous les objets (Nom, Provenance, Date de découverte...).

Pour donner un exemple, une donnée de type *dessin* est décrite grâce aux métadonnées suivantes :

- identifiant,
- nom du Système d'Information,
- nom du site,
- type de document (dessin),
- numéro,
- provenance,
- date,
- auteur,
- url (nom de l'image stockée),
- sujet,
- destination,
- type (général, partie, détail),
- taille,
- type de papier (blanc, millimétré, calque),
- échelle (oui ou non),
- légende (oui ou non).

Ce schéma permet donc de voir synthétiquement et précisément toutes les métadonnées que nous avons choisi d'enregistrer pour chaque type de donnée intégrée dans le Système d'Information.

Annexe D - Automatisation de la création de modèles 3D interactifs

Nous présentons dans cette annexe des travaux qui sont en cours dans le cadre de notre thèse. Nous encadrons une étudiante de Master à qui nous avons demandé d'automatiser la transformation de modèles 3D conçus dans AutoCAD® par le CRAI (données disponibles sur le site d'Echternach) en modèles VRML interactifs permettant l'accès à toutes les données faisant référence au lieu choisi dans le modèle. Nous intégrerons les fonctionnalités développées dans le cadre de ce stage de Master dans notre Système d'Information et nous proposerons une notice rédigée par l'étudiante, pour permettre à l'utilisateur de transformer simplement des modèles 3D AutoCAD® en modèles VRML interactifs, intégrables directement dans le Système d'Information (avec la procédure expliquée en 8.3.2).

Exploitation de modèles 3D d'un site archéologique pour la réalisation d'interfaces d'accès aux données d'un Système d'Information sur le Web

Céline Piacentile
Etudiante en Master 2 "Modélisation et Simulation des Espaces Bâtis", Ecole d'Architecture de Nancy
MAP-PAGE, INSA de Strasbourg
2006-2007

Nous avons à disposition au laboratoire du MAP-PAGE par l'intermédiaire du MAP-CRAI des données relatives à la villa gallo-romaine d'Echternach (Luxembourg). Ces données sont à la fois historiques textuelles (livre en allemand des fouilles ayant eu lieu dans les années 80), photographiques, iconographiques, mais aussi numériques puisque le CRAI avait été mandaté pour la réalisation d'images de synthèse pour le musée qui a été créé sur le site. Ces images de synthèse ont été réalisées à partir de modèles 3D générés sur AutoCad et 3D Studio. Sachant qu'Autocad est le logiciel utilisé par une majorité de professionnels en DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et d'archéologues, nous avons considéré ces fichiers comme données de départ.
L'objectif du projet est d'étudier les possibilités d'exploitation de dessins 2D et 3D au format .dwg pour leur utilisation comme interfaces d'accès à des données sur le Web, ce qui implique une transformation des modèles en VRML.
Or AutoCAD ne génère pas directement des fichiers au format VRML (extension .wrl). Il faut donc passer par un format intermédiaire puis utiliser un utilitaire pour convertir le fichier obtenu au format VRML. Pour ce faire, il existe plusieurs logiciels de modélisation. Nous disposons au laboratoire de deux logiciels 3D payants à savoir Maya et Sketchup.

Une des premières étapes de ce projet a été le choix du logiciel : en effet, dans un souci d'accessibilité, il a fallu comparer les divers logiciels en fonction de deux critères principaux, à savoir le prix et les difficultés de compréhension. De plus, il faut prendre en compte la simplicité des formes (pas de géométrie NURBS). Enfin, les modèles seront lourds et nous souhaitons pouvoir les retoucher. Considérant tous ces paramètres, nous avons finalement choisi Sketchup comme logiciel de modélisation 3D. Nous avons donc importé les données .dxf dans le logiciel et retravaillé le modèle (Figure 1).

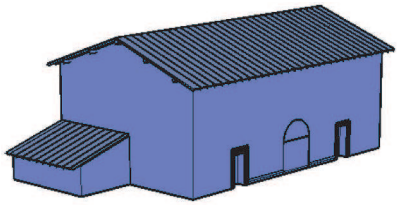
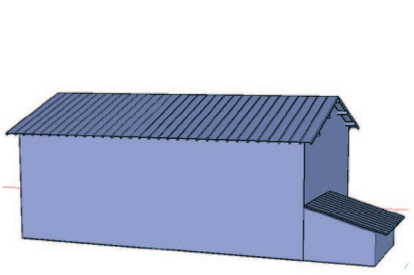


Figure 1 - Export du modèle 3d en format .dxf dans le logiciel Sketchup

Les options d'export sont également différentes selon les logiciels : Maya n'offre pas la possibilité d'utiliser des arêtes comme objets de représentation alors que c'est le cas de Sketchup. Contrairement aux modèles de Vianden traités dans Maya pour lesquels il n'était pas possible d'utiliser des textures, nous avons donc pu texturer les modèles d'Echternach dans Sketchup afin de les rendre plus réels.
Nous avions à notre disposition des images en format .jpg réalisées sous Artlantis, logiciel permettant d'obtenir des rendus d'images de très haute qualité, représentant les différents corps de bâtiments. De plus, les images utilisées pour réaliser les textures étaient présentes sous leur forme brute qu'il a fallu assembler et/ou adapter à la taille de l'objet texturé. Nous nous sommes donc inspirés de ces images pour améliorer géométriquement et "texturellement" le modèle à l'aide du logiciel Photoshop 7.0 (Figures 2 et 3).



Figures 2 et 3 - Données de départ ; à gauche le modèle 3D brut et à droite une image de synthèse

Possédant des images de synthèse représentant les coupes du bâtiment, il nous a semblé que créer une coupe afin de représenter l'intérieur des bâtiments était un apport. Il est

possible de réaliser automatiquement des coupes sur Sketchup mais pas de les exporter en VRML. Il a donc fallu créer le modèle 3D de la coupe manuellement pour l'exporter, ce qui ne fut pas aisé, à cause notamment de certaines formes géométriques s'exportant mal depuis AutoCad (Figure 4). La Figure 5 représente les modèles texturés réalisés dans Sketchup (coupe et extérieur).

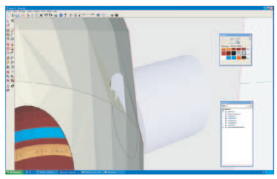


Figure 4 - Améliorations géométriques du modèle 3D

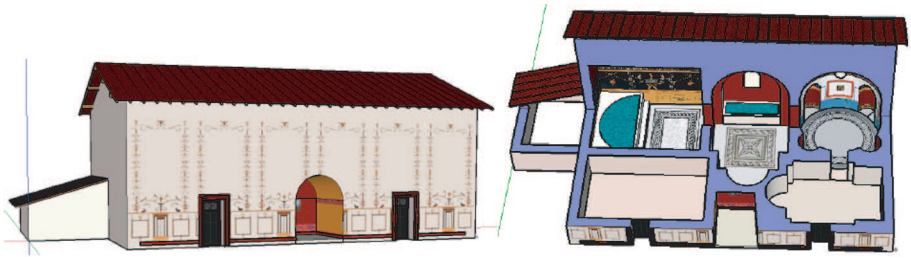


Figure 5 - Modèles 3D finaux texturés

Identification et discrétisation du modèle selon les lieux et les sous-lieux

Après export des modèles 3D obtenus sur Sketchup, nous avons étudié la structure du ficher VRML obtenu. La structure hiérarchique du modèle que nous souhaiterions obtenir est présentée sur la Figure 6.

Etant donné cette structure, nous avons décidé de discrétiser chacun des fichier VRML en fonction des lieux et des sous-lieux dans des bases de données à l'aide de l'outil PHPMyAdmin proposé dans le pack WAMP, et de reconstruire à l'aide de programmes PHP un VRML final. Pour cela, nous nous sommes appuyés de la structure des fichiers VRML.

VRML est un langage basé sur une organisation hiérarchique d'objets (appelés nœuds) ayant un nom et contenant des attributs appelés champs.
Il existe trois types de nœuds :

- ceux qui servent à regrouper (Figure 7) ;
- ceux qui contiennent des données (formes 3D, textures, scripts) ;
- ceux qui sont attachés à d'autres nœuds et qui ne peuvent être indépendants

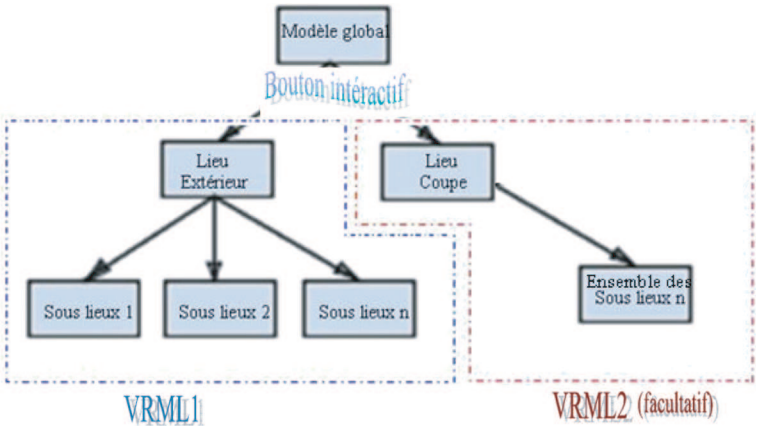


Figure 6 - Structure hiérarchique du VRML final représentant une entité lieu et sous-lieux

(`Material` par exemple, qui est un nœud permettant de donner les propriétés matérielles d'un objet, est toujours défini après le nœud `Appearance` et ne peut en être détaché).

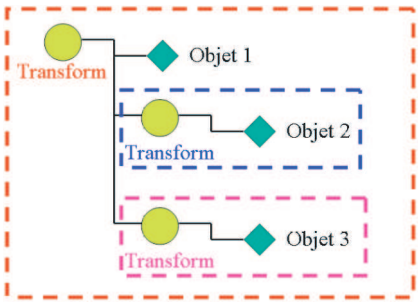


Figure 7 - Hiérarchie du nœud de regroupement `Transform`

Les fichiers VRML exportés depuis Sketchup ont la même structure présentée sur la Figure 7, l'objet 1 correspondant au lieu et les objets 2 et 3 de cet exemple correspondant aux sous-lieux. Nous avons donc décidé de nous servir du nœud `Transform` pour discrétiser le fichier en lieux puis sous-lieux au moyen d'une classe. Lorsque le programme PHP reconnaît le caractère `Transform`, il enregistre dans une table structuredeb le numéro de la ligne. Après avoir reconnu la structure de fin de `Transform`, nous avons enregistré de la même façon les numéros de lignes de fin de `Transform` (Figures 8 et 9).

Ainsi, nous avons créé une base de données nommée découpe, qui est constituée de plusieurs tables parmi lesquelles nous pouvons citer elfixes (éléments fixes), lieu, souslieu, matériaux, structuredeb et structurefin, elles-mêmes composées de plusieurs champs (Figure 10).

```
class DebutTransform //On appelle classe la structure d'un objet, c'est-à-dire la
déclaration de l'ensemble des entités qui composeront un objet
{
    var $estDebutTransform; //Toute variable est précédée par le caractère dollar ($)
    var $contenu;
    function testerContenu($instance)
    {
      if (substr(strstr($instance->contenu, "Transform {"),0,11) == "Transform {")
      {
        $estDebutTransform = 1;
      }
      else
      {
        $estDebutTransform = 0;
      }
      return $estDebutTransform;
    }
}
```

Figure 8 - Définition de la classe `Transform`

```
        if ($transform->estDebutTransform)
        {
        $compteTransform++;
        if ($compteTransform > 0)
        {
              fwrite($fichier5, $line_num_reel." Debut de Transform
$compteTransform\n");
                    $query = "INSERT INTO structuredeb (id,debut,numeroligne) Values
('','Debut de Transform','$line_num_reel')";
//echo $query2;
$result = mysql_query($query) or die("Erreur sur la requete d'insertion de
l'association");
              if ($intTransform == 0 and $intGroup == 0 and $compteTransform > 0)
              {
              }
              $intTransform = 1;
        }
```

Figure 9 - Enregistrement du numéro de ligne dans une base de données

Chacun des fichiers VRML est donc partitionné à l'aide d'un programme PHP qui place automatiquement les lignes de code dans chacun des champs d'une table selon sa structure (Figure 11).

Une fois cette étape terminée, le même programme PHP permet la reconstruction du fichier. Il recherche automatiquement les lignes de code concernées dans les tables et procède à l'ancrage du lieu et des sous-lieux sous la forme de liens URL qui permettront d'accéder à la page Web requise (Figure 12). Le programme que nous avons écrit procède aussi à la mise en évidence des parties choisies et sélectionnées grâce à un script écrit en JavaScript faisant intervenir des `ROUTE` (voir Figure 16).

Il a fallu définir un nœud `TouchSensor` afin de générer un événement lorsqu'un utilisateur clique sur un des objets inclus dans le groupe où il se trouve (Figure 13).

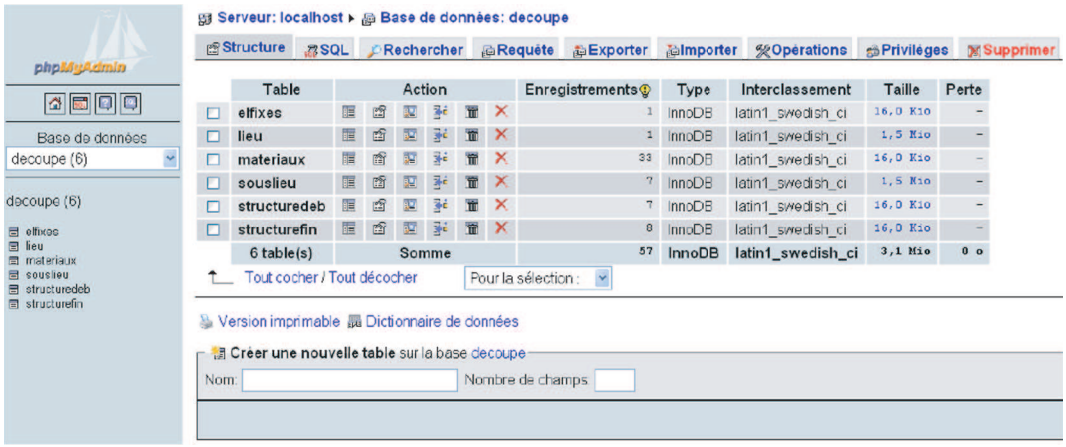


Figure 10 - Base de données découpe dans PHPMyAdmin

	id	contenudeb	contenufin	fichier	numeroligne
	BainsFrigidarium	Transform { translation 61062.337 4625.425 255.354...	Shape { appearance USE COL_ForegroundColor geomet...		65991
	Caldarium	Transform { translation -126232.408 -37062.137 160...	Shape { appearance USE COL_ForegroundColor geomet...		29659
	Frigidarium	Transform { translation -126232.408 -37062.137 160...	Shape { appearance USE COL_ForegroundColor geomet...		100175
	Niche	Transform { translation 50099.572 2263.22 845.905 ...	Shape { appearance USE COL_ForegroundColor geomet...		143088
	Praefumium	Transform { translation 0 22735.661 255.354 scale ...	Shape { appearance USE COL_ForegroundColor geomet...		73105
	Tepidarium	Transform { translation 47833.99 14533.732 255.354...	Shape { appearance DEF TEX_<Gairsboro>1 Appearanc...		83206
	Vestibule	Transform { translation -126232.408 -37062.137 160...	Shape { appearance USE COL_ForegroundColor geomet...		65452

Figure 11 - Affichage de la table souslieu ayant son nom pour identifiant

Dans le VRML de départ, les arêtes du modèle ont toutes la même `Appearance`, c'est-à-dire le même `Matérial` définissant leurs couleurs. Or, si nous souhaitons pouvoir sélectionner une partie du modèle, il faut qu'elles aient un nom différent. La Figure 14 donne le programme permettant de nommer les arêtes en fonction des lieux ou sous-lieux auxquels elles appartiennent.

Enfin, les chemins des événements sont décrits par la commande `ROUTE`, très importante lorsque nous désirons gérer des interactions dans la scène (Figure 15).

Ainsi, un lieu ou sous-lieu sur lequel nous passons sera mis en évidence par une surbrillance de ses arêtes et un objet sur lequel nous cliquons sera d'une part mis en évidence par un changement de couleur de ses arêtes et d'autre part par l'accès interactif à la base de donnés du lieu ou sous-lieu concerné dans le Système d'Information (Figure 16).

```
$nomduprojet= '".$nameProject."';
$ssprojet = '".$subProject."';
$paramlangue ='".$language."';
$ecriturephpdeb= "<?php echo \" " ;
$ecriturephpfin= " \"; \n ?> \n";
$choixlieu="lieu ".$idObjectlieu;
$urllieu = "url
\\\"../../../searchObject.php?nameProject=".$nomduprojet."&subProject=".$ssprojet."
&objectName="."lieu"."&objectId=".$idObjectlieu."&language=".$paramlangue."\\\"
\n";
$description = "description \\\"$choixlieu\\\" \n parameter
[\\\"target=droite\\\"]";
// Description de l'URL

$query = "SELECT debut from lieu";
$resultat = mysql_query($query) or die("Erreur sur la requete 'debutlieu'");
$deblieu = mysql_result($resultat, 0);
$deblieunew = str_replace("{ ","{\r\n",$deblieu); // \r est un retour chariot et \n  un
retour à la ligne dont le but est de rendre plus lisible le code VRML
$deblieunew2 = str_replace("}","\r\n}",$deblieunew); // str_replace remplace une chaîne
de caractère par une autre dans un fichier
$deblieunew3 = str_replace(" geometry","\r\ngeometry",$deblieunew2);
fwrite($fichier9,$deblieunew3."\n");
fwrite($fichier9, "Anchor { \n");
fwrite($fichier9, $ecriturephpdeb.$urllieu.$description.$ecriturephpfin);
fwrite($fichier9, "children [ \n" );
```

Figure 12 - Ancrage du lieu sous forme d'URL

```
fwrite($fichier9, "DEF JeTouche".$idObjectlieu1." TouchSensor { \n" );
fwrite($fichier9, "} \n" );
```

Figure 13 - Définition du nœud `TouchSensor`

```
$query = "SELECT milieudeb from lieu";
$resultatmilieudeb = mysql_query($query) or die("Erreur sur la requete 'entete'");
$milieulieudeb = mysql_result($resultatmilieudeb, 0);
$milieulieudebnew4 = str_replace(" Shape","\r\nShape",$milieulieudebnew3);
//$milieulieudebnew5 =
str_replace("diffuseColor","emissiveColor",$milieulieudebnew4);
$milieulieudebnew6 = str_replace("material Material { diffuseColor 0 0 0","material
DEF mat".$idObjectlieu1." Material {\r\n emissiveColor 1 0 0 transparency
0.6",$milieulieudebnew4);
$milieulieudebnew7 =
str_replace("COL_ForegroundColor","COL_ForegroundColor".$idObjectlieu1."",$milieuli
eudebnew6);
$iCpt = substr_count ($milieulieudebnew7,"url" );
$milieulieudebnew8  = str_replace( "url [\"","url [\"texture/",$milieulieudebnew7);
fwrite($fichier9,$milieulieudebnew8."\n");
```

Figure 14 - Appellation des arêtes selon les lieux ou sous-lieux auxquels elles appartiennent

```
fwrite($fichier9, "DEF Click".$idObjectlieu1." Script { \n");
fwrite($fichier9, "eventIn   SFTime   touch \n");
fwrite($fichier9, "field      SFBool   etat   TRUE \n");
fwrite($fichier9, "eventOut  SFColor  color \n");
fwrite($fichier9, "field     SFColor  active      0 1 0 \n");
fwrite($fichier9, "field     SFColor  inactive    1 0 0 \n");
fwrite($fichier9, " url    [ \n");
fwrite($fichier9, " \"javascript: function touch(){ \n");
fwrite($fichier9, "etat = !etat ; \n");
fwrite($fichier9, "if (etat){ \n");
fwrite($fichier9, "color = inactive ; \n");
fwrite($fichier9, "color = active ; }\n");
fwrite($fichier9, " else {\n");
fwrite($fichier9, "color = inactive ; \n");
fwrite($fichier9, "color = active ; }\n");
fwrite($fichier9, "}\"\n");
fwrite($fichier9, "] \n");
fwrite($fichier9, "} \n");
fwrite($fichier9, "ROUTE JeTouche".$idObjectlieu1.".touchTime TO
Click".$idObjectlieu1.".touch \n");
fwrite($fichier9, "ROUTE Click".$idObjectlieu1.".color TO
mat".$idObjectlieu1.".emissiveColor \n");
```

Figure 15 - Script en JavaScript permettant un changement de couleur lorsque l'utilisateur clique sur un objet

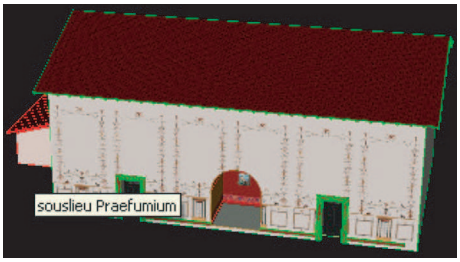


Figure 16 - Mise en surbrillance d'un sous-lieu avec affichage de son nom et clic sur le lieu qui permet l'accès à toutes les données enregistrées dans le Système d'Information relatives à ce lieu

Réalisation du modèle final

Une fois cette étape achevée, nous souhaitons que l'utilisateur puisse choisir interactivement entre l'extérieur du lieu et sa coupe. Cela se fait par l'intermédiaire d'un bouton qui est constamment en interface avec l'utilisateur appelé HUD (Heads Up Display). En effet, un premier bouton à coté du lieu fut créé mais il se posait des problèmes d'interactivité : lorsque l'utilisateur effectuait une rotation du modèle, le bouton ne lui était plus accessible (Figure 17).

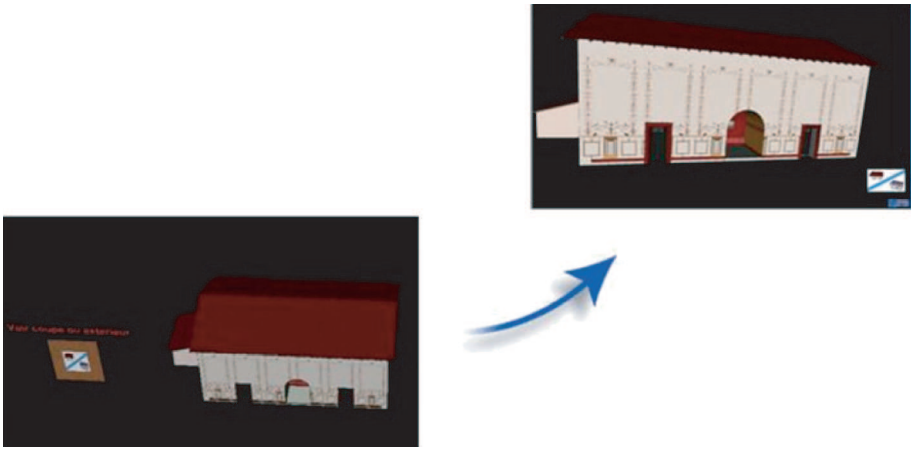


Figure 17 - Evolution du bouton permettant de passer de l'extérieur du lieu à sa coupe

Conclusion

Les programmes PHP réalisés sont à présent fonctionnels sur le premier modèle 3D. Cependant plusieurs résultats sont encore à atteindre dans les semaines à venir. Il faudra tout d'abord élaborer d'autres modèles afin de valider les programmes existants (une notice explicative sera alors rédigée permettant à l'utilisateur de réaliser un modèle ayant une structure cohérente vis-à-vis des programmes réalisés). Ensuite, nous souhaitons pouvoir visualiser un ou plusieurs modèles précédemment créés dans un VRML global. Pour ce faire, nous programmerons un formulaire proposant dans une liste déroulante des différents modèles et exécutant un script PHP permettant l'élaboration du modèle VRML.

Annexe E - Liste des publications

Articles dans des revues avec comité de lecture

É. Meyer, P. Grussenmeyer, J.-P. Perrin, A. Durand, P. Drap, 2007. A web information system for the management and the dissemination of Cultural Heritage data. In, *Journal of Cultural Heritage, Volume 8, Issue 4, Septembre-Décembre 2007, Pages 396-411.* doi:10.1016/j.culher.2007.07.003

E. Alby, **É. Meyer**, P. Grussenmeyer, M. Rampazzo, 2007. Gestion d'ouvrage architectural : de la saisie photogrammétrique à l'interface 3D d'accès aux données patrimoniales. *Revue XYZ (Association Française de Topographie), n.110 - 1er Trimestre 2007, pp. 45-53.*

É. Meyer, C. Parisel, P. Grussenmeyer, J. Revez, T. Tidafi, 2006. A computerized solution for the epigraphic survey in Egyptian Temples. In, *Journal of Archaeological Science, Volume 33, Issue 11, November 2006, Pages 1605-1616.* doi:10.1016/j.jas.2006.02.016

É. Meyer, 2005. La photogrammétrie pour le relevé épigraphique des colonnes de la Salle Hypostyle du Temple de Karnak. *Revue XYZ (Association Française de Topographie), n.102 - 1er Trimestre 2005, pp. 29-34.*

Communications avec actes

É. Meyer, P. Grussenmeyer, J.-P. Perrin, 2007. Virtual Research Environment for the Management and the Visualization of Complex Archaeological Sites. In, *The ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI-5/W47. Editors : F. Remondino, S. El-Hakim. Proceedings of the 2nd ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2007 : "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", ETH Zurich, Switzerland, 12-13 July 2007.* ISSN 1682-1777.

É. Meyer, P. Grussenmeyer, J.-P. Perrin, A. Durand, P. Drap, 2007. A Virtual Research Environment for Archaeological Data Management, Visualization and Documentation. *Accepté pour publication dans les actes du "Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology" CAA2007.* 35e conférence du CAA *"Layers of perception. Advanced technological means to illuminate our past"*, 2-6 Avril 2007, Berlin, Allemagne. 6p.

É. Meyer, P. Grussenmeyer, J.-P. Perrin, A. Durand, P. Drap, 2006. Intra-site Level Cultural Heritage Documentation : Combination of Survey, Modeling and Imagery

Data in a Web Information System. *Short papers from the joint event CIPA / VAST / EG / EuroMed 2006, 30 October - 4 November 2006, Nicosia, Cyprus.* Edited by M. Ioannides, D. Arnold, F. Niccolucci, K. Mania, EPOCH Publication, pp. 129-134. ISBN-10 : 963 8046 74 0.

P. Patias, S. Sylaiou, L. Sechidis, I. Spartalis, P. Grussenmeyer, **É. Meyer**, T. Landes, E. Alby, 2006. A proposed low-cost system for 3D archaeological documentation. *Project papers from the joint event CIPA / VAST / EG / EuroMed 2006, 30 October - 4 November 2006, Nicosia, Cyprus.* Edited by M. Ioannides, D. Arnold, F. Niccolucci, K. Mania, EPOCH Publication, pp. 145-149. ISBN-10 : 963 8046 75 9.

P. Grussenmeyer, E. Alby, **É. Meyer**, M. Rampazzo, 2006. 3D Building Model as an Interface for a Web Information System. Case study of the Pontonniers high school in Strasbourg. In, *The ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, Part 5. Editors : H.-G. Maas, D. Schneider. Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'. Dresden, Germany, 25-27 September 2006.* ISSN 1682-1750.

É. Meyer, P. Grussenmeyer, J.-P. Perrin, A. Durand, P. Drap, 2006. Integration of heterogeneous cultural heritage data in a web based information system : a case study from Vianden Castle, Luxembourg. *Actes du "Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology" CAA2006.* 34e conference du CAA *"Digital Discovery. Exploring New Frontiers in Human Heritage"*, 18-23 Avril 2006, Fargo, ND, USA. BAR International Series 1568, Oxford, 10p.

É. Meyer, P. Grussenmeyer, J.-P. Perrin, 2006. First proposals for a web-based information system in archaeology : storage and interactivity for the preservation and the handling of Cultural Heritage data. *Proceedings of the Third Taiwanese-French Conference on Information Technology (TFIT), Nancy, March 28-30, 2006.* Edited by Yih-Kuen Tsay (National Taiwan University, Taiwan) and Samuel Cruz-Lara (LORIA and INRIA Lorraine, France), pp. 195-211.

É. Meyer, P. Grussenmeyer, J.-P. Perrin, 2005. Evolution of surveying practices in archaeology : a technical overview to introduce new management possibilities for cultural heritage data. In, *The ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI-5/C34, pp. 923-928.* ISSN 1682-1750.

J. Revez, T. Tidafi, C. Parisel, **É. Meyer**, N. Charbonneau, A. Semlali, 2004. Méthodes informatisées de relevés et de reconstitution archéologique : le cas du temple d'Amon à Karnak. In, J.-Cl. Goyon, C. Cardin (dir.), *Proceedings of the Ninth International Congress of Egyptologists - Actes du neuvième congrès international des égyptologues. Grenoble, 6 - 12 septembre 2004* (Orientalia Lovaniensia Analecta, 150). Louvain : Peeters, 2007 : 1599 - 1610.

É. Meyer, P. Grussenmeyer, T. Tidafi, C. Parisel, J. Revez, 2004. Photogrammetry for the epigraphic survey in the great hypostyle hall of Karnak temple : a new approach. *Actes du XXe Congrès de la Société Internationale de Photogrammétrie et de Télédétection (ISPRS), Istanbul, Turquie 12-23 Juillet 2004. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISSN 1682-1777, Vol. XXXV, part B5, pp.377-382.*

Communications sans actes

É. Meyer, C. Parisel, 2004. Une solution informatique pour le relevé épigraphique des temples de Karnak. *Conférence au Congrès de l'Association francophone pour le savoir (ACFAS) 2004, Colloque "Conception, communication et figuration architecturales : quelle place pour l'informatique ?". Montréal, Université du Québec à Montréal (UQÀM), Mai 2004.*

Autres publications

É. Meyer, 2004. Rapport sur les fonctions de relevé épigraphique corrigées et améliorées. *Rapport de travail interne du Groupe de Recherche en Conception Assistée par Ordinateur (GRCAO). Janvier 2004, 12 p.*

É. Meyer, 2003. Modélisation photogrammétrique de l'épigraphie des colonnes de la salle hypostyle du temple de Karnak. *Mémoire de DEA Modélisation et Simulation des Espaces Bâtis, 99 p.* `http://www.crai.archi.fr/media/pdf/E_Meyer_memoireDEA0203.pdf`

Résumé - Abstract

L'activité de documentation du patrimoine archéologique évolue avec le développement des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC). Traditionnellement associée à de l'archivage, la documentation d'un site archéologique peut aujourd'hui également être synonyme de publication, puisqu'elle peut être diffusée en ligne aussi bien à d'autres professionnels qu'au grand public. Cette thèse propose un modèle de Système d'Information dédié à la documentation sur Internet de sites patrimoniaux. Il permet de conserver, gérer et représenter des documents traditionnels, des données issues de relevés bi- et tridimensionnels, mais aussi des résultats de travaux de restitution et d'imagerie. Dans un premier temps, l'étude établit un état de l'art qui permet d'appréhender les moyens actuels et les besoins des professionnels du patrimoine en termes de conservation, visualisation et publication de leurs données. Puis, notre approche considère ces préoccupations pour définir les fonctionnalités du Système d'Information que nous proposons. Sur la base d'exemples issus du patrimoine luxembourgeois (le Château de Vianden et la Villa d'Echternach), nous décrivons la manière dont nous conservons les données et les métadonnées associées, ainsi que les outils développés pour la représentation de ces informations. Nous présentons aussi nos principes de gestion des données, basés sur les liaisons spatio-temporelles qui peuvent exister entre les différents documents. Ces liaisons nous permettent de proposer l'utilisation de graphiques bidimensionnels ou de modèles tridimensionnels comme des supports privilégiés de navigation et d'interaction avec tous les autres documents conservés. Une modélisation globale du Système d'Information, pouvant servir de métamodèle de système de documentation en ligne, nous permet finalement d'ouvrir notre champ d'application à d'autres domaines comme l'architecture ou le génie civil.
Mots-clés : *Système d'Information, documentation, gestion de données, restitution, Internet, archéologie*

The documentation of archaeological heritage is an activity that evolves with the development of the New Information and Communication Technologies (NICT). Traditionally associated with recording, the documentation of an archeological site is also today synonym of publication, because it can be disseminated on-line both to other professionals and to the general public. This PhD thesis proposes a model of Information System dedicated to the documentation on Internet of patrimonial sites. It allows to record, to manage and to represent traditional documents, data coming from bi-and three-dimensional surveys, but also results of restitution and imagery works. At first, the study establishes a state of the art that allows knowing the current means and the needs of the heritage professionals in terms of conservation, visualization and publication of their data. Then, our approach considers these preoccupations to define the features of the Information System that we propose. On the basis of examples stemming from the Luxemburg heritage (the Castle of Vianden and the Villa of Echternach), we describe the way we keep the data and the associated metadata, as well as the tools developed for the representation of this information. We also present our principles of data management, based on the spatiotemporal connections that may exist between the various documents. These connections allow us to propose the use of bi-dimensional graphics or three-dimensional models as privileged supports of navigation and interaction with all other preserved documents. A global modeling of the Information System, being able to serve as a metamodel of system of on-line documentation, allows us finally to open our scope to other domains like architecture or civil engineering.
Keywords : *Information System, documentation, data management, restitution, Internet, archaeology*