



HAL
open science

**Spécification et implémentation du système d'aide à la
décision multicritère pour la maintenance préventive et
la gestion du patrimoine de la société d'autoroute
ESCOTA : le projet SINERGIE**

Céline Sanchez

► **To cite this version:**

Céline Sanchez. Spécification et implémentation du système d'aide à la décision multicritère pour la maintenance préventive et la gestion du patrimoine de la société d'autoroute ESCOTA : le projet SINERGIE. domain_stic.inge. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007. Français. NNT : 2007ENMP1487 . tel-00202653

HAL Id: tel-00202653

<https://pastel.hal.science/tel-00202653>

Submitted on 7 Jan 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ED n°432 : Sciences et Métiers de l'Ingénieur

N° attribué par la bibliothèque

|||||

T H E S E

pour obtenir le grade de
Docteur de l'École des Mines de Paris
Spécialité "Sciences et Génie des Activités à Risques"

présentée et soutenue publiquement par
Céline SANCHEZ

le 6 Décembre 2007

**Spécification et Implémentation du Système d'Aide à la Décision
Multicritère pour la Maintenance Préventive et la Gestion du Patrimoine de
la Société d'Autoroute ESCOTA : le projet SINERGIE**

Jury

J.P. Magnan	Professeur ENPC	Président et Rapporteur
D. Noyes	Professeur ENIT-LGP	Rapporteur
R. Mahl	Professeur ENSMP-CRI	Examineur
F. Guarnieri	Maître de Recherche-ENSMP	Examineur
A. Nicolas	ESCOTA	Examineur
B. Mahieu	ESCOTA	Examineur
J. Montmain	Professeur EMA-LGI2P	Directeur de thèse
M. Vinches	Maître-Assistant EMA-CMGD	Co-Directeur de thèse

Remerciements

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une convention « CIFRE » (convention industrielle de formation par la recherche, sous l'égide du Ministère de la Recherche) regroupant le Laboratoire de Génie Informatique et Ingénierie de Production (LGI2P), le Centre des Matériaux de Grande Diffusion (CMGD) de l'École des Mines d'Alès et la société d'autoroute ESCOTA.

Je remercie l'ensemble des professeurs qui ont accepté de faire partie de ce jury de thèse et de l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en commençant par :

- Daniel NOYES, Professeur à l'École Nationale d'Ingénieur de Tarbes et Directeur du Laboratoire de Génie de Production, qui m'a fait l'honneur d'accepter d'être rapporteur de ce manuscrit.
- Jean-Pierre MAGNAN, Professeur à l'École Nationale des Ponts et Chaussées qui me fait le privilège d'être rapporteur sur mon travail.
- Robert MAHL, Professeur à L'École des Mines de Paris et chercheur au Centre de Recherche en Informatique à Fontainebleau. Je lui suis reconnaissante d'avoir accepté d'examiner mes travaux et en suis très honorée.
- Franck GUARNIERI, Directeur du Pôle Cindyniques à Sophia Antipolis pour me faire l'honneur d'examiner mes travaux. Sa rigueur et son implication dans l'avancement et le suivi des thèses de notre formation doctorale Sciences et Génie des Activités à Risques, avec notamment l'organisation de séminaires réguliers à cet effet, m'ont obligée à rédiger et communiquer sur mon travail, ce qui est d'une aide incontestable au moment de la rédaction.

Je remercie tout naturellement mes directeurs de thèse, en commençant par Marc VINCHES enseignant-chercheur au CMGD, qui a su me guider et m'aider dans l'apprentissage du Génie Civil. Son aide m'a été précieuse notamment dans l'acquisition et la compréhension du vocabulaire indispensable à la compréhension du métier à ESCOTA, et il a su cibler exactement les cours dont j'ai eu besoin. Je le remercie pour son aide et son soutien sans lesquels je n'aurais jamais pu m'intégrer aussi rapidement dans le service SVS.

Je tiens à manifester toute ma reconnaissance à Brigitte MAHIEU, chef du service Structure Viabilité Sécurité où j'ai travaillé pendant ces trois années. Moteur dans l'initiation de ce projet, elle a été un élément clé par sa participation active à la définition des bases et la modélisation des processus qui a permis l'aboutissement de ce travail. Ceci a souvent demandé des heures d'interviews pour lesquelles elle a toujours su trouver le temps et être à l'écoute.

Je remercie également notre Directeur de l'Exploitation, André NICOLAS, pour avoir suivi et soutenu le projet durant ces trois années et pour nous faire l'honneur de participer à la soutenance. A l'initiative du projet, il a su, par des interventions ponctuelles et nécessaires, faciliter mes contacts au sein des différentes entités de la Direction de l'Exploitation. Son attention aux aspects pratiques du logiciel nous a beaucoup aidés pour la mise en œuvre des fonctionnalités requises.

Ma gratitude envers mon directeur de thèse Jacky MONTMAIN va bien au delà des remerciements d'usage. Je lui suis reconnaissante d'avoir accepté de diriger mes travaux. Il a su me communiquer son souci de la qualité, de la précision et de la clarté pour la présentation des idées, tant dans la rédaction des documents et articles tout au long de notre collaboration, que dans les exposés lors des conférences et colloques, ou réunions avec les membres d'ESCOTA. Je lui suis reconnaissante pour sa constance et sa rigueur dans le suivi de mon travail.

Je tiens également à associer à ces remerciements tous mes collègues du service SVS Structure Viabilité Sécurité pour l'ambiance chaleureuse et conviviale de travail qu'ils m'ont fait partager. Merci à Véronique pour avoir su résumer la vie à SVS : « SVS, cela veut dire *Service Vraiment Sympa* ! ».

Ces remerciements s'étendent particulièrement aux personnels des Districts d'ESCOTA qui ont accueilli le projet avec intérêt. Leur esprit critique a été à la base de remarques et suggestions, notamment pendant la phase d'analyse des besoins pour la conception de l'outil SINERGIE, en terme de recherche d'efficacité dans d'utilisation et de retour d'information.

Durant ces trois années, j'ai profité des conseils et expériences des membres du LGI2P, notamment Pierre Jean. Les séminaires réguliers organisés par notre école doctorale SGAR (Sciences et Génie des Activités à Risques) à l'École des Mines à Sophia Antipolis ont été bénéfiques et plus particulièrement les critiques et remarques constructives d'Éric Rigaud à des moments clés de la thèse et je le remercie pour son soutien et son objectivité.

Enfin, j'ai une pensée toute particulière pour mes parents dont le soutien et le coaching tout au long de mes études m'ont permis de mener à bien ce doctorat. Je leur suis très reconnaissante d'avoir toujours été à mes côtés en toutes circonstances et d'avoir su me transmettre valeurs morales, goût du travail, simplicité et persévérance. Je souhaite de tout mon cœur leur offrir à mon tour ce qu'ils méritent tant.

Table des matières

INTRODUCTION.....	9
CHAPITRE I: LA GESTION DE PATRIMOINES EN GÉNIE CIVIL	17
I.1 INTRODUCTION	17
I.2 LE RISQUE EN GÉNIE CIVIL	17
I.2.1 <i>Les dimensions d'analyse du risque.....</i>	<i>17</i>
I.2.2 <i>La gestion technico-économique d'infrastructures routières.....</i>	<i>19</i>
I.2.3 <i>Analyse de risque et gestion d'autres types d'infrastructure : les digues et barrages</i>	<i>23</i>
I.2.4 <i>Les enjeux de la gestion du patrimoine</i>	<i>27</i>
I.3 LA PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE DES BTP.....	29
I.3.1 <i>La situation actuelle – un contexte d'infrastructures vieillissantes</i>	<i>29</i>
I.3.2 <i>La situation actuelle – les savoirs, les outils.....</i>	<i>30</i>
I.3.3 <i>La gestion de patrimoine est une décision en organisation</i>	<i>31</i>
I.4 PROBLÉMATIQUE SPÉCIFIQUE DE LA SOCIÉTÉ D'AUTOROUTES ESCOTA EN MATIÈRE DE GESTION DE PATRIMOINE.....	34
I.4.1 <i>Présentation de la société ESCOTA.....</i>	<i>34</i>
I.4.2 <i>Le processus décisionnel de maintenance et de gestion du patrimoine infrastructure chez ESCOTA 35</i>	<i>35</i>
I.5 CONCLUSION	41
CHAPITRE II: LA SOLUTION LOGICIELLE SINERGIE	43
II.1 INTRODUCTION	43
II.2 LE PROCESSUS DE LA DÉCISION POUR LA GESTION DU PATRIMOINE	44
II.3 LES CHOIX DE CONCEPTION.....	49
II.4 APPROCHE OBJET UML.....	49
II.4.1 <i>Les acteurs</i>	<i>51</i>
II.4.2 <i>De la description des fonctions du système au modèle objet.....</i>	<i>52</i>
II.4.3 <i>Modèle UML de SINERGIE (diagramme des classes).....</i>	<i>65</i>
II.5 MODÉLISATION DU SYSTÈME D'INFORMATION.....	67
II.5.2 <i>Regroupement des entités.....</i>	<i>70</i>
II.5.3 <i>Le Modèle Conceptuel des Données</i>	<i>74</i>
II.6 GÉNÉRICITÉ ET ÉVOLUTIVITÉ.....	75
II.6.1 <i>Ajout d'un nouveau domaine au modèle</i>	<i>76</i>
II.6.2 <i>Un exemple d'intégration de nouvelles connaissances caractérisant le patrimoine : la caractérisation du risque naturel.....</i>	<i>76</i>
II.6.3 <i>Transposition à une autre société d'autoroutes</i>	<i>77</i>
II.6.4 <i>Transposition à un autre gestionnaire de patrimoine</i>	<i>78</i>
II.6.5 <i>Ajout de nouvelles fonctions.....</i>	<i>79</i>
II.7 CONCLUSION	80

CHAPITRE III: LE SUPPORT MATHÉMATIQUE DE SINERGIE.....	81
III.1 INTRODUCTION	81
III.2 L'ÉVALUATION MULTICRITÈRE	82
III.2.1 Introduction : trois niveaux d'évaluation hiérarchisés	82
III.2.2 À l'origine, l'évaluation de symptômes.....	83
III.2.3 Agrégation multicritère.....	86
III.3 IDENTIFICATION EXPÉRIMENTALE DES PARAMÈTRES ET ÉCHELLES D'ÉVALUATIONS	91
III.3.1 Macbeth.....	91
III.3.2 Échelles d'évaluations et cotations discrètes.....	93
III.3.3 Imprécision des évaluations.....	102
III.4 JUSTIFICATION DES CHOIX	107
III.4.1 Point de vue des échelles continues	107
III.4.2 Extensions	110
III.4.3 Point de vue des échelles finies discrètes.....	111
III.5 ROBUSTESSE DE L'ÉVALUATION	119
III.5.1 Risque d'erreur d'estimation	120
III.5.2 Diagnostic de la source d'une erreur.....	121
III.6 CONCLUSION	123
CHAPITRE IV: SCÉNARIOS D'UTILISATION ET INTERFACES HOMME/MACHINE DE SINERGIE	125
IV.1 INTRODUCTION	125
IV.2 SINERGIE : LES CHOIX TECHNIQUES	125
IV.3 VISION STATISTIQUE ET SPATIALE.....	126
IV.3.1 Intégration par rapport à un outil ou une méthode existante.....	127
IV.3.2 Intégration par création d'un protocole de récupération des données.....	130
IV.3.3 La consultation des données dans SINERGIE.....	135
IV.3.4 SINERGIEMAP : la vision globale cartographique.....	142
IV.4 PARAMÉTRAGE DES ÉVALUATIONS DANS SINERGIE.....	148
IV.5 LES SCÉNARIOS D'ÉVALUATION	149
IV.5.1 De la création d'une opération aux évaluations en urgence et priorité.....	149
IV.5.2 Les outils d'analyse des évaluations	157
IV.5.3 L'aide à la planification et le suivi global.....	160
IV.6 CONCLUSION.....	165
CONCLUSION	167
ANNEXES	175
ANNEXE 1 LEXIQUE	177
ANNEXE 2 QUELQUES ÉLÉMENTS SUR LES CHAUSSÉES.....	179
Adhérence	179
Les causes - conséquences des désordres sur les chaussées.....	179

<i>Groupe Opérationnel Chaussées</i>	181
ANNEXE 3 MISE AU POINT D'UN INDICATEUR DE SURFACE IQRA POUR LES CHAUSSÉES	183
<i>Les index unitaires</i>	183
<i>Classification des index unitaires</i>	183
<i>Indicateur d'Adhérence</i>	184
<i>Indicateur Uni</i>	184
<i>Indicateur Surface</i>	184
<i>Méthodologie de calcul</i>	184
<i>Résultats</i>	185
ANNEXE 4 FORMAT DE FICHIERS POUR LA RÉCUPÉRATION DES DONNÉES DANS LE CADRE DU SUIVI ANNUEL DES CHAUSSÉES	187
<i>Les données de bilans de santé</i>	187
<i>Données « Inconnus calcul » et « absence de mesures »</i>	188
<i>Le revêtement des chaussées</i>	188
<i>Les anomalies, visites annuelles et points singuliers</i>	188
<i>Bornage</i>	189
ANNEXE 5 INDICATEURS POUR L'AIDE À LA DÉCISION ET THÉORIE DES POSSIBILITÉS	191
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	193

Introduction

La société d'autoroutes ESCOTA s'est résolument engagée dans une démarche de développement durable. Elle a pour objectif de prendre en considération les dimensions sociales, économiques et environnementales de son activité. L'entretien du réseau autoroutier ne concerne pas uniquement la chaussée et ses abords. Pour 460 km de tracé, ESCOTA gère plus de 1900 ha de dépendances vertes. Prévention des risques d'incendie, prévention des risques de pollution des eaux, mais aussi protection des riverains contre le bruit ou prise en compte d'espèces naturelles rares pour la gestion des dépendances vertes de l'autoroute. Chaque année, des actions spécifiques sont entreprises ou reconduites pour inscrire le réseau autoroutier dans une logique de développement durable. Dans ce contexte, la maintenance préventive et la gestion de patrimoine sont devenues des enjeux majeurs de la Direction d'Exploitation d'ESCOTA. Le concept de management des risques y est assimilé à la notion de décision en univers incertain.

C'est dans ce cadre, qu'en 2004, sont lancés nos travaux de thèse. L'objectif qui nous est fixé en premier lieu est de formaliser les processus décisionnels afférents à la gestion du patrimoine. En particulier, formaliser la phase d'estimation de l'urgence et de la priorité des opérations de maintenance, d'amélioration et d'entretien dans ce contexte d'évaluation multidimensionnel, retient l'attention de l'exploitant. L'accent est mis également sur la quantité, la qualité et l'inhomogénéité des données utiles à la décision. Dans un second temps, il s'agit d'identifier et de spécifier les fonctionnalités avancées de l'outil informatique destiné à assister l'exploitant dans le processus de planification des opérations depuis l'acquisition de symptômes détectés sur un élément du patrimoine jusqu'à la programmation de l'opération afférente. La troisième phase de notre mission est bien sûr de réaliser et de mettre en place dans les différentes entités opérationnelles concernées par le projet, l'outil informatique baptisé SINERGIE. Le traitement de l'information et l'analyse multicritère apparaissent comme les supports essentiels de ce système d'aide à la décision. Légitimer la politique de l'exploitant en matière de gestion du risque technique ou stratégique dans ses activités de management s'impose rapidement comme une attente fondamentale de notre projet, autrement dit notre outil informatique est associé à une volonté de transparence dans les décisions, de responsabilisation des personnels à chaque niveau d'intervention et de justification des logiques de décision dans un contexte multicritère et multi acteurs.

Dans l'énoncé du projet de thèse qui nous est confié, se dégagent donc les notions de décision, de risque, d'incertitude, de management, le tout recadré selon une acception spécifique aux gestionnaires de patrimoines en Génie Civil. Nous profitons donc de cette introduction pour mettre au clair succinctement ce que nous entendrons dorénavant derrière ces concepts dans la suite de notre manuscrit, les relations qui les lient. Nous partons de considérations générales pour situer le contexte de notre approche et nous focaliser petit à petit sur la problématique de la décision en gestion du patrimoine.

La gouvernance

L'importance croissante de la notion de risque dans la sphère sociétale—au point que l'on parle aujourd'hui de la société du risque, comme l'on parlait très récemment de la société de l'information—exige de porter une attention particulière à la justification des activités à risque et à la gestion du risque dans les activités de management. Cette problématique qui vise à intégrer l'ensemble des aspects sociaux, juridiques, politiques, scientifiques, économiques et éthiques présents dans une situation de management, se trouve résumée par la notion de gouvernance des activités à risque [Montmain *et al.*, 08].

La gestion du risque est prise ici comme un élément-clé de la prise de décision dans un processus collectif où la justification tient une place essentielle. Le risque, pris dans son acception la plus générale, traduit en situation normale un facteur d'incertitude, mais aussi une possibilité de gain (ne pas tenir compte du risque peut être vu comme une économie, prendre un risque peut amener un gain). En situation dommageable, où les pertes sont avérées, le risque devient un facteur de dégradation des capacités de maîtrise de la situation.

On peut ainsi définir le « risque acceptable » comme le niveau d'incertitude qui n'entrave pas la décision et l'action (mais qui peut en réduire la latitude). Le management du risque est confronté à l'aversion sociétale, à la notion de risque acceptable, mais aussi à des problèmes spécifiques amenés par exemple par la prise en compte de la longue durée (risque différé) ou l'application du principe de précaution (risque incertain). La justification d'une décision ne saurait être réduite à la simple comparaison à une courbe de risque acceptable prédéfinie.

On constate encore trop souvent que la prise en compte du risque dans la société et l'industrie est davantage un diagnostic passif qu'une action positive d'évaluation, de gestion stratégique, de management.

Le management du risque en situation normale peut être fondé sur deux approches stratégiques : l'anticipation et la recherche de résilience.

L'anticipation consiste à rechercher la parade a priori à toutes les situations envisageables ; cette stratégie paraît réaliste dans le cas de prise en compte de risque *avéré* ; elle serait fondée sur l'analyse des menaces et des vulnérabilités ;

Face au risque *incertain*, une autre stratégie consisterait à améliorer les capacités de résilience [du système considéré, dispositif complexe, organisation ou territoire] en situation imprévue.

S'intéresser aux vulnérabilités face aux risques avérés (démarche pratiquée par exemple dans le secteur de l'assurance) vise d'une part à rechercher des parades techniques, et d'autre part à améliorer le niveau de maîtrise de l'organisation qui sera confrontée à la menace. Travailler sur la résilience d'un système consiste à développer les capacités de résistance et d'auto-organisation du système, dans des situations qu'il est difficile d'anticiper.

Les deux stratégies ont en commun de s'appuyer sur le retour d'expérience des accidents et catastrophes, mais aussi des accidents mineurs et des quasi-accidents, ces derniers pouvant apporter plus d'informations pertinentes tant en terme de phénoménologie qu'en termes de prévention. L'accident assorti de conséquences extrêmes reste en effet, et cela est heureux, un événement rare difficilement évaluable en terme de probabilités.

La décision face au risque

La problématique de la prise de décision repose sur le choix de l'attitude adoptée face au risque dans les différentes situations. Face à l'incertain, s'il va de soi que toute stratégie repose nécessairement sur un ensemble d'informations sur la situation décisionnelle, l'obtention, la disponibilité, la gestion, l'organisation, le partage, l'échange, le traitement, la fiabilité, la pertinence, la complétude, l'interprétation de cette information sont autant de dimensions qui, dans nombre de situations complexes, remettent largement en cause les modèles d'optimisation de la recherche opérationnelle.

On peut encore s'interroger sur le « bien fondé » d'une décision. Il est en effet nécessaire de distinguer l'évidence et la pertinence de celle-ci. L'évidence relève d'une cohérence interne, d'une compatibilité avec une structure logique ; la pertinence relève d'une cohérence externe, d'une compatibilité avec une situation extérieure. Il y a les solutions logiques (évidence) et les solutions efficaces (pertinence), qui ne coïncident pas toujours. La décision est un processus d'interaction entre le décideur et le monde [Jarrosson, 94].

On distinguera ainsi la situation d'action et l'observation de cette situation à des fins de décision opérationnelle. Le traitement de l'incertain dans l'évaluation des risques et leur gestion relèvent d'une aptitude stratégique que nous appellerons « management du risque » (cf. Figure 1). Dans la situation d'action, le risque est perçu dans son sens le plus commun. Si l'on prend l'exemple d'un système de production, l'analyse des modes de défaillances du système permet d'identifier les différents dysfonctionnements pouvant affecter les performances, la stabilité ou encore l'intégrité du système. Peuvent être identifiés les causes de ces dysfonctionnements et leurs effets. A ces résultats d'analyse peuvent être ajoutées des connaissances pour quantifier la gravité des effets et/ou la probabilité d'occurrence de chacun des dysfonctionnements. Pour ce type d'analyse, nous parlerons ultérieurement dans notre manuscrit d'analyse de risques techniques. Au niveau décisionnel supérieur, l'analyse de risques ne porte plus sur le système technique lui-même, mais sur l'activité de l'équipe d'exploitation qui agit sur le système technique (le pilote) pour en obtenir des performances. L'analyse se veut donc moins technique que stratégique : l'espace d'analyse s'élargit. On ne se confine plus au seul système technologique et aux risques techniques qu'il peut présenter, mais on

cherche à répondre de l'activité liée à l'exploitation d'un tel système. Il s'agit bien de justifier l'intérêt de l'activité industrielle au regard des risques qu'elle peut engendrer à l'égard de critères juridiques, éthiques, etc., auprès de partenaires sociaux, économiques ou politiques. Comme nous l'évoquons ci-dessus, les décisions ne relèvent plus ici de l'évidence où l'on se borne à l'analyse de l'installation, mais de la pertinence où l'on contextualise l'exploitation dans une sphère sociétale toujours plus exigeante et contraignante.

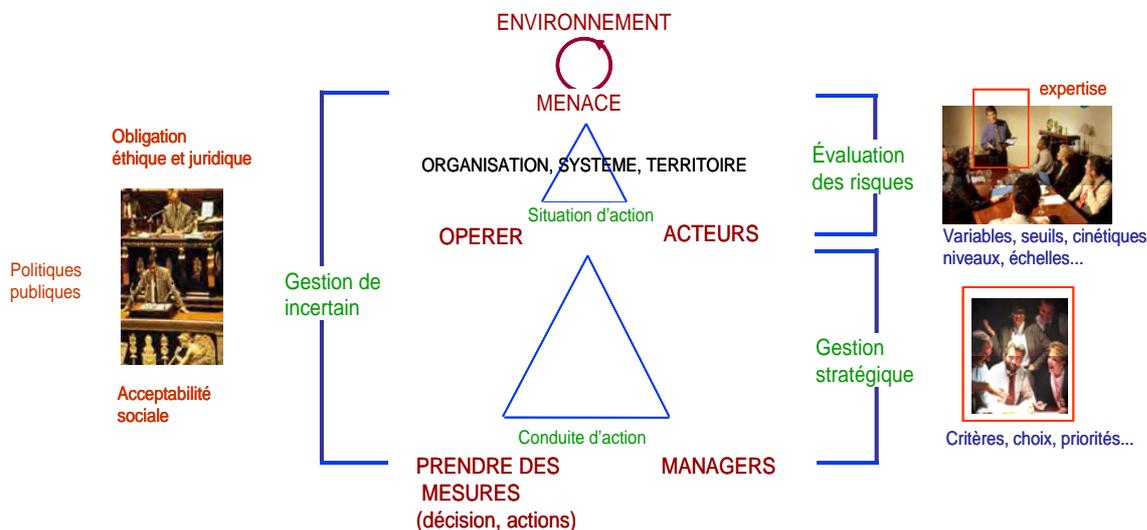


Figure 1 : le management du risque comme traitement de l'incertain

Le management du risque

Le concept même de management du risque peut être défini, d'une part comme le maintien d'une capacité décisionnelle et d'action dans la situation, et d'autre part comme traitant de l'incertain dans l'évaluation et la gestion des risques. Une « bonne pratique » du management consiste à accorder la nature même de la situation (survenance d'événements et de dommages) avec la prise de décision et la conduite de l'action. La prise de décision repose en grande partie sur l'attitude adoptée face au risque et la conduite de l'action relève de la dynamique de la situation [Montmain *et al.*, 08].

De façon générale, l'intervention de l'homme en situation complexe ne comporte-t-elle pas toujours une part de risque, dans la mesure où la portée des actes cesse d'être totalement mesurable [Guoguelin, 88]. Comme le souligne [Mélèse, 72], la maîtrise des systèmes complexes passe en effet par l'acceptation d'un contrôle incomplet. La maîtrise est prise ici comme un état opposable à celui de crise, sans en être son contraire, qui serait la routine [Latour, 94].

La dynamique de la situation est entendue ici comme caractérisée à la fois par la cinétique de dégradation (l'intensité du risque évolue—dynamique continue) et la propension à changer de nature (l'attitude face au risque change—dynamique discrète). Dans une perspective de management du risque, il faut donc porter attention à la nature des situations, aux processus d'intensification du risque, et aux processus de changement de situation.

Le système même qui est managé (une organisation, un territoire) peut être ainsi qualifié selon sa vulnérabilité (propension à la dégradation de la situation courante) et sa sensibilité (propension à susciter un changement d'attitude face au risque). Une première analyse – sous forme de carré sémiotique¹ – permet d'envisager quatre types d'attitude face au risque (cf. Figure 2) : la routine et son contraire, la crise ; la maîtrise et la démaîtrise [Latour, 94] [Penalva, 97]. La maîtrise s'oppose à la crise, et l'on peut considérer que la maîtrise prolonge la routine, alors que la démaîtrise découle de la crise. Chacune de ces attitudes peut être décrite par un couple latitude de décision – latitude d'action. Ainsi, la routine et la maîtrise correspondent à une latitude d'action et de décision importante, tandis que la crise et la démaîtrise se caractérisent par une forte restriction, pouvant aller jusqu'à l'inhibition.

¹ Structure élémentaire de la signification posée par Greimas, fondée sur trois relations formant un groupe (au sens mathématique) : opposition, contradiction, gradation.

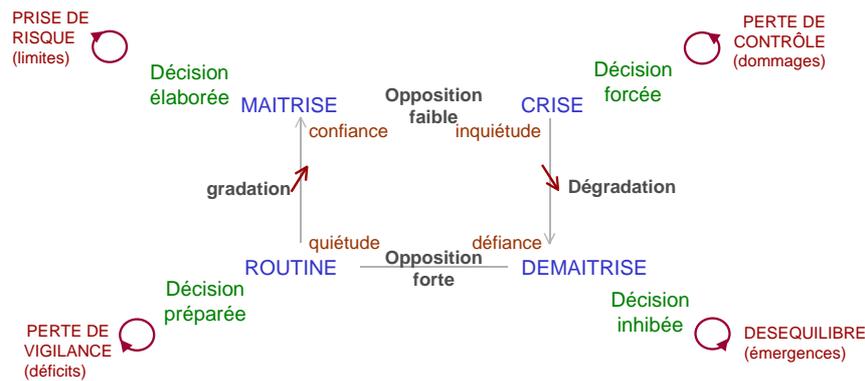


Figure 2 : l'attitude face aux risques

On peut qualifier plus précisément la latitude décisionnelle en distinguant différents types de décisions :

- **décision préparée** : le temps permet d'élaborer des scénarios d'action qu'il suffit de mettre en œuvre lorsque la situation le permet ou l'exige ;
- **décision élaborée** : les scénarios doivent être construits en situation afin de tenir compte des événements non souhaités, et des perspectives d'évolution ;
- **décision forcée** : l'occurrence ou l'imminence de conséquences préjudiciables détermine les réponses à apporter ;
- **décision inhibée** : la méconnaissance de la situation et le niveau d'incertitude empêchent de déterminer une seule décision adéquate.

La latitude décisionnelle et l'aptitude à faire face (confiance ou inquiétude dans les capacités de l'organisation opérante) se combinent dans l'attitude face au risque et donc déterminent la conduite de l'action. La bonne fin de l'action ne dépend alors plus que des ressources disponibles et du niveau d'incertitude. La nature de l'action est contingente des événements :

- En l'absence d'événement dommageable, l'action est anticipatrice ou préventive ;
- dans les autres cas, l'action est corrective, voire « écologique »².

Management des risques et décision pour la gestion de patrimoines en Génie Civil

Intéressons nous maintenant à cette problématique de la gouvernance des risques dans le contexte où nous avons conduit nos travaux, le Génie Civil, en mettant en avant quelques citations caractéristiques de l'état des lieux en 2007.

Thierry Kretz, directeur technique du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, écrit en 2006, en début de présentation d'un article de synthèse : « *L'optimisation de la gestion de l'entretien routier sur les moyens et longs termes suppose une bonne connaissance des lois qui gouvernent l'évolution des dégradations des chaussées. De très nombreux essais de laboratoire ont été réalisés ... et ont permis d'établir des modèles de comportement ...* » [Kretz, 06].

En mars de cette même année 2006, l'Agence Nationale de la Recherche lançait un appel à projet dans le cadre du Programme Génie Civil et Urbain, dont un des volets concernait « *l'intégration de contraintes nouvelles dans l'ingénierie* » avec deux volets particuliers : *la systématisation du recours à l'analyse de la valeur sur le cycle de vie*, et *la réduction des risques*. Sur ce dernier point, si les notions d'aléa et de vulnérabilité étaient rappelées, il était explicitement question de la « *vulnérabilité du réseau d'infrastructure dans son ensemble* ».

La gestion de la maintenance d'un réseau d'infrastructures peut donc être vue de plusieurs manières, par différents acteurs. Il y a ici l'expression d'un double besoin, à la fois de mise en œuvre et de suivi d'une politique de maintenance.

² Les effets sont immédiatement observables mais les conséquences sont peu prévisibles.

Quels outils informatiques peut-on donc imaginer pour accompagner le gestionnaire dans ses décisions ? Le vieillissement du bâti et de l'infrastructure est au cœur des préoccupations des gestionnaires et est dû à plusieurs raisons, l'âge, le climat, la vie de l'ouvrage (trafic,...) et induit la nécessité d'effectuer des entretiens. Ce vieillissement pose des problèmes : certaines interventions peuvent présenter plus de difficultés que d'autres vis-à-vis de la sécurité des personnes, de la disponibilité de l'infrastructure, des exigences de performances de plus en plus sévères, de la gêne aux clients, de la difficulté de maîtriser les coûts, etc... Afin d'éviter les risques majeurs (accident, non disponibilité d'un ouvrage, etc.), il est essentiel de mettre en place des **méthodes globales de gestion des infrastructures** afin d'aider les gestionnaires dans **l'évaluation de l'état de leur patrimoine** et dans la **programmation des opérations d'entretien adéquates dans une logique coût / performance rationalisée**.

Le ministère français de l'Équipement coordonne des projets de recherche concernant le domaine des infrastructures du génie civil, notamment dans le cadre des projets RGC&U : Réseau Génie Civil et Urbain. Le deuxième point de l'appel à Projets de Recherche et d'Innovation 2005, organisé par l'Agence Nationale de la Recherche, « conservation et évaluation du patrimoine existant » indique clairement que l'aide à la décision et le développement du patrimoine sont des domaines importants de R&D. Divers promoteurs de cet axe de recherche envisagent une démarche selon trois logiques distinctes et complémentaires pour les gestionnaires de patrimoine : la logique de mesure, la logique de l'évaluation et la logique de la décision. Les acteurs de l'auscultation, de l'instrumentation (chercheurs ou praticiens) doivent détecter, qualifier et quantifier l'état des matériaux et leurs défauts. L'expert, en appui technique du maître d'ouvrage, qui doit définir les stratégies d'instrumentation et d'auscultation d'une part, et fournir un diagnostic d'autre part, doit s'appuyer sur des données et des procédures efficaces pour établir un diagnostic fiable de l'ouvrage. Le maître d'ouvrage doit s'assurer que l'ouvrage remplit ses fonctions au meilleur coût, dans le cadre d'exploitation prévu. Il a besoin pour cela de se baser sur des éléments fiables lui permettant de prendre des décisions relatives à l'entretien et à la maintenance, voire au renforcement de l'ouvrage. Nous verrons au chapitre I comment cette vision sous ces trois logiques complémentaires permet d'aider les gestionnaires dans la formalisation de stratégies de gestion durable. De nombreux outils métiers ont vu le jour, par exemple pour la gestion des ouvrages d'art, mais ils ne permettent pas de donner aux gestionnaires une vision globale de l'état de leur patrimoine et restent des outils « métiers ». **Il est nécessaire que ces outils soient fédérés via un système d'aide à la décision qui centralise l'ensemble des données**.

La préoccupation centrale dans la gestion du patrimoine reste en effet celle des données. Les gestionnaires sont confrontés à de grandes quantités d'information dont ils doivent extraire les connaissances utiles à une stratégie de gestion efficace. Le cloisonnement des activités, la dispersion des données et la multiplicité des intervenants dans la gestion du patrimoine rendent la situation complexe. Face à un environnement incertain, la maîtrise de la complexité est affaire de bonne organisation collective. Elle devient l'émanation de savoirs multiples dans les domaines techniques, sociaux, culturels, organisationnels. Résultante complexe d'actions et de décisions individuelles et de construits collectifs, elle se développe au travers de multiples structures de communication reliant les hommes [Penalva *et al.*, 02]. A ce titre, **l'impact des Technologies de l'Information et de la Communication devient un facteur essentiel du développement de nos modes d'organisation, voire de nos sociétés**. La complexité des systèmes quelle qu'en soit la nature dans lesquels l'homme est impliqué aujourd'hui conduit à l'émergence de **systèmes dynamiques de traitement de l'information** (STI) de plus en plus complexes et incontournables. Pour aider l'homme à faire face à cette problématique, il faut **instrumenter la relation que l'homme, ou plutôt un collectif organisé, entretient avec son système d'information dans l'action et la décision**. Les fonctionnalités prioritaires à développer doivent donc être relatives **aux processus de gestion des connaissances, d'apprentissage et de décision collectifs dans les grands systèmes sociotechniques** [Penalva *et al.*, 02].

La problématique spécifique d'ESCOTA

S'inscrivant dans la logique du paragraphe précédent, la société d'autoroutes ESCOTA a décidé de se doter d'un outil de traitement de l'information et d'aide à la décision permettant de gérer au mieux son patrimoine à travers une maintenance préventive optimisée, fondée sur une volonté de transparence dans les décisions dans un contexte multicritère et multi acteurs. Comme nous l'avons vu précédemment, pour éviter les risques majeurs, il est essentiel de mettre en place des méthodes globales de gestion des infrastructures pour aider les gestionnaires dans l'évaluation de l'état de leur

patrimoine et dans la programmation des opérations d'entretien adéquates dans une logique coût/performance rationalisée. Il ne s'agit donc pas ici de développer de nouveaux outils métiers ou des codes de calcul pour estimer la dynamique d'évolution de dégradations et autres lois de vieillissement, mais d'un outil pour superviser le processus de gestion du patrimoine dans sa globalité. Si l'analyse des risques techniques ou stratégiques reste une activité cognitive confiée aux experts de l'exploitation, ceux-ci doivent disposer en revanche d'un support logiciel qui leur permette de centraliser et consulter les données, de hiérarchiser les opérations sur le réseau en termes de priorité d'intervention, de justifier leurs choix, d'avoir une vision globale de l'état du patrimoine et des opérations en cours, et qui les assiste dans leurs évaluations et leurs diagnostics. Si l'on reprend le management du risque de la Figure 1, l'outil que nous avons développé s'intéresse davantage à la gestion stratégique qu'à l'évaluation des risques à proprement parler, activité pour laquelle il ne fait que mettre à disposition des experts l'ensemble des données nécessaires à leur analyse et leur diagnostic.

Les décideurs ont besoin d'avoir une vision globale du patrimoine en termes d'objectifs et de contraintes, c'est-à-dire de disposer d'une évaluation continue de l'état du patrimoine dans un contexte d'exploitation dynamique. Pour mener à bien cette entreprise, l'idée générale est de disposer à tout moment des priorités d'intervention en fonction de l'évaluation des risques auxquels sont exposés les éléments du patrimoine. Cette évaluation ne résulte pas du seul diagnostic ou « bilan de santé » d'un élément du patrimoine, mais dépend aussi du contexte multidimensionnel d'exploitation dans lequel se trouve celui-ci.

ESCOTA, en tant que gestionnaire de patrimoine, est confrontée :

- au vieillissement de l'infrastructure : c'est une préoccupation constante pour le maître d'ouvrage qui doit garantir un niveau de qualité et de service en termes de sécurité et de confort pour les clients tout en assurant la pérennité des ouvrages ;
- à la quantité, la qualité, la disponibilité et l'inhomogénéité de l'information : les districts au niveau du territoire et les divers services de la Direction de l'Exploitation d'ESCOTA s'emploient à ce que l'état des connaissances relatives aux éléments de patrimoine soit régulièrement mis à jour avec les contraintes suivantes :
 - la multiplicité des données : la diversité des éléments composant le patrimoine, les opérations (d'entretien, de réparation ou de mise à niveau) effectuées, les anomalies détectées, les conditions de trafic, les caractéristiques environnementales, la proximité de zones urbaines, ...
 - la dispersion des données : dans différents services de l'entreprise, dans les Districts, etc.

Le caractère multi acteurs de la gestion du patrimoine et des décisions afférentes provient de ce que les différents intervenants dans la chaîne de traitement de l'information (acquisition, évaluation, valorisation, décision) n'ont pas tous les mêmes objectifs, les mêmes logiques, etc ; les logiques de mesure, d'évaluation et de décision que nous avons mentionnées au paragraphe précédent se superposent, se confrontent au quotidien. Le caractère multicritère des décisions est lié à une multiplicité d'enjeux en termes de gestion et de performance (sécurité, fiabilité, disponibilité, durée de vie). Le décideur doit prendre en compte plusieurs aspects : les techniques à utiliser, la réglementation en vigueur, l'impact sur la sécurité des usagers et le coût de l'opération, le tout dans un contexte sociétal évolutif.

Pour améliorer son processus décisionnel en ce qui concerne la maintenance préventive et la gestion de son patrimoine infrastructure, ESCOTA souhaite donc que l'exploitant bénéficie d'une assistance informatique. A cet égard, le projet qui nous a été confié consiste à formaliser le processus de décision, puis à spécifier l'outil informatique qui proposera les aides les plus pertinentes identifiées au cours de l'analyse des besoins et de la formalisation. Cette aide à la décision s'inscrit typiquement dans ce que nous avons appelé les décisions préparées, où le temps permet d'élaborer des scénarios d'action, et les décisions élaborées, où les scénarios doivent être construits en situation afin de tenir compte des événements non souhaités. En effet, notre outil n'est pas un outil d'aide à la décision en situation de crise ou de démaîtrise. Le caractère multidimensionnel de l'espace d'analyse pour programmer une opération nous conduit naturellement à nous intéresser aux outils du multicritère, tout comme la masse conséquente d'informations utiles à la décision nous entraîne nécessairement vers des outils de traitement de l'information performant avec des fonctionnalités avancées.

Notre réponse technique à cette problématique est donc la réalisation et la mise en œuvre dans l'entreprise d'un système d'aide à la décision que nous avons baptisé SINERGIE. Bien que destiné à optimiser la maintenance préventive de l'infrastructure, SINERGIE est seulement un outil d'aide à la décision, il est donc essentiel de mettre l'accent sur la capacité de l'outil à proposer des représentations compatibles avec les modes cognitifs de ses utilisateurs afin que ceux-ci bénéficient d'une image pertinente de la situation en adéquation avec les raisonnements qu'ils ont à mener dans leur fonction. Cela signifie qu'au-delà de la conception logicielle de l'outil informatique, notre mission consiste à définir les formalismes mathématiques adéquats qui vont soutenir les tâches d'évaluation, de justification et de planification des interventions sur le réseau. L'introduction de cette mathématique n'est pas sans poser problème dans le contexte d'une ingénierie de terrain. Une grande attention doit être portée à l'implication des acteurs de l'exploitation dans l'élaboration des modèles et leur paramétrage. Le chapitre III, qui propose les mécanismes de raisonnements automatisés dans SINERGIE, met en avant cette cohabitation entre les connaissances expertes et la formalisation mathématique, la connaissance symbolique des intervenants et les calculs numériques de l'outil d'aide à la décision, l'incertitude dans les avis d'experts et la précision des procédures de calcul. SINERGIE est donc certes un projet informatique puisqu'il s'agit de doter ESCOTA d'un outil logiciel pour assister l'exploitant dans sa gestion quotidienne de l'infrastructure, mais c'est aussi un problème de formalisation car il s'agit bien de trouver, en premier lieu, pour chacune des phases du processus décisionnel menant à la programmation d'opérations de maintenance, les modèles mathématiques adéquats qui permettront à l'utilisateur une meilleure compréhension de la situation. Enfin, et ce n'est pas la moindre, SINERGIE présente également une composante humaine, car l'insertion de l'outil informatique dans la gestion du patrimoine entraînera nécessairement des agencements, des changements dans le fonctionnement et l'organisation des acteurs de l'exploitation.

Plan du manuscrit

Le plan du mémoire sera donc le suivant. Dans le chapitre I, nous nous attachons à décrire la problématique de la gestion de patrimoine en Génie Civil. Nous la replaçons dans le contexte du management des risques et pour cela nous rappelons succinctement quelques éléments essentiels du courant Cindyniques. Pour aborder la notion de risque en Génie Civil, nous en étudions les dimensions d'analyse, avant de nous intéresser à la gestion technico-économique d'infrastructures. Nous discutons ensuite des enjeux de la gestion du patrimoine. Nous pouvons alors rentrer dans le vif du sujet et présenter la problématique générale des BTP en matière de gestion de patrimoine dans un contexte d'infrastructures vieillissantes, les savoirs et les outils afférents. Nous formalisons ce processus de gestion comme une prise de décision en organisation dans un environnement incertain. Nous déclinons alors cette problématique à la gestion du patrimoine infrastructure chez l'autoroutier ESCOTA. Au vu de cet éclairage sur la complexité de la prise de décision en matière de gestion du patrimoine, nous énumérons la liste des fonctionnalités attendues d'un système d'aide à la décision dont l'objet est de supporter le processus de programmation des opérations d'intervention depuis l'acquisition de symptômes sur les éléments du patrimoine jusqu'à la planification des travaux et entretiens.

Le chapitre II propose alors notre solution logicielle à cette problématique spécifique. En s'appuyant sur la formalisation du processus de programmation des interventions dans l'organisation d'ESCOTA, nous expliquons pourquoi l'autoroutier a décidé de se doter d'un système informatisé d'aide à la décision, SINERGIE, fondé sur une volonté de transparence dans les décisions, de responsabilisation de ses personnels à chaque niveau d'intervention et de justification de sa logique décisionnelle dans un contexte multicritère et multi acteurs. Une planification pertinente des opérations nécessite une évaluation multidimensionnelle de l'état du patrimoine afin qu'une priorité d'intervention puisse être attribuée à chaque opération. C'est ce processus d'évaluation que notre logiciel SINERGIE instrumente. Après une présentation fonctionnelle de l'outil, nous discutons des choix de conception, en particulier de l'approche objet retenue. Nous donnons ensuite le modèle informatique du système d'information et le modèle conceptuel des données.

Le chapitre III est consacré au support mathématique des fonctionnalités de SINERGIE. L'estimation de l'état du patrimoine étant présentée comme un processus d'évaluation multicritère, le chapitre débute par quelques rappels essentiels sur la notion d'agrégation multicritère. La stratégie de gestion du patrimoine est modélisée par différents opérateurs d'agrégation. La notion d'échelle d'évaluation apparaît alors comme cruciale dans ce processus. Une section est donc consacrée à la nature et à la construction de ces échelles. Nous distinguons deux approches principales d'évaluation multicritère, l'une purement symbolique et l'autre plus quantitative ; nous en comparons systématiquement les

résultats. Nous discutons du lien entre la nature des échelles et la notion d'imprécision dans l'évaluation. Une fois effectuée l'évaluation des opérations afférentes aux éléments affectés du patrimoine, nous nous intéressons à la fonction inverse qui consiste à légitimer l'urgence ou la priorité d'une intervention en cohérence avec la stratégie d'entreprise. Nous proposons également des outils pour tester la robustesse des décisions au regard de possibles erreurs d'évaluation.

Chaque opération se voit ainsi affecter un degré d'urgence ou de priorité d'intervention. Sur la base de ces données et de règles de programmation, peut alors être établie une aide à la planification à proprement parler. Parce que cette dernière tâche ne requiert pas de support mathématique particulier, cette fonctionnalité conclut le chapitre IV qui se veut illustrer les différentes fonctionnalités de SINERGIE à travers la présentation de plusieurs scénarios d'usage. Le domaine des Chaussées a été retenu pour cette démonstration. Le chapitre IV se présente sous la forme d'un guide utilisateur. Le lecteur peut ainsi suivre pas à pas les différentes étapes qui mènent à la programmation d'une opération.

Avis aux lecteurs

Notons que la lecture intégrale du manuscrit peut laisser paraître quelques redondances. Elles ont été volontaires (nous espérons, pour la plupart) et ont pour but de rendre la lecture des chapitres quasi indépendante. En effet, nos travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre d'une bourse CIFRE : il a fallu gérer nos trois années de travail en équilibrant recherche, développement et application. Nous avons donc rédigé ce manuscrit dans cet esprit. Ainsi, le lecteur qui se positionne comme un utilisateur de SINERGIE pourra, s'il le désire, se contenter de la lecture des chapitres I et IV, i.e., l'exposé de la problématique et l'application à ESCOTA. Le lecteur informaticien trouvera une synthèse de la problématique dans le chapitre II qui développe le modèle informatique de SINERGIE, ce qui lui permettra de se satisfaire, s'il est pressé, des chapitres II et IV. Enfin, le lecteur plus attiré par les mécanismes formels qui supportent SINERGIE pourra focaliser son attention sur les chapitres III et IV, i.e., le support mathématique et son application. Néanmoins, le lecteur averti ou curieux, trouvera quelque attrait à la version intégrale et, nous l'espérons, la réponse à l'ensemble de ses questions dans la lecture complète de ce mémoire...

Chapitre I: La gestion de patrimoines en Génie civil

I.1 Introduction

Après les secteurs tertiaires et industriels, le management des risques gagne petit à petit le génie civil et la maintenance de ces ouvrages. Toute action humaine comporte des risques de survenue d'accidents ou de catastrophes. Le mot « risque » ne fait pas l'objet d'une définition officielle. La commission française de normalisation P 06 A a proposé de le définir comme « conséquences possibles d'événements indésirables et probabilités associées », c'est-à-dire les enjeux (conséquences possibles d'événements indésirables plus ou moins importantes), généralement multiples, associés à des probabilités. Cette définition très générale, celle adoptée par l'ingénieur pour caractériser le risque, selon deux dimensions (la probabilité et la gravité) est assez simple. Les ouvrages en génie civil sont en interaction permanente avec le milieu naturel complexe et en constante évolution. Leur rôle est de résister aux agressions extérieures (climat, trafic, gravitation terrestre, séismes, ... etc.). De plus, les utilisateurs de ces ouvrages sont le plus souvent des personnes ou groupes de personnes exposés aux risques induits par l'existence de ces ouvrages.

Ainsi, mieux connaître le risque, pour pouvoir mieux le maîtriser, est un enjeu pour les gestionnaires d'ouvrages en génie civil. Nous allons, dans la première section, aborder les dimensions d'analyse du risque dans le génie civil via les Cindyniques qui proposent une représentation du danger dans un espace à cinq dimensions pour se placer dans un domaine d'études et de réflexions familier pour mieux appréhender les dangers. Nous évoquerons également les méthodes et outils maintenant éprouvés de gestion globale des risques utilisés dans divers domaines du génie civil.

La deuxième section se concentrera sur le domaine de la gestion de patrimoine dans le génie civil dont la préoccupation des gestionnaires est le maintien de la performance des ouvrages dans un contexte d'exploitation dynamique et une logique d'optimisation coût / performance. Les ouvrages sont bien suivis et bien connus. Les entretiens sont programmés selon les valeurs d'indicateurs et les résultats d'inspections, mais les lois d'évolutions sont mal connues. Ainsi, les coûts de maintenance sont difficiles à prévoir et les gestionnaires ont besoin de mettre en place des stratégies de gestion durable du patrimoine. La prise de décision en termes d'opérations d'entretien et de maintenance relève de la décision en organisation : multiplicité des acteurs impliqués dans le processus, grande quantité d'information et difficulté d'envisager toutes les solutions possibles. Nous présenterons une démarche à trois logiques complémentaires permettant d'aider les gestionnaires à formaliser leur processus de décision.

Nous nous projeterons enfin sur la gestion du patrimoine autoroutier de la société d'autoroutes ESCOTA qui a décidé de formaliser son processus de décision pour la gestion de son infrastructure et a décidé de se doter d'un système informatisé d'aide à la décision, SINERGIE, fondé sur une volonté de transparence dans les décisions, de responsabilisation de ses personnels à chaque niveau d'intervention et de justification de sa logique décisionnelle dans un contexte multicritère et multi acteurs.

I.2 Le risque en Génie Civil

I.2.1 Les dimensions d'analyse du risque

En introduction du premier colloque « Risque et Génie Civil » organisé à Paris par le Groupement Français des associations du Génie Civil, les 8 et 9 novembre 2000, G.Y. Kervern [Kervern, 00], actuellement président d'honneur de l'Association française des cadres dirigeants pour le progrès social et économique (ACADI), proposait un cadre de réflexion sur les Sciences du Danger, les Cindyniques, du grec *kindunos*, le danger. C'est dans ce cadre là, dont les dimensions principales sont exposées ci-après, que s'inscrivent nos travaux.

Cinq axes peuvent être utilisés pour la représentation de l'objet « **danger** » dans sa complexité. Les cinq dimensions correspondant à ces axes sont celles des faits, des modèles, des objectifs, des normes et des valeurs.

Chaque **situation** de danger, nécessite de préciser le champ de l'étude des dangers : limites de temps, d'espace, et liste des réseaux d'acteurs inclus dans l'étude, mais aussi, le « regard » porté sur ce champ. Ce regard-là est porté par référence à ces cinq dimensions différentes :

La dimension des faits de mémoire de l'histoire ou des statistiques : c'est ce que l'on stocke dans les bases de données des grands systèmes de retour d'expérience ;

La dimension des représentations et modèles : c'est la base de connaissances qui sert d'appui aux calculs de résistance des matériaux, physique, chimie, mécanismes de propagation (tremblements de terre, inondations, glissements de terrains ...) ;

La dimension des objectifs : il s'agit pour chacun des réseaux impliqué dans la situation, d'explicitier sa stratégie, le but étant de parvenir à des explications concertées, afin d'éviter des dérives vers des échecs ;

La dimension des normes : il s'agit des lois, codes et règlements ainsi que des normes, codes de déontologie obligatoires ou de libre adhésion ;

La dimension des systèmes de valeur : l'évolution et le respect des éléments de l'espace déontologique conduit à cette dimension.

Des conflits, des « fabrications de dangers » résultent de **dissonances** entre deux ou plusieurs réseaux d'acteurs, évoluant dans la même situation. On peut analyser ces dissonances selon les cinq dimensions.

La société d'autoroutes ESCOTA a souhaité réduire la dangerosité de la situation du réseau qu'elle doit gérer, et pour cela, pour reprendre les termes généraux de G.Y. Kervern, lancer une « campagne de prévention », dont nous pouvons rappeler les caractéristiques principales :

« Une campagne de prévention consiste à négocier dans les réseaux d'acteurs des minimum vitaux ... partagés :

- Quelques chiffres (**faits**) acceptés en commun comme réalité statistique ;
- Quelques **modèles** pris comme base commune de connaissance ;
- Quelques **objectifs** partagés ;
- Quelques **normes**, règles ou principes déontologiques ;
- Quelques **valeurs**, par exemple au moins une certaine solidarité, ... une certaine transparence. »

Il y aura nécessairement des freins à l'action d'une campagne de prévention : la défiance. Celle-ci est définie, entre deux réseaux d'acteurs, selon les cinq dimensions, comme une fonction des dissonances qui existent entre les réseaux. La construction de la confiance consiste à réduire ces dissonances : c'est le rôle du médiateur qui revient à l'animateur de la campagne de prévention.

De cette notion de campagne de prévention, on débouche naturellement sur l'analyse des écarts entre ce qui existe et ce qui devrait être le produit d'une transformation de la situation par une campagne de prévention : les **déficits** propres à la situation sont ainsi mis en lumière.

Il peut s'agir de déficits liés à :

- l'absence d'une ou plusieurs dimensions dans un réseau (par exemple pas de données disponibles) ;
- l'indigence du contenu des dimensions (objectifs très flous, voire inexistant) ;
- la dégénérescence d'une dimension ;
- un blocage dans les plans combinant deux dimensions :
- un blocage du retour d'expérience (dimension des faits et des modèles) ;
- un blocage éthique des fonctions d'autorité assurant le respect des règles du jeu social (dimension des normes et des valeurs) ;

- une désarticulation de l'ensemble des cinq dimensions (entreprises à baronnies).

A partir des travaux du prix Nobel H.A. Simon sur la complexité, et des travaux du Professeur Lemoigne à l'Université d'Aix en Provence, sept principes, ou axiomes Cindyniques ont été posés, qui sous-tendent l'émergence des dissonances et des déficits.

Le premier principe de **relativité** pose que la perception du danger est relative à la situation de l'acteur qui la perçoit ;

Le second principe de **conventionalité** indique que les mesures du risque (le risque est le produit de la probabilité d'un danger par sa gravité) sont subordonnées à des conventions entre les acteurs ;

Le troisième principe indique des **finalités contradictoires** des acteurs dans les réseaux de la situation : finalités qu'il faut tenter de préciser et hiérarchiser ;

Le quatrième principe dit d'**ambiguïté** pose qu'un certain flou enveloppe les cinq dimensions. Le travail de prévention consiste à s'attaquer à ces ambiguïtés ;

Le cinquième principe dit de **transformation**, le sixième dit de **crise**, relatifs à des transformations brutales du contenu des cinq dimensions des réseaux d'acteurs, ou à leur désorganisation et reconstitution en urgence, seront de peu d'utilité dans le cadre du présent travail, qui suppose une stabilité des contenus de chaque dimension et des réseaux d'acteurs ;

Le septième principe de **nocivité** pose que toute action sur la situation a des effets réducteurs, mais aussi créateurs de dangers.

Avant de décrire la situation faisant l'objet de notre travail de thèse, comment les diverses dimensions décrites ci-dessus, et comment encore les quatre premiers principes sont pris en compte par les divers réseaux d'acteurs impliqués dans la société ESCOTA (au niveau du service Structure Viabilité Sécurité, pour ce qui concerne la maintenance du patrimoine), il est apparu souhaitable de dresser un panorama des recherches conduites dans des domaines proches du génie civil.

C'est ainsi que nous examinerons, essentiellement sur la dimension **modèles** des recherches conduites sur des bases de données relatives au patrimoine routier ; sur les dimensions **faits** et **modèles** des recherches réalisées sur un ensemble de digues, et de barrages ; sur les dimensions **objectifs** un état des réflexions disponibles auprès de divers acteurs dans la gestion d'ouvrages publics et de patrimoine d'infrastructures. Les dimensions des **normes**, et **valeurs** ont un contenu fixé de façon relativement précise et transparente (par exemple l'auscultation des ouvrages d'art avec la méthode IQOA [Setra, 96] ou la mise en place de l'indicateur IQRA de surface pour les chaussées pour la Direction des Routes en Annexe 3), respectivement par le cadre d'activité extrêmement réglementé du génie civil, au sens des ouvrages et structures, et de l'exploitation des concessions autoroutières, pour la première dimension, d'une part ; par la culture d'entreprise très forte à ESCOTA, depuis plusieurs dizaines d'années, et les contrôles réguliers de la puissance publique, pour la deuxième dimension, d'autre part.

I.2.2 La gestion technico-économique d'infrastructures routières

Dans un article de synthèse sur la gestion technico-économique des infrastructures routières, en France, Philippe Lepert [Lepert, 06] présente comment, à partir de modèles des lois d'évolutions de chaussées, et de façon couplée, à partir de modèles de calcul des surcoûts induits par les chantiers d'entretien, a été conçu un système d'aide à la gestion de l'entretien des routes, qui permette d'étudier les conséquences techniques et financières de différentes politiques, de retenir la plus adaptée, et de l'appliquer à une programmation pluriannuelle.

Il convient de rappeler, dans un premier temps, la **problématique de gestion de l'entretien routier**, ou poser la situation de risque [Kervern, 00].

Les routes sont d'abord une réponse à un besoin économique et social. Ainsi, les avantages produits par une route dépendent de la fonction de la route (axe routier majeur, voie de contournement, route de desserte locale, ...), et de son trafic : ces avantages permettront d'apprécier les « efforts d'entretien » nécessaires au maintien en état de bon fonctionnement de la route ;

Les dégradations des chaussées sont des phénomènes cumulatifs. Pour cette raison, une intervention précoce peut être plus efficace qu'une intervention tardive : il n'est pas judicieux de différer des dépenses jusqu'à ce que les fonctions de la route ne soient plus assurées.

L'importance de chaque tronçon routier, le maintien de façon durable et à moindre coût d'un niveau de service acceptable sont à définir. La complexité même de ce problème justifie le recours à des systèmes d'aide à la décision, s'appuyant eux-mêmes sur des modèles techniques, et socio-économiques.

Examinons, dans un deuxième temps, **comment ces problèmes ont été abordés et résolus**, avant que l'informatique ne permette la mise en oeuvre de ces systèmes d'aide à la décision. Depuis les années 1970, en France, une organisation en trois niveaux prévalait pour le réseau routier national. Avec une Direction des Routes, qui définissait une politique, comportant l'entretien et la réhabilitation, répartissait des moyens dans les différentes DDE (Directions Départementales de l'Équipement) qui étaient forces de proposition d'entretien, et qui finalement confiaient l'entretien courant aux subdivisions. Ces subdivisions assuraient aussi l'organisation et le suivi des entretiens programmés.

De façon opérationnelle, chaque subdivision faisait remonter au niveau départemental une liste des opérations jugées nécessaires sur leur territoire. Ces propositions étaient alors évaluées par un responsable départemental, avec l'appui d'un expert des CETE, Centre d'Études Techniques de l'Équipement, sur la base des mesures (données, faits) rassemblées dans la banque de données routières (BDR). Ces mesures concernaient notamment la déflexion, l'uni et l'adhérence. Chaque CETE devait ensuite hiérarchiser les demandes des diverses DDE, et transmettre l'ensemble des demandes classées à la Direction des Routes. À ce niveau national, les demandes des huit CETE étaient à nouveau évaluées, et les décisions prises, avant renvoi aux DDE des programmes d'entretien acceptés.

À côté d'un aspect positif d'implication de chaque niveau dans la gestion de l'entretien routier, selon Philippe Lepert, la conservation de l'expertise, et l'arbitrage sur les priorités d'intervention entre régions, étaient deux fragilités importantes de ce type d'organisation.

Au début des années 1990, une contractualisation a été passée entre la Direction des Routes et les DDE qui ont reçu une dotation budgétaire, proportionnelle à la surface de chaussée gérée dans diverses catégories de chaussées. Les DDE devaient garantir un certain niveau de service sur les routes nationales. Les CETE deviennent alors souvent les conseillers des DDE pour la programmation des interventions d'entretien, grâce à un logiciel GiRR d'aide à la décision se basant essentiellement sur des critères techniques, les aspects prédictifs, sociaux et économiques n'étant que très partiellement pris en compte.

Il est intéressant de noter que de la dimension des faits, la BDR, on passe à la dimension des modèles, comme GiRR qui intègre plusieurs hypothèses de vieillissement des structures, des traitements statistiques, et des jeux de règles. GiRR comporte en fait deux modules : **Evalue** et **Programme**.

Le module **Evalue**, permet un suivi de l'état des chaussées selon deux critères : l'état de la structure, et l'état de la surface, par section de réseau de 200 mètres de longueur. Ces états sont caractérisés par des notes de 0 à 20, sur chaque critère, lors de relevés actualisés tous les trois ans. L'agrégation d'une note par section, composée selon un jeu de règles à partir des notes de surface et de structure, constitue en soi une difficulté (cet aspect particulier sera développé par la suite).

Le module **Programme** permet de donner un ordre de priorité sur les propositions de travaux, mais n'intègre pas de modèle permettant de simuler l'impact des travaux sur les différentes sections. Différentes stratégies de travaux ne peuvent donc pas être comparées sur plusieurs années, d'un point de vue technico-économique.

Conceptuellement, parvenir sur des périodes de temps assez longues, de l'ordre de 20 ans, à la comparaison de différentes stratégies d'entretien, nécessite donc de disposer de lois d'évolution des dégradations des chaussées (structures et surface), et de lois d'impact des travaux, et, dans une autre dimension, de la capacité de quantifier les retombées technico-socio-économiques des travaux d'entretien. La Figure 3, ci-dessous, représente la structure de ce système dit de seconde génération, qui devrait permettre cette comparaison de stratégies d'entretien sur le long terme.

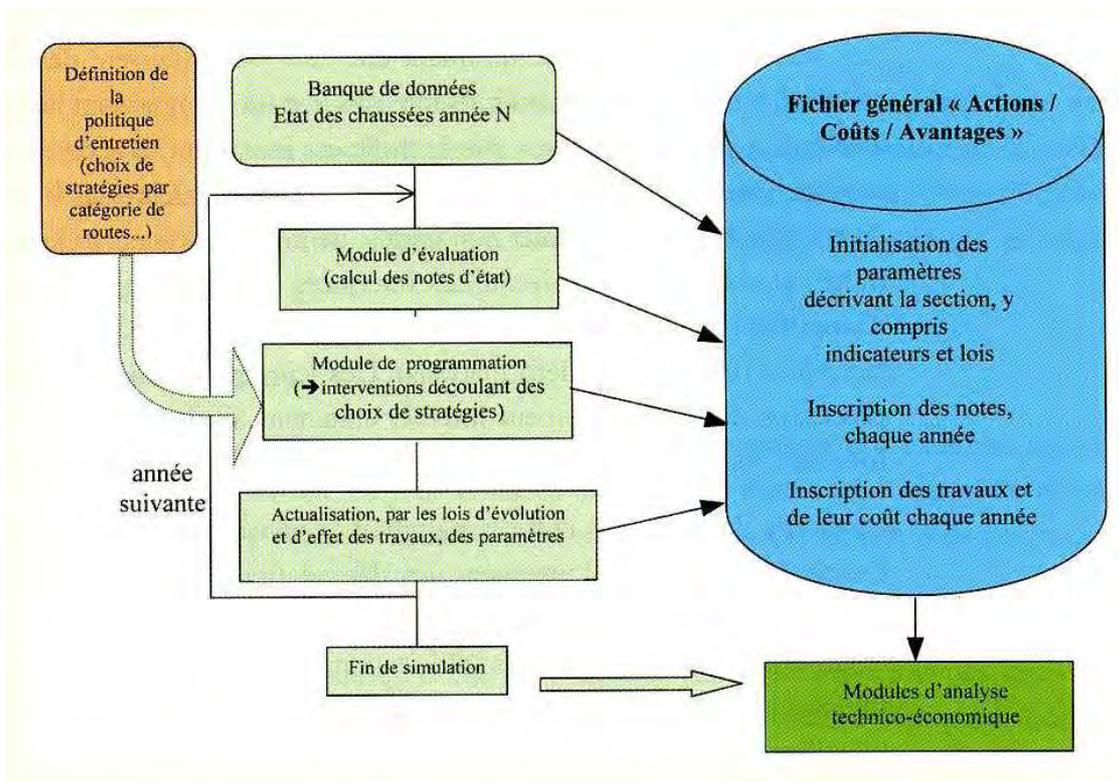


Figure 3 : Principe du système de seconde génération [Lepert, 06]

Les références citées par [Lepert, 06] donnent le détail des résultats obtenus, tant en France qu'en Europe, ou même au Canada, sur les divers modèles intégrés dans ce système de gestion de l'entretien routier de deuxième génération. La synthèse qu'il en fait peut s'articuler sur deux points essentiels : le développement de lois de dégradation des chaussées et le développement des modèles d'analyse économique.

Développement des lois de dégradation des chaussées

De la fiabilité de ces lois dépend le succès, ou l'échec, d'une politique d'entretien sur le long terme. Une sous-estimation des vitesses de dégradation des chaussées conduit, sur la durée, à une mauvaise anticipation des budgets nécessaires et des travaux à réaliser, conduisant elle-même à des augmentations des coûts de travaux et des conséquences socio-économiques plus graves sur des états de chaussées dégradés par reports de travaux nécessaires. À l'inverse, une surestimation des vitesses de dégradation des chaussées conduit à un gaspillage de fonds. Le même raisonnement s'applique aux lois d'impact des travaux.

Globalement, trois séries de variables explicatives conditionnent la dégradation de chaussées : les variables liées à la structure de la route, à la surface de la route, aux sollicitations (climat, trafic). C'est essentiellement l'analyse statistique des valeurs prises par les indicateurs d'état des chaussées, qui dépendent eux-mêmes de ces variables, qui permet le calage de lois d'évolution des dégradations des chaussées.

Développement des lois d'effet des travaux

Les travaux ont essentiellement deux effets :

- un effet à court terme sur la valeur d'un indicateur d'état de la chaussée ;
- un effet différé sur l'évolution de cet indicateur d'état, qui peut faire intervenir plusieurs variables explicatives différentes de celles qui conditionnaient l'évolution avant les travaux.

Il y a là un champ assez vaste de recherche, qui constitue à la fois une difficulté et un potentiel de progrès pour la maintenance d'un réseau routier. La mise en œuvre du système de gestion de l'entretien se fait en trois étapes avec la création d'une base de données, le choix de méthodes d'analyse statistique, enfin le passage à la pratique.

La mise en œuvre du système tel qu'il a été décrit nécessite dans un premier temps la mise en place d'une base de données qui permette de connaître les variables explicatives pour chaque section, avec son historique. Cette base nécessite des données collectées à diverses échelles et il est, dans la pratique, difficile de les obtenir, concernant notamment le trafic, son évolution, ou les caractéristiques de sol ou de matériaux, à une échelle locale.

Les méthodes d'analyse utilisées sont la régression directe, la régression indirecte, la méthode des classes, la méthode des lois de survie. On retiendra essentiellement, pour la suite de notre travail, quatre enseignements de cette phase : la critique des données d'entrée, l'introduction de l'expertise métier, le concept de robustesse (visant à limiter le nombre de variables explicatives prises en compte) et la dépendance à la localisation (on parle dans d'autres domaines, l'estimation de réserves minières par exemple, de variables régionalisées).

Le passage à la pratique se fait en trois temps principaux :

- identification des lois d'évolution à partir des informations recueillies sur le réseau auquel on va les appliquer ;
- fixation des paramètres des lois d'effet des travaux ;
- application des lois d'évolution et d'effet des travaux au pas de temps suivant.

Développement des modèles d'analyse économique

Le cadre des modèles d'analyse économique utilisés peut être ramené à la proposition suivante, illustré par la Figure 4 : on fait l'hypothèse qu'il existe un coût minimal d'exploitation, à un niveau de service maintenu donné, qui est la somme d'un coût d'entretien, et d'un coût d'usage.

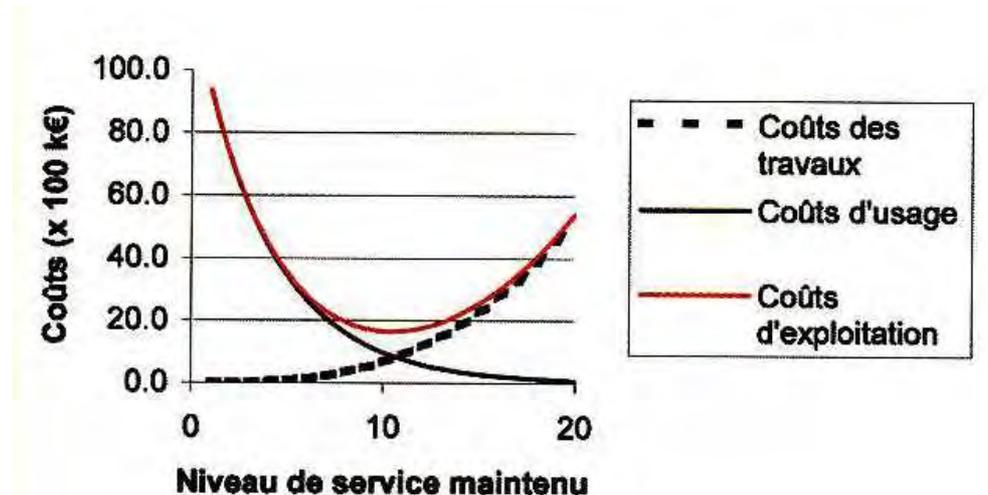


Figure 4 : Principe de l'analyse technico-économique de l'entretien du réseau routier [Lepert, 06]

Dans ces conditions, on va pouvoir comparer diverses politiques d'entretien, en actualisant chaque année les rapports avantages / coûts qu'elles génèrent. Les politiques présentant la plus haute valeur actualisée nette seront retenues.

Les modèles technico-économiques utilisés doivent faire intervenir la valeur du patrimoine et les surcoûts d'usage lors de chantiers d'entretien. Comment estimer ces valeurs ?

Il est classique d'**estimer la valeur du patrimoine** d'une route donnée par celle d'une route neuve de mêmes caractéristiques, diminuée du montant de l'estimation des travaux à réaliser pour une remise à neuf. Toutefois, comme cette estimation peut être faite de façon sommaire, en n'intégrant pas des variables cachées (moins accessibles à l'examen visuel de surface), on a tenté d'intégrer dans ce calcul de valeur une somme des valeurs résiduelles des divers éléments de la structure de chaussée. Ensuite, on a essayé de monétiser cette valeur, en intégrant des indicateurs d'état, accompagnés d'un coefficient lié à leur vitesse d'évolution. On a finalement fait intervenir une robustesse moyenne sur une section ([Lepert, 06], page 15) ;

Pour les **surcoûts d'usage** liés aux chantiers d'entretien, un modèle a été obtenu faisant intervenir cinq paramètres : type de route (autoroute, voie express, voie nationale), le type de région (continentale, côtière), le sens de la voie (entrée ou sortie de ville, indifférent), le trafic moyen journalier sur l'année, le pourcentage de poids lourds dans ce trafic. A partir de ce modèle, des longueurs de bouchons, et des temps de gêne occasionnés aux usagers de la route (heures perdues) sont estimés, puis monétarisés.

À partir de l'ensemble des points précédemment exposés, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) a développé un système d'aide sur la gestion dit de seconde génération, baptisé Programme-Plus, dont la structure est schématisée à la Figure 5 ci-dessous :

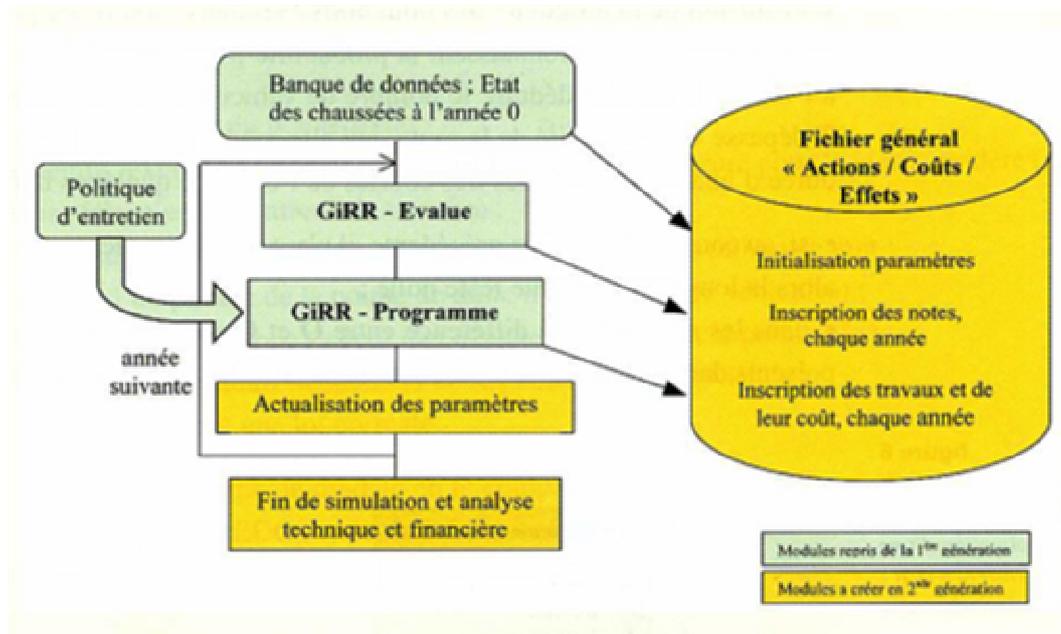


Figure 5 : structure de Programme-Plus [Lepert, 06]

Il est important de noter, à ce niveau, que la fiabilité locale d'une indication de l'évolution d'une section dépendant fortement de la robustesse, il est illusoire de donner une indication locale d'état et donc des prévisions de note et de travaux sur une section, à des temps supérieurs à six ans. Seule une indication générale moyenne sur une partie significative de réseau routier conserve, à ces dates, un sens statistique. En d'autres termes, les incertitudes sur la robustesse augmentant en fonction du temps, on ne présente plus qu'une information agrégée (budget global, note globale), au-delà de cette période de six ans.

En conclusion, P. Lepert note que « ...les stratégies sont définies sous la forme de tables d'expertises assez complexes ... des travaux sont en cours pour rénover profondément le cœur de ce système, et surtout le rendre beaucoup plus apte à une optimisation directe ... ». Ces conclusions de praticien reconnu dans le domaine de l'entretien routier seront prises en compte lors de la structuration de l'outil d'aide à la décision mis en place à ESCOTA.

I.2.3 Analyse de risque et gestion d'autres types d'infrastructure : les digues et barrages

Comment d'autres gestionnaires de réseaux physiques étendus, nécessitant un entretien sur de longues périodes de temps, abordent-ils ces problèmes ? Comment réduisent-ils les risques liés à l'exploitation de leur réseau ? Comment interviennent-ils sur les dimensions Cindyniques des **faits** et des **modèles** ? Nous nous baserons essentiellement sur les travaux de [Serre *et al.*, 06] pour élargir aux digues de protection contre les inondations, notre vision des risques dans le domaine des structures et réseaux du génie civil.

Avant de se positionner sur les dimensions **faits** et **modèles**, il est important de noter que les auteurs insistent sur une évolution de la dimension Cindyniques **objectifs** des acteurs de génie civil qu'ils sont : « En une génération, ..., les questions liées à la conception et à la réalisation des ouvrages se

sont déplacées vers leur gestion et leur exploitation, avec l'objectif sous-jacent de la maîtrise des risques qu'ils induisent » ([Serre *et al.*, 06], page 58).

Le retour aux dimensions plus habituelles chez les ingénieurs des **faits** et des **modèles**, se fait très rapidement par une série de constats :

- « l'ancienneté des digues » conduit à « une perte significative de l'information » relative à ces ouvrages : constitution, travaux de confortement ;
- « le linéaire important (7500 km en France) ... complique la gestion » ;
- « les gestionnaires ont un budget limité » ;
- « il convient d'optimiser ce budget en planifiant les actions d'inspection et de maintenance ».

On retrouve-là des problématiques communes à d'autres opérateurs de réseaux de génie civil étendus, et à longue durée de vie.

Les auteurs doivent garantir une performance—aptitude de l'ouvrage à remplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu—aux gestionnaires du réseau de digues de protection contre les inondations. Ils ont pour objectif de leur fournir des **outils d'aide à la décision pour la planification des programmes d'inspection, de maintenance et de réparation**.

Pour cela, [Serre *et al.*, 06] va :

- construire des indicateurs de performance,
- établir des règles,
- évaluer ces indicateurs,
- et les agréger,

dans le cadre de l'application des méthodes de sûreté de fonctionnement, et de l'aide multicritère à la décision. On va détailler sur ce cas d'étude la démarche, et on pourra distinguer dans une étape ultérieure, dans le cas de l'application au patrimoine infrastructure d'ESCOTA, plusieurs similarités.

Les digues de protection contre les inondations sont des ouvrages, en contact avec la berge, ou éloignés du cours d'eau qui servent essentiellement à limiter l'emprise au sol de la vallée endiguée, lors de crues faibles et moyennes, mais en surélevant la ligne d'eau, lorsqu'il y a rétrécissement de la largeur du lit naturel de la rivière. On aménage parfois, sur ces digues, des déversoirs permettant de protéger la digue contre le mécanisme de surverse, et d'écrêter la crue en inondant une zone à enjeux limités. Utilisant le plus souvent des matériaux locaux pour les plus anciennes d'entre elles, les digues sont aujourd'hui conçues de manière proche des barrages avec une distinction des fonctions d'étanchéité et de drainage.

Comme cela a été relevé précédemment par [Lepert, 06], la connaissance fine sur un tronçon de faible longueur de l'état d'une section routière est possible, et ne pose pas de difficulté. De même, la reconnaissance ou l'auscultation d'une courte section de digue est faisable. Par contre, l'évaluation des performances des digues sur l'ensemble d'un linéaire est bien plus complexe.

[Peyras, 03] propose sur la base des méthodes de la sûreté de fonctionnement, l'analyse des défaillances des digues. Il part de l'analyse des fonctions, à l'échelle des composants d'une digue. De cette recherche des fonctions, il déduit par application de la méthode AMDE (Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets) un certain nombre de modes de défaillance. Ensuite, au moyen de graphes causaux, il obtient une représentation des mécanismes de rupture de digues, sous forme de scénarios de rupture.

Ces représentations des scénarios, comme nous le verrons par la suite (chapitre III) supposent la préexistence de modèles faisant intervenir trois catégories de variables : les variables **fonctions** correspondant aux modes de défaillance, les variables **phénomènes** regroupant les causes et effets des modes de défaillance, et les variables **indicateurs**, correspondant aux manifestations des phénomènes. L'enchaînement des défaillances sous forme de « phénomènes impliquant des dégradations de fonctions, impliquant de nouveaux phénomènes » constitue le modèle de représentation des mécanismes, ici de rupture d'une digue, sous forme de scénario (cf. Figure 6).

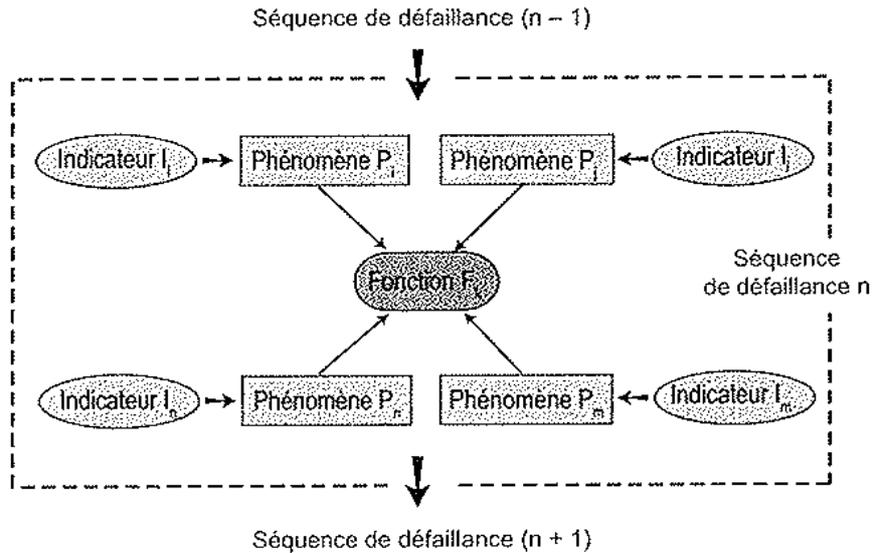


Figure 6 : modèle fonctionnel de représentation des mécanismes [Serre *et al.*, 06]

Pour [Peyras, 03], un tel modèle présente les avantages suivants :

- il structure la connaissance experte ;
- il organise l'information liée aux phénomènes autour de trois catégories de variables ;
- il permet de prendre en compte des dégradations partielles et progressives des variables et des mécanismes non chronologiques.

L'application de la démarche décrite ci-dessus a permis d'obtenir des résultats pour l'évaluation de la performance des digues. En termes d'applications, cette démarche a conduit à proposer une typologie de profils de digues de protection, permettant de mettre sous forme de scénarios fonctionnels l'ensemble des mécanismes de rupture des digues (cf. Figure 7).

L'évaluation de la performance des digues, selon une analyse multicritère, est alors possible. Même si la démarche sera reprise plus en détail dans le contexte d'ESCOTA au chapitre III, on peut en préciser les étapes essentielles :

- détermination des indicateurs d'état et des critères d'évaluation des éléments de patrimoine ;
- proposition de règles pour leur évaluation ;
- agrégation des critères pour obtenir la valeur de la performance des digues, vis-à-vis d'un mécanisme de rupture.

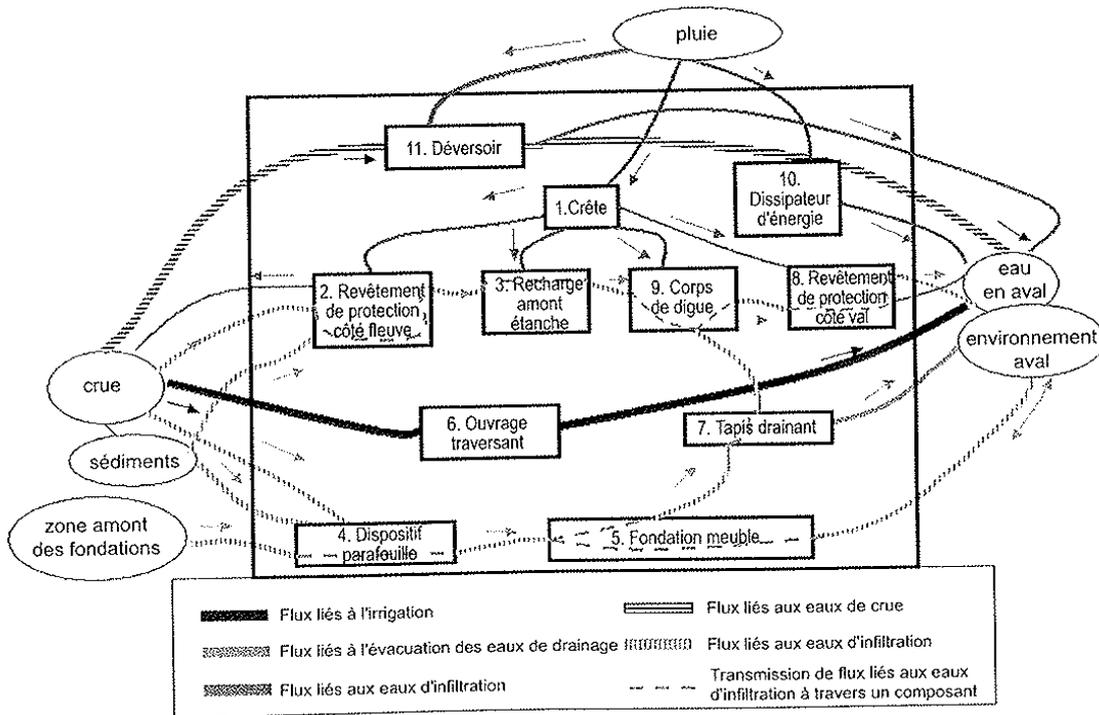


Figure 7 : bloc diagramme fonctionnel « relations de flux hydrauliques » [Serre et al., 06]

Il est intéressant de noter que dans ce cas encore, comme ce fut le cas pour [Lepert, 06], l'agrégation des divers indicateurs, vis-à-vis d'un critère « potentialité d'eau d'infiltration dans le corps de digues » est effectuée à l'aide d'une table de vérité, réalisée par un groupe d'experts (cf. Figure 8). Formuler l'agrégation par le biais d'une base de règles a pour avantage qu'il n'est pas nécessaire de prendre des précautions particulières quant à la nature des échelles d'évaluation, mais nous discuterons plus largement de cette question au chapitre III.

		Eau d'infiltration										
		10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
MAX (trou, racine, OT, comp.)	10	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	9	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	0
	8	8 <td>7</td> <td>6</td> <td>5</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td>	7	6	5	4	3	2	1	0	0	0
	7	7 <td>6</td> <td>5</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td>	6	5	4	3	2	1	0	0	0	0
	6	6 <td>5</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td>	5	4	3	2	1	0	0	0	0	0
	5	5 <td>4</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td>	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0
	4	4 <td>3</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td>	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0
	3	3 <td>2</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td>	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0
	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0
	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0

Figure 8 : table de vérité experte pour évaluer la performance d'une digue vis-à-vis de l'érosion interne [Serre et al., 06]

Dans le domaine de l'analyse des risques liés aux ouvrages de génie civil, les barrages bénéficient d'un traitement particulier. [Peyras et al., 04] font une synthèse des approches utilisées pour ces ouvrages particuliers. Ils distinguent, dans un premier temps :

- les méthodes internes, reposant sur la connaissance profonde du fonctionnement des systèmes étudiés, qui permettent, par modélisation, la prédiction de comportements futurs, et l'analyse de risques. On peut encore distinguer parmi ces méthodes, deux approches :
 - la modélisation physique, qui suppose une représentation des systèmes sous forme de modèles physiques et mathématiques, rendant compte des processus de dégradation du système ;
 - la modélisation fonctionnelle par la sûreté de fonctionnement, qui étudie les systèmes à partir des fonctions qu'ils doivent remplir et pour lesquelles ils sont conçus. Les méthodes AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets), AMDEC (AMDE complétée par une analyse de la Criticité), les méthodes de l'Arbre des Conséquences ou d'Événements, font partie de cette catégorie.
- les méthodes externes, réservées à des contextes où la modélisation des mécanismes (techniques ou fonctionnels) n'est pas possible ou adaptée, du fait de sa complexité ou de son coût. On distingue alors deux approches :
 - les statistiques, qui nécessitent un retour d'expérience riche, et bien documenté, permettant d'établir des corrélations entre défaillances, symptômes, et d'anticiper des comportements, pour des parcs d'ouvrages homogènes, ou des systèmes disposant de mesures abondantes ;
 - l'expertise, en présence d'un nombre réduit d'ouvrages, et en absence de modèle de comportement, l'expert est éventuellement capable de prévoir l'évolution d'un système.

Dans le génie civil traditionnel, l'analyse de risques par modélisation physique, a été conduite selon deux voies : les modèles d'états limites, d'une part, et les modèles d'analyse du comportement des matériaux et des ouvrages d'autre part. On entend par modèles d'états limites des représentations soit des pertes de fonctionnalités d'un ouvrage (état limite de service), soit des modes de ruine ou les pertes d'équilibre statique (état limite ultime). On évalue le niveau de sécurité d'une structure vis-à-vis de chaque phénomène préjudiciable, dans les conditions réelles d'exploitation. Pour les modèles d'analyse du comportement des matériaux et des ouvrages, il s'agit de représentations physiques, mécaniques, hydromécaniques, de modèles couplés permettant d'évaluer des déplacements, des déformations, des contraintes, des flux (de matière, de chaleur ...). Ces modèles permettent alors de prévoir la réponse de structures à différents scénarios. Ils sont généralement utilisés pour une analyse approfondie, sur un ouvrage donné, pour examiner un mécanisme particulier, par rapport à une ensemble bien défini de sollicitations.

L'analyse de risque par la sûreté de fonctionnement, définie comme la science des défaillances, est moins classique en génie civil. Les approches fiabilistes y sont généralement peu présentes, car très souvent les données statistiques sont peu nombreuses, ou les mesures expérimentales difficiles. On verra que pour le cas des chaussées, cette approche est possible, car il existe une certaine homogénéité du réseau sur lequel de nombreuses mesures sont disponibles, et avec des séries chronologiques bien documentées.

Pour l'application aux barrages, [Peyras *et al.*, 04] note plusieurs points communs aux travaux réalisés à l'échelle internationale : équipe d'experts pluridisciplinaires, examen des principaux aléas, modélisation de scénarios de rupture, implication forte du jugement de l'expert dans l'analyse quantitative. Ils concluent à l'intérêt d'une telle démarche, en notant son coût important, et son application réservée à de grands ouvrages particuliers. L'intérêt essentiel de l'application de cette méthode d'analyse de risques réside dans l'amélioration obtenue de la connaissance d'un ouvrage, de ses points faibles, et de la gestion patrimoniale qui en sera faite : mise en place de programme de travaux, et optimisation de la maintenance.

I.2.4 Les enjeux de la gestion du patrimoine

Après cet exposé sur la façon dont les risques - touchant des patrimoines routiers, un réseau de digues, puis un ensemble de barrages - sont analysés, selon leurs dimensions **faits** et **modèles**, il est intéressant d'examiner comment d'autres gestionnaires de réseaux routiers, ou d'ouvrages d'art routier, envisagent les risques selon une dimension **objectif**, assez détachée, a priori, des problèmes de techniques d'ingénieur routier, de génie civil ou de durabilité des matériaux.

Suite aux lois de décentralisation dans les années 1980, le Président du Conseil Général de chaque Département Français s'est retrouvé responsable d'un réseau routier et d'un parc d'ouvrages d'art, comprenant généralement plusieurs milliers de kilomètres de routes, et plusieurs centaines à quelques milliers de ponts. Un certain nombre de collectivités territoriales ont alors décidé de lancer des politiques d'entretien de leurs ouvrages d'art départementaux, en lien avec des sociétés d'ingénierie. A titre d'exemple, nous nous baserons sur les travaux effectués par [Piet et al., 05] pour le compte du département de Loire Atlantique.

La gestion du patrimoine des ouvrages d'art a nécessité au préalable la définition hiérarchisée des enjeux, ou en termes Cindyniques la définition de la **situation**, avec en particulier la description du regard porté sur la situation par les commanditaires de l'étude.

Ainsi cinq niveaux de service ont été définis :

- Fonctionnalité de l'ouvrage :
 - offrir des gabarits routiers (ou fluviaux) satisfaisants ;
 - assurer la capacité portante des ouvrages ;
- Sécurité des personnes :
 - garantir les caractéristiques et l'état des zones de roulement et de cheminement ;
 - garantir les dispositifs de retenue pour les véhicules et piétons ;
- Pérennité des structures : assurer l'état des structures porteuses des ouvrages et de leurs équipements de protection ;
- Valorisation de l'image :
 - valoriser l'aspect des ouvrages ;
 - soigner l'aspect des abords immédiats ;
- Qualité de l'environnement : respecter l'environnement.

Il est apparu très clairement dans l'analyse des coûts / bénéfices d'une politique d'entretien les impacts suivants : économiques, sociaux, culturels, touristiques, environnementaux. Ces dimensions du problème étant posées, la définition d'une politique de maintenance a été conduite en prenant en compte deux champs, qui devaient impérativement collaborer : le champ politique et le champ technique.

La Figure 9 suivante présente les principes généraux arrêtés pour la mise en œuvre de la méthodologie de gestion.

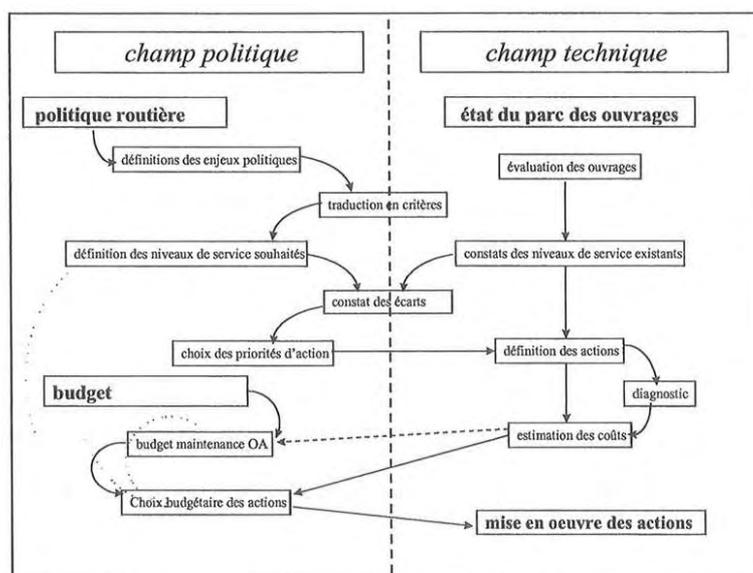


Figure 9 : les deux champs d'une politique de maintenance [Piet et al., 05]

Chaque ouvrage est ainsi caractérisé suivant des enjeux socio-économiques, puis un constat d'écart est établi entre le niveau de service rendu dans son état actuel, et le niveau de service souhaité, transcrit sous la forme d'un inventaire des interventions sur l'ouvrage qui seraient utiles pour atteindre les niveaux de service souhaités.

Il est important de noter que cet inventaire ne revêt pas la forme d'une note, qui parle peu aux décideurs a priori non techniciens, mais se présente sous la forme de quatre fiches, aisément compréhensibles :

- fiche inventaire, avec photographies ;
- fiche contexte socio-économique ;
- fiche actions de mise à niveau ;
- fiche « historique des actions de maintenances » reprenant les actions sélectionnées.

La « campagne de prévention », au sens où l'entend G.Y. Kervern, comme nous l'avons explicité précédemment, a consisté à définir clairement les objectifs de chacun des intervenants et partenaires de la situation. Ceci a permis de démontrer la nécessité de disposer de faits, de les intégrer dans des modèles, en tenant compte des normes et règlements applicables à tous, en intégrant une vision éthique partagée sur le service public. Les cinq dimensions étant examinées, les budgets nécessaires au déploiement de la politique décidée ont été largement augmentés, de 1,5 million d'euros en 2002 à 3,6 millions d'euros en 2003.

Dans le contexte différent de l'exploitation de deux grands ponts sur le Tage, par une société privée LUSOPONTE, Bernard Pincet [Pincet, 05], de la Société ARCADIS, a fait part à l'IREX, en 2005, de l'organisation mise en place pour la maintenance à long terme et le suivi structurel des deux ouvrages. Là encore, l'analyse de risques préalable a permis de mettre en place sur des objectifs partagés, une campagne de collecte de faits (instrumentation) pour examiner dans le cadre de modèles prédéterminés et acceptés par tous, les résultats de mesures (instrumentation permanente, et ponctuelle) et de calculs. La confrontation des analyses sur les résultats obtenus à des normes admises à l'avance, sous le contrôle de l'État, permet à celui-ci et à l'entreprise LUSOPONTE, de satisfaire les besoins économiques et sociaux de transport de la capitale portugaise Lisbonne.

I.3 La problématique générale des BTP

I.3.1 La situation actuelle – un contexte d'infrastructures vieillissantes

Auparavant, les entreprises des bâtiments et travaux publics (BTP) étaient dans une phase de « construction » où il a fallu construire toutes les infrastructures nécessaires au développement économique : réseaux routiers, réseaux ferrés, réseaux électriques, barrages, etc. Nous sommes maintenant dans une nouvelle ère où il s'agit d'entretenir le patrimoine qui **vieillit**. Cette gestion des ouvrages repose sur un savoir-faire technique qui s'est accumulé au fil des décennies. Pour le patrimoine national et les grands maîtres d'ouvrage, elle fait appel à des procédures qui rationalisent le recours à la visite ou l'inspection plus ou moins détaillée et à l'entretien ou la réparation.

Nous venons d'évoquer dans la section précédente que les décisions à prendre, en termes d'opérations (d'entretien, de maintenance, de mise à niveau) à réaliser, portent sur le long terme (évaluer des risques sur la durée d'un contrat ou d'une concession) aussi bien que sur le court terme (définir et mettre en œuvre des actions prioritaires). Ces décisions portent sur des composants individuels (par exemple la réparation d'un viaduc) aussi bien que sur l'ensemble du parc (par exemple la végétalisation des terre-pleins centraux sur une autoroute). Elles peuvent également concerner différents patrimoines, les performances étant jugées à une autre échelle que celles des métiers usuels : une voie de communication peut être déficiente à cause d'un ouvrage d'art, d'une dégradation de chaussée ou de la signalisation, d'un éboulement de talus, etc. Ces décisions font l'objet de programmes pluriannuels pour lesquels sont proposées une planification et une enveloppe budgétaire qui doivent être argumentées et justifiées.

La gestion de patrimoine est par ailleurs confrontée à deux obstacles récurrents : le besoin de compétences "métiers" et la nécessité d'une information de qualité, dépendant implicitement des moyens informatiques disponibles, support de l'activité.

De nombreuses évolutions réglementaires et législatives nécessitent d'améliorer significativement les pratiques actuelles, issues de l'expérience accumulée, mais mal adaptées à une complexité croissante. **Ces enjeux ne sont pas spécifiques à la France** : la Plate-forme Technologique Européenne Construction (ECTP), mise en place en 2005, a identifié la problématique de la gestion des infrastructures comme cruciale pour l'efficacité économique des pays membres. Elle a ainsi mis en place un « focus area » Networks, qui a identifié parmi six tâches de haute priorité deux tâches directement relatives à l'amélioration de gestion des infrastructures :

« 2.3.1.1. : des standards européens et de nouveaux modèles théoriques et numériques pour évaluer, suivre et prédire les performances à long terme des ouvrages et composants (ponts, tunnels, chaussées, réseaux d'eau et d'assainissement...) soumis au vieillissement et à la détérioration ;

2.3.1.2. : de nouveaux concepts pour prolonger la durée de vie des ouvrages, améliorer leurs performances ou leur réponse aux risques, sans réduire la sécurité et avec un impact positif sur la maintenance. »

Le caractère crucial pour l'efficacité économique des pays occidentaux du maintien d'un niveau de performances élevé d'infrastructures vieillissantes, dont il convient si possible de prolonger la durée d'utilisation répond aussi au souci de **développement durable**, par l'économie de ressources qui en découle.

Le besoin de développer des concepts innovants et les outils qui permettront de les mettre en œuvre répond à plusieurs soucis :

- dans un **contexte de concurrence économique** forte et de limitation des dépenses publiques, les propriétaires d'infrastructures doivent maîtriser leurs budgets, optimiser leurs pratiques, tout en limitant les risques (pour les usagers, pour l'environnement...). Cette optimisation doit être conduite de manière globale, sur l'ensemble du patrimoine technique et de son environnement ;
- les **progrès techniques** dans le domaine de la métrologie, de l'acquisition de données et du traitement de l'information **doivent déboucher sur de réelles améliorations des pratiques** opérationnelles dans le domaine de la gestion des infrastructures, ce qui n'a pas été le cas pour des raisons diverses : disponibilité des données, validation des modèles, difficulté de prise en compte de préoccupations non techniques, cloisonnement des activités techniques et administratives, poids des procédures réglementaires ;
- l'évolution du caractère contractuel de la gestion des ouvrages, avec d'une part le développement des **partenariats publics – privés** (PPP), et d'autre part **le transfert de patrimoines et de compétences** entre l'État et les collectivités territoriales dans le cadre de la Loi de Décentralisation. Dans ce contexte, les (futurs) gestionnaires doivent disposer d'outils d'audit et de pilotage du patrimoine dont ils ont la charge. Cela nécessite le développement de **méthodes opérationnelles d'évaluation des coûts directs et indirects et des risques associés**.

I.3.2 La situation actuelle – les savoirs, les outils

La gestion des ouvrages repose sur un savoir-faire technique accumulé au fil des décennies. Les gestionnaires intègrent « naturellement » les particularités locales de leur patrimoine et des procédures définies au niveau national (p.ex. procédure d'inspection des ouvrages d'art – ITSEOA ou des chaussées nationales – IQRN). Ils utilisent des outils (logiciels d'aide), permettant principalement l'archivage des données et la mise à disposition de tableaux de bord. La gestion de patrimoine permet d'assurer le maintien en l'état du patrimoine technique, mais les coûts d'entretien d'infrastructures vieillissantes mobilisent une fraction significative du budget des maîtres d'ouvrages, sans que le retour sur investissement soit manifeste ni facilement quantifiable. Le suivi de l'évolution d'une famille d'indicateurs et l'absence de phénomènes « catastrophiques » sont les retours « positifs » les plus courants.

Ces outils souffrent souvent :

- de l'absence d'une modélisation fine qui permette de s'inscrire dans une démarche prospective ou prédictive ;

- de la disparité entre la logique qui devrait prévaloir (par exemple considérer la gestion d'un itinéraire dans son ensemble) et celle à l'œuvre, qui considère les différentes composantes du patrimoine concerné (chaussées, équipements, ouvrages en terre...) de manière indépendante ;
- de la discontinuité entre les logiques de planification budgétaire (retour sur investissements, durée de concession) et de maintenance opérationnelle (programmation annuelle), qui conduit à optimiser séparément deux budgets sans souci de la cohérence et de l'optimisation globale ;
- d'une imparfaite prise en compte des préoccupations relatives à l'environnement des ouvrages et aux usagers.

L'analyse des pratiques de gestion des ouvrages soulève de nombreuses questions :

- comment **transférer le savoir-faire** acquis sur certains patrimoines vers d'autres patrimoines ?
- comment **adapter les méthodes** à des gestionnaires qui possèdent moins d'expérience et moins de données et qui peuvent avoir des préoccupations spécifiques ?
- comment **justifier le bien-fondé des décisions** prises dans un contexte technique – environnemental – sociétal, de plus en plus complexe ?
- comment **justifier le choix des procédures** (en termes de fréquence d'entretien, de valeur cible d'indicateur...), fussent-elles issues de la réglementation ? Peut-on s'assurer de leur caractère optimal, que ce soit en termes économiques, ou en tenant compte d'une appréciation plus large (prise en compte de critères sociaux ou environnementaux par exemple...) ?
- comment **prendre en compte la complexité des décisions** dans une logique multi acteurs ? (par exemple pour rationaliser les questions relatives à la coordination des travaux, de manière à mieux synchroniser les interventions d'entretien sur un même domaine ou des domaines voisins) ;
- quelles sont les **données qu'il convient d'acquérir** et de gérer pour prendre les décisions les plus opportunes ? comment acquérir ces données et qu'apporte leur connaissance ?

La gestion des patrimoines techniques fait l'objet, depuis une dizaine d'années, de nombreux projets de recherche nationaux et européens³, qui permettent d'avancer des réponses partielles à ces questions. Chaque projet reste cependant généralement consacré à un type particulier de patrimoine.

I.3.3 La gestion de patrimoine est une décision en organisation

De nombreuses actions de recherche relatives à l'amélioration de la gestion des patrimoines techniques ont permis ces dernières années d'élaborer des indicateurs de performance sur la base de mesures et modèles toujours plus sophistiqués. La décision repose certes sur le recueil, l'organisation et la formalisation de ces connaissances. Néanmoins, fort peu d'études ou de recherches mettent en lumière la manière dont a été prise une décision, comment la nature des structures influence l'éventail des choix en matière de décision ou comment s'est constitué le processus de décision, à partir de quels déterminants, en négligeant quels autres, et comment ont été examinés les effets et conséquences potentiels de cette décision.

Quel rôle joue l'analyse des informations dans la prise de décision ? Quel lien entre information et décision ? Comment et sur quels critères s'élaborent les prises de décisions ? Dans quels processus de décision multi acteurs la gestion du patrimoine est-elle abordée ? Il manque souvent la mémoire

³ Sans être exhaustif, on citera par exemple :

- au niveau européen le Projet BRIME sur les ouvrages d'art, les projets CARE-W et CARE-S sur les réseaux d'eau potable et d'assainissement, le Projet Medachs sur les ouvrages en milieu maritime,

- au niveau national le Projet National RERAU sur les réseaux d'assainissement, le Projet National ERINOH sur les digues, le Projet CledeSol sur les galeries multitechniques. Ce dernier projet a permis d'aborder de manière plus approfondie la question des compromis entre acteurs et celle des indicateurs socio-économiques.

des événements précédents à partir desquels il serait possible d'élaborer de nouvelles logiques décisionnelles...

L'ensemble des acteurs intervenant dans la gestion de patrimoine ne parle pas le même langage : ils n'ont pas les mêmes préoccupations et ne poursuivent pas les mêmes objectifs. Néanmoins, tous les domaines de travaux publics concernés réfléchissent à l'élaboration d'un programme national de gestion de patrimoine dans lequel trois logiques distinctes et complémentaires sont envisagées :

La logique de Mesure : où les acteurs de l'auscultation, de l'instrumentation (chercheurs ou praticiens) souhaitent disposer de techniques efficaces pour **détecter, qualifier et quantifier** l'état des matériaux et leurs défauts (cf. Figure 10). Il faut donc développer des techniques et procédures permettant d'obtenir des données relatives à l'état des ouvrages (sur des questions identifiées comme essentielles) ou à leurs performances (IQA, CETE, etc.).



Figure 10 : auscultation d'un talus

La logique d'Evaluation : l'expert, en appui technique du maître d'ouvrage, qui doit définir les stratégies d'instrumentation et d'auscultation d'une part et fournir un diagnostic d'autre part, souhaite disposer de données et de procédures efficaces pour **établir un diagnostic fiable de l'ouvrage**.

Les questions qui se posent aux experts sont les suivantes :

- comment passer de données « matériaux » locales et disparates à une évaluation globale des performances de l'ouvrage ?
- comment estimer l'évolution de ces performances au cours de la période de service de l'ouvrage ?

Le développement de techniques et procédures pour résoudre les problèmes d'échelle est un besoin réel.

La logique de Décision : Le maître d'ouvrage doit s'assurer que l'ouvrage remplit ses fonctions au meilleur coût, dans le cadre d'exploitation prévu. Il souhaite disposer **d'éléments fiables lui permettant de prendre des décisions** relatives à l'entretien et à la maintenance, voire au renforcement de l'ouvrage. Il a donc besoin de modèles génériques de gestion / maintenance intégrée pour :

- planifier et justifier les opérations de maintenance, dans une logique d'optimisation coûts/performances ;
- justifier les procédures d'instrumentation, surveillance, auscultation en quantifiant leurs apports opérationnels en termes de réduction des incertitudes dans les processus de décision ou de réduction des coûts globaux.

Ainsi décrit, le problème de gestion de patrimoine est fondamentalement multi acteurs et multicritères. Auparavant, les problèmes de décision se ramenaient le plus souvent à l'optimisation d'une fonction économique, constituant l'unique critère de sélection. Cette approche avait le mérite de déboucher sur des problèmes mathématiques bien posés qui n'étaient pas toujours représentatifs de la réalité car :

- la comparaison de plusieurs solutions (actions) possibles se fait rarement suivant un seul critère ;
- les préférences sur un critère sont, dans bien des cas, difficilement modélisables par une fonction. De plus, lorsqu'il y a plusieurs objectifs, il est impossible de les atteindre tous à la fois.

La Recherche Opérationnelle (ROP) a montré ses limites dans les problèmes de décision. La planification des opérations est un problème complexe où la définition d'une fonction objectif, des contraintes et la résolution du programme linéaire associé permettant d'aboutir à la solution optimum ne suffisent pas. Il s'avère impossible d'isoler un problème de décision dans la gestion du patrimoine de son contexte. Le processus est distribué et les tâches sont manuelles et subjectives (comme l'évaluation des défauts et la synthèse sous forme de diagnostic). Trouver une solution optimale n'a pas nécessairement de sens dans une organisation du fait de la multiplicité des acteurs. En effet, plusieurs interprétations peuvent être associées à une même décision en fonction des points de vue et des intérêts des acteurs concernés.

Le processus décisionnel impliqué dans la gestion du patrimoine présente toutes les caractéristiques de la décision en organisation telles que décrites par l'économiste H.A. Simon [Pomerol, 02].

Les fondements de sa théorie reposent sur les remarques suivantes :

- Le décideur ne possède pas en fait une connaissance totale de la situation, d'où le terme de « rationalité limitée » introduit par H.A. Simon. Les limitations de cette connaissance des faits et hypothèses proviennent principalement des contraintes de l'organisation qui sélectionne ou favorise tel ou tel scénario en fonction de ses intérêts [Simon, 91].
- La capacité limitée de l'homme à traiter l'ensemble des flux d'informations imprécises, incertaines, incomplètes voire contradictoires, nécessaires à la décision semble montrer que la solution pour une aide à la décision efficace relève de la performance des systèmes de traitement de l'information [Simon, 83].
- Toujours selon le modèle de rationalité limitée de Simon, le décideur est naturellement tenté de s'orienter vers une approche monocritère, occultant la prise en compte de la complexité de la réalité. L'approche multicritère de l'aide à la décision permet de pallier cette restriction en augmentant le niveau de réalisme et de lisibilité donné au décideur [Roy *et al.*, 93].
- Les différentes phases de la décision ne se présentent pas de façon linéaire, mais en boucles. De nombreuses itérations sont nécessaires, au vu de la faible capacité de traitement de l'information des hommes et de la complexité des problèmes de décision, avant qu'un terme ne puisse être apporté au processus de décision (itérer sur les phases de mesure ou d'évaluation lorsque le décideur requiert un complément d'information ou une validation d'expertise suite à l'identification d'un point sensible, imprécis ou incomplet). Les phases de renseignement (Intelligence), de conception (Design), de sélection (Choice) et de révision (Review) se succèdent sans logique chronologique préétablie possible (Figure 11). C'est le modèle IDCR de [Simon, 83] [Simon, 91]. Une interprétation cybernétique du modèle IDCR a été donnée dans [Akharraz *et al.*, 04].

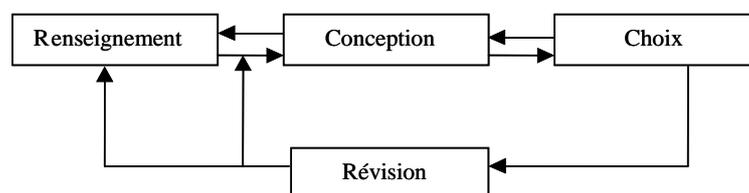


Figure 11 : Le modèle IDCR de Simon

La gestion du patrimoine relève de cette catégorie de processus décisionnels. L'acquisition et le traitement de l'information apparaissent comme plus importants pour prendre une « bonne » décision que la recherche fine, illusoire et trop simplificatrice d'une décision en apparence la meilleure. Le traitement de l'information, son acquisition et son partage sont donc au cœur du problème de la gestion de patrimoine.

Une autre caractéristique de la décision concernant la gestion des patrimoines semble être le nombre de sources d'incertitudes qui peuvent potentiellement perturber le processus de décision. Cette incertitude peut de plus relever de natures différentes. On distinguera principalement :

- l'incertitude des mesures ou l'imprécision des calculs (hypothèses simplificatrices des modèles) qui permettent d'estimer les indicateurs de performance et leurs effets sur une décision⁴ fixée au préalable ;
- l'incertitude et/ou l'imprécision relative au choix d'une valeur de synthèse (granularité de l'évaluation) ;
- la variabilité de la performance en fonction de l'acteur qui l'estime (problématiques de la notion de valeur de référence, de la logique de décision propre à la fonction, le point de vue de cet acteur) ; dans ce dernier cas, la question de l'incertitude est directement reliée au caractère multi acteurs du processus de gestion du patrimoine.

L'aide à la décision doit comporter également un volet relatif à la légitimation de la politique de gestion : lorsque l'outil d'aide à la décision ne fait que conforter le gestionnaire dans ses choix, l'élucidation ou l'argumentation n'est pas systématiquement nécessaire, par contre en cas de résultats contre intuitifs, l'utilisateur attend que le système informatique justifie ses résultats. Cette légitimation s'appuiera sur une analyse de sensibilité de la stratégie décisionnelle multicritère que nous évoquerons dans le chapitre III.

La décision dans une organisation nécessite une adéquation entre les informations pertinentes disponibles au bon moment et les représentations adoptées. Dans le cadre de la décision organisationnelle, le vocable «Système de Traitement de l'Information» permet de désigner commodément la lignée des modèles issus de la pensée de H.A.Simon dont l'objectif est de représenter et améliorer la façon dont les hommes utilisent leurs capacités de raisonnement et de traitement des informations. C'est l'objectif du couplage d'un SGDC (Système de Gestion Dynamique des Connaissances) ou SI (Système d'Informations) avec un SIAD (Système Interactif d'Aide à la Décision) que nous proposons pour instrumenter notre proposition et que nous présenterons au chapitre II. Cette solution propose une mémoire commune partagée sur la base de laquelle peuvent se baser des processus de décision où tout choix proposé par le système est justifiable par des éléments du corpus de connaissances géré par le SI ou le SGDC.

Sur ces différents aspects, la société ESCOTA a investi depuis de nombreuses années et s'est dotée d'une structure et de compétences permettant de répondre de façon satisfaisante sur les trois aspects **Mesure, Evaluation et Décision**.

I.4 Problématique spécifique de la société d'autoroutes ESCOTA en matière de gestion de patrimoine

I.4.1 Présentation de la société ESCOTA

Le 17 janvier 1956, la première société d'économie mixte concessionnaire d'autoroute en France a été créée : la société d'autoroutes Esterel Côte d'Azur Provence Alpes (ESCOTA) située à Mandelieu près de Cannes, filiale d'ASF, dont le réseau est présenté en Figure 12.

⁴ La stratégie décisionnelle est ici entendue comme le modèle mathématique soutenant le processus d'évaluation multicritère sur lequel s'opère une logique de décision.



Figure 12 : le réseau ESCOTA

ESCOTA a rejoint le groupe VINCI en 2006 dont elle a renforcé le profil de concessionnaire constructeur intégré, à même de concevoir, financer, construire et exploiter dans le cadre de contrats de longue durée les infrastructures de transport et les équipements répondant aux besoins des collectivités publiques. VINCI Concessions est le premier opérateur européen de concessions d'infrastructures de transport – autoroutes, ouvrages routiers, parkings, aéroports. VINCI Concessions constitue aujourd'hui, aux côtés de VINCI Construction, Eurovia (pôle routes de VINCI) et VINCI Énergies, l'un des quatre grands pôles de VINCI, leader mondial des concessions, de la construction et des services associés. S'appuyant sur un réseau de 4 000 implantations dans plus de 75 pays, VINCI emploie 142 500 salariés et réalise un chiffre d'affaires annuel de plus de 26 milliards d'euros, dont 4,3 milliards pour VINCI Concessions. Coté à la Bourse de Paris, VINCI a intégré en 2002 l'indice CAC 40, qui réunit les 40 principales sociétés cotées en France.

En France, VINCI Concessions dispose d'une très forte assise avec 4 300 km d'autoroutes en concession sur les réseaux d'ASF, d'ESCOTA, de Cofiroute et d'Arcour (société concessionnaire de l'A19 entre Artenay et Courtenay) ; 480 000 places de parking gérées par VINCI Park, dont 290 000 en concession ou en pleine propriété, et des participations dans plusieurs sociétés concessionnaires ou exploitantes d'infrastructures : la société du tunnel du Prado-Carénage (Marseille) ; Openly, l'exploitant du boulevard périphérique nord de Lyon ; Seag et Seaca, les opérateurs des aéroports de Grenoble et de Chambéry ; le consortium du Stade de France.

I.4.2 Le processus décisionnel de maintenance et de gestion du patrimoine infrastructure chez ESCOTA

I.4.2.1 La gestion du patrimoine infrastructure autoroutier

Gérer le patrimoine signifie assurer la pérennité du patrimoine et préserver son niveau de qualité pour offrir aux usagers le niveau de service requis en termes de sécurité et de confort. Concernant la mesure et l'évaluation de l'état de son infrastructure, les Districts, au niveau du territoire, et le service Structure Viabilité Sécurité (SVS) situé à la Direction de l'Exploitation (DEX) à Mandelieu la Napoule, suivent, analysent, font progresser l'état de la connaissance des éléments de patrimoine régulièrement mise à jour. Outre la gestion de 460 km de chaussées autoroutières, ESCOTA gère d'autres domaines et entretient notamment 818 ouvrages d'art, 40 tunnels, 871 bâtiments, et plus de 1900 ha d'espaces vert, regroupés en cinq domaines de gestion du patrimoine ou métiers :

- Le bureau d'études et les bâtiments ;
- Les chaussées, les clôtures, la signalisation horizontale, la surveillance des talus ;
- La lutte contre l'incendie, le débroussaillage, la signalisation verticale ;
- Les ouvrages d'art, tunnels et murs de soutènement ;

- L'environnement, les bassins, les plantations, l'assainissement, les dispositifs de retenue.

Chaque domaine est placé sous la responsabilité d'un expert métier (EM) ou Conducteur d'Opération (COP) dont les activités sont coordonnées par le chef de service SVS.

ESCOTA, comme tout gestionnaire de patrimoine, est donc, comme nous l'avons vu précédemment, confrontée au :

- **vieillesse de l'infrastructure** : nous avons vu dans la section précédente que c'est une préoccupation constante pour le maître d'ouvrage qui doit garantir un niveau de qualité et de service élevé en termes de sécurité et de confort pour les clients tout en assurant la pérennité des ouvrages ;
- **grande quantité d'information** : les Districts au niveau du territoire et les divers services de la Direction de l'Exploitation d'ESCOTA s'emploient à ce que l'état des connaissances relatives aux éléments de patrimoine soit régulièrement mis à jour :
- **multiplicité des données** : les différents éléments composant le patrimoine, les opérations (d'entretien, de réparation ou de mise à niveau) effectuées, les anomalies détectées, les conditions de trafic, les caractéristiques environnementales, la proximité de zones urbaines, etc. ;
- **dispersion et disponibilité des données** : dans différents services de l'entreprise, dans les districts... etc.

Conformément à ce que nous avons décrit dans le cadre général de la problématique de gestion de patrimoine, cette activité, chez ESCOTA, se situe dans un contexte **multi acteurs et multicritères** :

- **multi acteurs** : les différents intervenants dans la chaîne de traitement de l'information (acquisition, évaluation, valorisation, décision) n'ont pas tous les mêmes objectifs, les mêmes points de vue, les mêmes expériences professionnelles ;
- **multi critères** : multiplicité des enjeux en terme de gestion et de performance (sécurité, fiabilité, disponibilité, durée de vie). Le décideur doit prendre en compte plusieurs aspects dans la décision, les techniques à utiliser, la réglementation en vigueur, l'impact sur la sécurité des usagers et le coût de l'opération, le tout dans un contexte sociétal évolutif. L'intégration de la notion de développement durable dans la logique de gestion intègre de nouvelles dimensions dans les processus de décision à l'égard du maintien et de l'amélioration des performances du réseau. La Figure 13 liste les préoccupations de la gestion du patrimoine (i.e. les problématiques générales de la gestion de patrimoine) regroupées par thèmes (i.e. les points sur lesquels on juge le gestionnaire de patrimoine par rapport à un événement redouté).

Thèmes	Problématiques
Disponibilité	Recensement précis de l'infra Ressources et besoins Etats de santé global – Vision globale
Anticipation	Analyse des risques Centralisation, Suivi et contrôle des données Surveillance Détection d'événement déclencheur (avant aggravation du pb) Maintenance préventive
Réactivité	Pertinence des choix techniques Choix des priorités Prise en compte des contraintes d'exploitation Recherche des causes (diagnostic) Maintenance et réparation Mise en conformité d'Ep par rapport à la réglementation.
Qualité	Image de marque de la société Confort et service usagers Fiabilité de l'infra (confiance de l'utilisateur dans l'infra)
Supervision	Analyse de risques Définition des Objectifs / Enjeux Validation d'opérations Proposition et évolution de stratégies de maintenance Contrôle de la mise en œuvre des stratégies.
Légitimation	Justification des décisions prises Historique des données et état du patrimoine.
Sécurité	Sécurité des usagers Sécurité de l'infrastructure Prévention des risques (usagers ou infrastructure)
Réglementation	Respect des normes et réglementations Proposition d'une nouvelle politique de gestion du patrimoine. Modifier une politique en fonction des changements de normes.

Figure 13 : les préoccupations de la gestion du patrimoine d'ESCOTA

Ainsi, il est indispensable de surveiller et évaluer l'état de santé de l'infrastructure en permanence pour pouvoir programmer les opérations d'entretiens, d'amélioration ou de mise à niveau sur les éléments de patrimoine (EP) constitutifs du réseau.

La gestion et la planification des **opérations** constituent une tâche complexe pour les décideurs qui doivent faire face à une masse importante d'informations. La société d'autoroute ESCOTA a décidé de formaliser et d'améliorer le processus décisionnel pour la maintenance préventive et la gestion de son patrimoine infrastructure afin de disposer d'une vision globale du patrimoine en termes d'objectifs et de contraintes dans un contexte d'exploitation dynamique et ainsi :

- **Centraliser** les données ;
- **Consulter** les données ;
- **Hierarchiser** les opérations en termes de priorité d'intervention avec une justification de la logique décisionnelle ;
- **Capitaliser** l'information, i.e., conserver l'historique des actions réalisées sur le patrimoine et pouvoir faire du reporting ;
- **Avoir une vision globale** de l'état du patrimoine, i.e. visualisation de l'état de santé et des priorités d'intervention.

Pour la suite du document, nous posons les définitions suivantes relatives aux éléments de patrimoine et aux opérations.

Définition d'un élément du patrimoine (EP) : c'est un ouvrage, un bâtiment, etc. à un point routier (PR) donné ou bien une zone définie par un intervalle de points routiers. Il est rattaché à un domaine de gestion du patrimoine.

Exemples : la chaussée entre les points routiers 145 et 157 (entre les échangeurs des Adrets et de Mandelieu), le tunnel de Pessicard au point routier 196, etc.

Définition d'une opération (OP) : une opération est la description de travaux d'entretien, d'amélioration ou de mise à niveau, à réaliser sur un ou plusieurs éléments du patrimoine. Elle est rattachée à un domaine de gestion de patrimoine.

I.4.2.2 Les étapes de la démarche : mesure, évaluation et décision

ESCOTA s'est dotée depuis de nombreuses années de structures et compétences pour répondre à la surveillance de son patrimoine. Les différentes phases de la gestion du patrimoine à ESCOTA s'inscrivent totalement dans la démarche à trois logiques complémentaires mise en évidence au I.3.3 dont une représentation est donnée à la Figure 15 :

La logique de mesure : la détection de symptômes

Chez ESCOTA, le suivi préventif des structures a été initié par un point zéro des EP, puis par la mise en place d'inspections périodiques [Sageau, 00].

Les acteurs de l'auscultation, de l'instrumentation (i.e. les Districts et les organismes spécialisés comme le CETE) disposent de techniques pour détecter, qualifier et quantifier l'état des matériaux et leurs défauts. Par exemple, les Districts effectuent des visites annuelles IQOA sur les ouvrages d'art. ESCOTA dispose ainsi chaque année d'une cotation IQOA pour les ouvrages. Le département Mécanique des Chaussées du Centre d'Études Techniques de l'Équipement d'Aix-en-Provence traite les mesures annuelles réalisées sur les chaussées (cf. Annexe 2) et restitue à ESCOTA des bilans annuels dont le format est spécifié en Annexe 4.

Quelque soient les EP, il s'agit là d'une cotation de symptômes techniques.

La logique d'évaluation : expertise et urgences d'intervention

Les experts métiers (les responsables des domaines de gestion cités plus haut) sont les garants de la gestion et de la maintenance de l'ensemble du patrimoine. Sur la base des bilans de santé des EP, ils évaluent l'état du patrimoine en fonction de critères d'urgence (Figure 14) pour lesquels des échelles de valeur sont définies au préalable (Tableau 1). ESCOTA définit alors trois niveaux d'urgence possibles pour les opérations indépendamment du domaine d'expertise (Tableau 1).

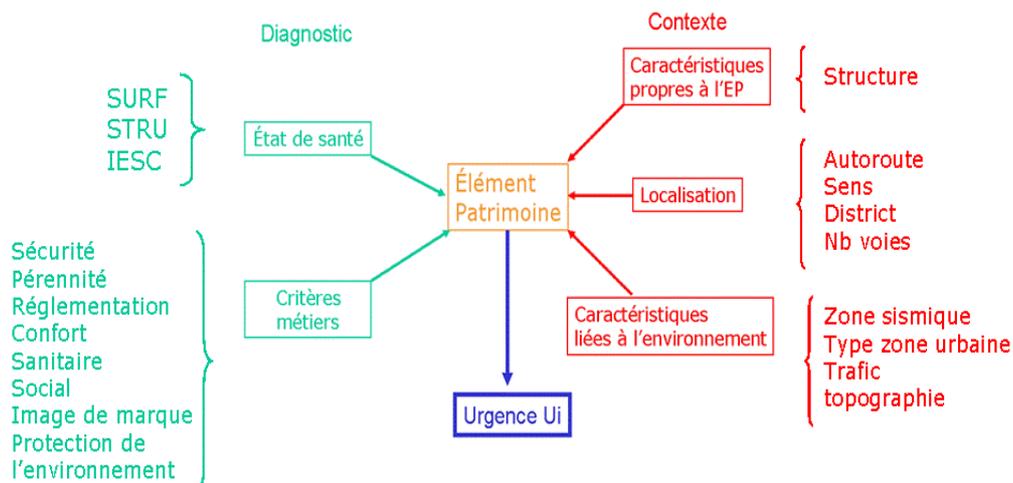


Figure 14 : Les critères d'urgence pour les chaussées

Niveau d'urgence	Signification
Urgence U_1	Très important
Urgence U_2	Moyennement important
Urgence U_3	Importance faible

Tableau 1 : Les niveaux d'urgence

L'appréciation de l'urgence à la Figure 14 est une interprétation des bilans de santé (indices d'état de santé des chaussées en Annexe 2) en fonction de critères propres au métier de l'expert, mais aussi relativement aux caractéristiques de l'environnement et à la localisation de l'EP. Elle correspond à une analyse de risque technique comme nous avons pu l'évoquer dans ce chapitre, dans un contexte d'exploitation donné, et permet à un expert métier d'attribuer un degré d'urgence à tout EP concerné par une opération de son domaine. Nous détaillerons dans les chapitres suivants la procédure d'évaluation de façon plus formelle.

La logique de décision : stratégie et priorités d'intervention

Les urgences U_i relatives à chaque opération sont ensuite soumises à validation du chef de service SVS. Ce dernier évalue les priorités d'intervention en fonction de critères de priorité : sécurité des usagers et des EP, engagement de la société (vis-à-vis de l'État), contraintes d'exploitation, etc. ... Ce responsable contrôle l'ensemble des domaines de l'exploitation, il a donc un rôle d'arbitre. Les critères sont associés à des échelles de valeurs normalisées ; trois niveaux de priorité sont définis au Tableau 2.

Niveau de Priorité	Signification
Priorité P1	Risque Fort
Priorité P2	Risque Moyen
Priorité P3	Risque Faible

Tableau 2 : Les niveaux de priorité d'intervention

Un EP d'urgence U_i (dans le cadre d'une opération) est évaluée en Priorité d'intervention P_j . Cette évaluation se fait en fonction des critères de priorité : ceux-ci expriment le point de vue du chef de service sur les opérations au niveau de la stratégie de gestion du patrimoine d'ESCOTA. C'est une analyse de *risque stratégique* : l'opération est évaluée selon chaque critère en termes de retour sur investissement (voir sections précédentes 1.2.4 et 1.3.2) ; il s'agit d'évaluer le risque à faire ou ne pas faire l'opération en fonction de chaque critère. En effet, lors de l'évaluation d'une opération concernant une chaussée par exemple, on évalue le risque à faire ou ne pas faire l'opération en termes de sécurité, d'exploitation de l'autoroute (possibilité de neutraliser une voie, pendant quelles tranches horaires, etc.), ou en termes financiers [Trouillet, 00]. Retarder une opération de maintenance peut conduire ultérieurement à une opération plus lourde et donc plus onéreuse.

De plus, ce niveau d'évaluation s'exerce sur l'ensemble des métiers représentés dans le service de gestion de patrimoine infrastructure : il faut évaluer les urgences signalées par chacun des experts métiers selon un référentiel unique. Les évaluations des cinq experts métiers doivent être rendues commensurables. Nous nous appuyons sur la méthode MACBETH [Bana e Costa *et al.*, 94] pour accompagner le décideur dans cette tâche (voir sous-section 3.1 du chapitre III). Le chef de service évalue et arbitre les opérations en prenant en compte les cinq domaines de gestion de patrimoine. Cette étape clôture l'analyse de risque au niveau de la stratégie de l'entreprise. Le chef de service peut alors mettre en place une planification des opérations ainsi évaluées *en priorité* et proposer des programmes pluriannuels.

Synthèse

La Figure 15 résume l'enchaînement des niveaux d'évaluation / validation constituant le processus de décision en matière de gestion du patrimoine chez ESCOTA. La figure fait apparaître les dimensions nouvelles d'analyse apportées à chaque niveau hiérarchique du processus de décision, de la mesure jusqu'à la planification. L'apport et l'interprétation des informations à chaque niveau fonctionnel enrichissent le contenu décisionnel du flux d'informations. Une décision ne se prend jamais sur

l'information brute, mais sur l'interprétation que l'on en fait dans un contexte et à un niveau fonctionnel donné. Notons encore qu'on y retrouve l'idée de boucle cognitive que nous avons évoquée dans les travaux de H.A. Simon, propre à tout processus décisionnel complexe en organisation.



Figure 15 : une décision multicritère hiérarchisée

Sur la base de la Figure 15, nous avons initié la décomposition du processus décisionnel concernant la gestion du patrimoine chez ESCOTA : il y a d'abord l'analyse technique de l'état des éléments du patrimoine (chaussées, ouvrages d'art, ... etc.), puis l'évaluation des opérations correspondantes en terme d'urgence d'intervention, puis la validation et l'évaluation en priorité de ces opérations et enfin les propositions de planification. Cette décomposition ou hiérarchisation des étapes de la décision est représentée à la Figure 16. Notons que si l'objectif général de notre projet peut s'énoncer de façon très synthétique comme « optimiser la planification pluriannuelle des opérations d'entretien, de maintenance et d'amélioration » et nous orienter ainsi intuitivement vers des solutions relevant strictement de la recherche opérationnelle et la formulation mathématique d'un problème d'optimisation, la complexité du processus décisionnel dans l'organisation nous a contraints au préalable à formaliser et décomposer ce processus en phases élémentaires (Figure 15 et Figure 16). Nous le verrons au chapitre III, ces phases élémentaires font appel à des outils mathématiques qui ne relèvent pas nécessairement de la recherche opérationnelle.

Chaque EP passe par trois niveaux d'analyse dans le cadre d'une opération : le bilan de santé (diagnostic Figure 16), l'évaluation en urgence (expertise métier Figure 16), puis en priorité (analyse de risque stratégique Figure 16). Sur la base des évaluations en priorité, le chef de service peut enfin proposer un programme de planification pluriannuel qui, une fois validé, débouche sur la programmation des travaux.

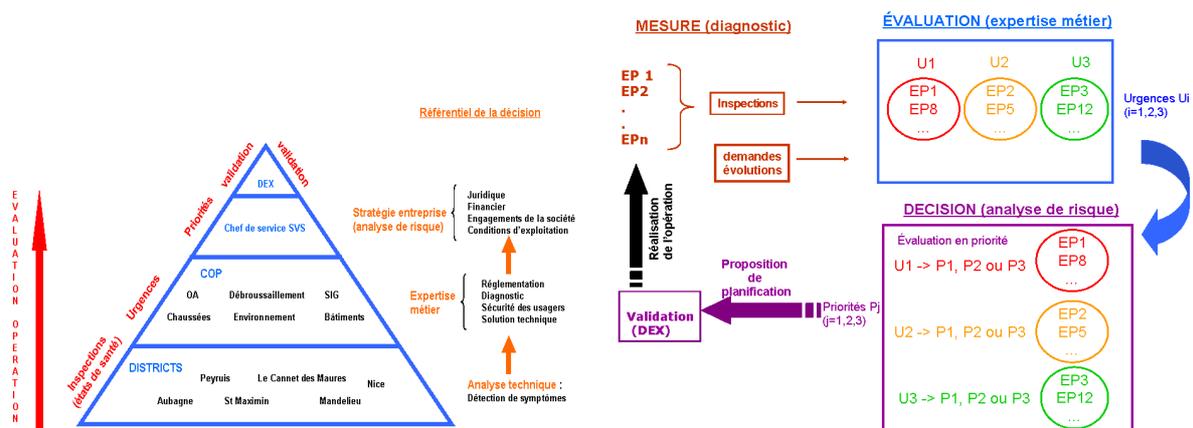


Figure 16 : décomposition du processus décisionnel chez ESCOTA

La décomposition et la formalisation du processus décisionnel de la gestion du patrimoine ont conduit ESCOTA à lancer le développement de l'outil d'aide à la décision SINERGIE (Système INteractif d'Évaluation pour le Renouvellement et la Gestion de l'Infrastructure d'ESCOTA). Ce logiciel doit constituer une évolution significative du fonctionnement de la gestion du patrimoine avec :

- la mémorisation et le partage des connaissances comprenant l'état 0 des EP, ainsi que les données de localisation, de trafic, de zone urbaine, de zone sismique et de topologie ;
- l'accompagnement pour l'analyse de risque lors des évaluations en urgence et priorité d'intervention. L'analyse de risque relève d'un diagnostic pour les inspecteurs, de l'expertise technique pour l'expert et se situe au niveau de la stratégie d'entreprise pour le chef de service ;
- l'identification et la modélisation des processus d'évaluation multicritère en urgence et priorité ;
- le suivi des évaluations en urgence et priorité affectées aux opérations ;
- l'archivage proposant l'historique de l'état des EP, des opérations, des bilans de santé ;
- la supervision de l'activité car SINERGIE fournit une représentation synthétique de l'état du patrimoine à un instant donné sous la forme d'une carte synoptique ;
- l'aide à la justification en permettant d'identifier les dimensions déterminantes de l'analyse de risque hiérarchisée qui ont conduit à l'évaluation en priorité de telle ou telle opération ;
- l'aide à la planification à proprement parler.

I.5 Conclusion

Le vieillissement des infrastructures est une préoccupation constante des maîtres d'ouvrage qui doivent garantir la sécurité des usagers et le bon fonctionnement des infrastructures dont les enjeux, nous l'avons vu, ne s'expriment pas en termes de diagnostic (matériaux), mais en termes de performances sur les ouvrages.

Ainsi, il est indispensable pour les gestionnaires de superviser et évaluer en permanence l'état de santé de l'infrastructure afin de programmer les opérations nécessaires d'entretien, d'amélioration ou de mises à niveau. La gestion de patrimoine est un problème complexe qui induit de nombreuses décisions dans un contexte multi acteurs et multicritères. Les coûts de maintenance sont difficiles à identifier et les entretiens sont programmés selon des valeurs d'indicateurs et des résultats d'inspections sans prendre en compte tous les autres aspects de la décision (réglementation, environnement, ...).

Concernant les aspects de recherche en logique de la décision, c'est en 2004, que la société ESCOTA a décidé de se doter d'un système informatisé d'aide à la décision, SINERGIE, fondé sur une volonté de transparence dans les décisions, de responsabilisation de ses personnels à chaque niveau d'intervention et de justification de sa logique décisionnelle dans un contexte multicritère et multi acteurs.

Les différentes caractéristiques de la décision en organisation, ainsi que la problématique de la gestion de patrimoine dans le BTP, telle que nous les avons exposées dans ce chapitre, puis l'instanciation de ces considérations générales à la problématique d'ESCOTA nous confortent dans l'idée que SINERGIE doit permettre :

- Le décloisonnement des acteurs des logiques de mesure, d'évaluation et de décision, en assurant le partage et la remontée de l'information et ainsi de faciliter l'établissement des priorités d'intervention des opérations ;
- La gestion informatisée de l'ensemble des données relatives à l'état du patrimoine et leur traitement automatisé en vue de la programmation d'opérations ;
- La prise en compte des multiples critères d'évaluation propres à chaque domaine d'expertise, à chaque niveau fonctionnel de l'exploitation ;
- D'itérer sur les phases de mesure ou d'évaluation lorsque le décideur requiert un complément d'information ou une validation d'expertise suite à l'identification d'un point sensible, imprécis ou incomplet dans le dossier d'une opération ;
- De capitaliser le résultat des différentes étapes d'évaluation pour proposer une aide à la planification pertinente dont le processus de construction repose sur l'ensemble des acteurs de la gestion du patrimoine.

Le traitement de l'information, son acquisition et son partage sont donc au cœur de la solution développée et l'approche choisie par ESCOTA s'inscrit, par là, totalement dans la lignée du modèle de Simon. Une attention toute particulière est portée à l'aspect multicritère de l'évaluation de l'état du patrimoine, de l'urgence et de la priorité des opérations afférentes. Sur la base d'une analyse de sensibilité de l'évaluation multicritère, il sera alors possible de fournir une trace de la logique des décisions quant à la politique de gestion du patrimoine sur la base des éléments techniques, réglementaires, sécuritaires et financiers gérés par le système d'information.

Même si, en dernier ressort, la décision finale (dans ce cas, il s'agit de décider d'effectuer une opération) incombe à un individu clairement identifié (le chef de service SVS), celle-ci doit résulter de la gestion contrôlée des interactions entre tous les acteurs du processus décisionnel : du processus d'évaluation du bilan de santé à la programmation de l'opération. Les intervenants dans la gestion du patrimoine, c'est-à-dire les Districts, les experts métiers (EM ou COP), le chef de service SVS, conditionnent directement la décision en fonction des informations dont ils disposent et chacun, selon sa fonction, ses responsabilités, son expérience, et son savoir-faire, peut les interpréter différemment. Ces intervenants sont indissociables du processus de décision car ils sont les seuls capables d'apprécier la diversité et la complexité des données. Le logiciel SINERGIE que nous allons présenter dans les chapitres suivants doit donc en premier lieu encourager le partage de l'information et supporter le processus d'évaluation collective pour proposer in fine une aide à la planification pertinente et résultant de toute la chaîne de l'information—du relevé de symptômes à la programmation d'une opération, en passant par son évaluation en urgence et en priorité.

Le chapitre II qui suit va donc s'attacher à reprendre les fonctionnalités attendues de SINERGIE que nous venons de lister et à décrire la solution logicielle retenue pour y répondre. Le chapitre III, lui, reprendra à son tour les fonctionnalités principales de SINERGIE, mais cette fois-ci, pour en décrire les supports mathématiques. Enfin, le chapitre IV illustrera l'utilisation du logiciel sous la forme d'un document qui pourrait s'apparenter à un manuel utilisateur.

Chapitre II: La solution logicielle SINERGIE

II.1 Introduction

ESCOTA souhaite se doter d'un outil informatique d'aide à la décision pour la gestion et la maintenance du patrimoine. Ce chapitre est consacré aux modèles informatiques de cet outil. Il propose d'une part, la spécification des fonctionnalités qui nous apparaissent comme essentielles pour une aide à la décision pertinente pour assister l'exploitant dans la gestion quotidienne de son patrimoine, d'autre part la structure des données à partager par l'ensemble des acteurs du processus de gestion.

Le processus décisionnel impliqué dans la gestion du patrimoine d'ESCOTA, que nous précisons dans la section 2 de ce chapitre, présente toutes les caractéristiques de la décision en organisation telles que décrites par l'économiste H.A. Simon [Simon, 91]. Dans le chapitre I, nous avons mentionné à cet égard que si le décideur ne possède que rarement une connaissance totale de la situation, deux causes majeures peuvent être incriminées : d'une part, son incapacité à traiter l'ensemble de tous les flux d'information auxquels il a accès et d'autre part, son enclin naturel pour une représentation simplificatrice monocritère de la situation qui occulte la complexité de la réalité. De façon très résumée, le décideur a donc besoin d'un outil informatique qui lui permette de traiter intelligemment et dynamiquement l'information, en lui proposant en particulier des représentations pertinentes de la situation en adéquation avec ses modes cognitifs. La solution informatique que nous retiendrons s'appuiera donc sur deux grandes approches de la décision : les modèles de type Système de Traitement de l'Information [Simon, 83] [Simon, 97] et l'analyse multicritère [Roy *et al.*, 93].

Plusieurs études sur la décision en organisation s'accordent ainsi à montrer que le traitement de l'information dans l'organisation est le véritable point clé de la décision en organisation [Akharraz, 04] [Akharraz *et al.*, 02] [Planté, 06] [Denguir, 07]. La gestion du patrimoine à ESCOTA relève de cette catégorie de processus décisionnels.

La gestion des opérations est une tâche complexe pour les décideurs qui doivent faire face à une masse d'informations conséquente. Ces derniers ont besoin d'avoir une vision globale du patrimoine en termes d'objectifs et de contraintes, tout en conservant la possibilité de consulter dans le détail l'état d'un élément du patrimoine ou l'évaluation d'une opération à réaliser. L'objectif de notre travail consiste donc à mettre en place un système informatique pour aider l'exploitant à mener une stratégie de gestion durable du patrimoine. Nous verrons dans le chapitre suivant les outils mathématiques qui supportent les fonctionnalités que propose l'outil informatique. Pour l'heure, l'objet de ce chapitre est de construire le modèle de l'outil informatique, support de l'aide à la décision. La section 2 formalise le processus décisionnel de la gestion du patrimoine à ESCOTA et déduit de ce modèle les grandes fonctions à implémenter dans notre logiciel.

Le traitement de l'information, son acquisition et son partage sont donc au cœur de la solution que nous proposons. Pour cela, l'outil doit aider à mettre en place une culture de partage de l'information où chaque acteur intervenant dans le processus de gestion du patrimoine, met à la disposition de tous les informations dont il dispose. L'idée est de créer une base de connaissance du patrimoine contenant toutes les informations sur l'état de santé, les décisions prises en termes d'opérations ainsi que les travaux réalisés. Nous décrivons la conception de ce système d'information dans la section 5.

Cette base, pour rester pertinente, doit être alimentée et mise à jour par l'ensemble des personnels des Districts et du service Structure Viabilité Sécurité intervenant dans le processus de décision. Le bénéfice de ce travail de partage d'informations réside dans la constitution d'un historique de la gestion du patrimoine. Ainsi, il sera possible d'avoir une vision globale de l'état du patrimoine, de mesurer les effets de la politique de gestion et de la justifier au moyen d'un système d'aide à la décision décrit dans la section 4.

Les choix de conception des outils du système d'information et du système d'aide à la décision sont précisés dans la section 3. Enfin, la section 6 analyse la généricité du modèle, notamment sa capacité à intégrer la définition de nouveaux métiers (ou domaines) de gestion de l'infrastructure. Nous étudierons également ces possibilités d'évolution du logiciel.

II.2 Le processus de la décision pour la gestion du patrimoine

La première étape de notre travail a consisté à formaliser le processus de la décision pour la gestion du patrimoine. **Trois étapes** ont été mises en évidence dans le processus d'évaluation des opérations au chapitre précédent qui correspondent par ailleurs à trois niveaux fonctionnels bien distincts chez ESCOTA (districts, inspecteurs extérieurs ; conducteurs d'opérations (COP) ou experts métiers (EM) ; responsables de l'exploitation) :

- Le suivi du patrimoine ;
- L'évaluation de l'état du patrimoine ;
- Les décisions.

Cette gestion se traduit par une surveillance attentive de l'état de santé et l'entretien en temps opportun, ce qui se traduit par la réalisation d'entretiens, d'amélioration ou de mise à niveau. Nous désignerons pour la suite par **opération** les entretiens, les améliorations et les mises à niveau.

Le patrimoine infrastructure d'ESCOTA se compose d'un ensemble d'éléments de patrimoine EP. Tout élément de patrimoine est rattaché à l'un des cinq domaines d'intervention comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent.

Nous retrouvons chacune des trois étapes précitées représentées à la Figure 17. La logique de mesure correspondant au suivi du patrimoine est réalisée d'une part par les Districts avec des visites annuelles, d'autre part par des inspecteurs spécialisés. Ils fournissent des comptes rendus d'inspection sur les éléments de patrimoine au Conducteur d'Opération (ou Expert Métier, EM) concerné. Par exemple, pour les Ouvrages d'Art, une méthode normalisée par le SETRA est utilisée pour les visites annuelles et pluriannuelles : la méthode Image de la Qualité des Ouvrages d'Art (IQOA). Ainsi, un ouvrage d'art a un score annuel (ou note) d'état de santé (en vert sur la Figure 17). Les expressions de besoins sont des demandes, exprimées par les Districts, en termes d'opérations non basées sur un bilan de santé. Un exemple d'expression de besoin est la demande de création d'un chemin d'accès pour faciliter l'accès des véhicules de la viabilité hivernale sur l'autoroute pour les personnels des Districts.

Dans un deuxième temps, la logique d'évaluation (en noir sur la Figure 17) concerne le passage des bilans de santé à la liste des opérations à réaliser sur les éléments de patrimoine qui en ont besoin. Le Conducteur d'Opération fait une synthèse des bilans de santé. Il peut ainsi élaborer le diagnostic de tout EP qu'il classe en urgence d'intervention U_1, U_2 ou U_3 (U_i est plus urgent que U_{i+1}) à partir de critères relevant d'une analyse de risque technique. Il propose alors des opérations regroupant des EP cotés en niveau d'urgence U_i . Ensuite, le chef de service évalue les urgences qui lui sont proposées en priorité d'intervention P_1, P_2 ou P_3 (P_i est plus urgent que P_{i+1}) en prenant en compte des critères d'analyse relevant cette fois-ci de la stratégie d'entreprise (risques stratégiques). Il s'agit d'un processus d'évaluation en boucle (cf. cycle noir de la Figure 17) car la survenue d'un nouveau bilan de santé sur un ouvrage d'art, par exemple, pour lequel la note IQOA serait moins alarmante, permet de réévaluer les niveaux d'urgence et de priorité. Cette boucle permet également de prendre en compte la révision d'une évaluation si, après vérification au niveau fonctionnel suivant du processus de planification des opérations, les deux évaluateurs ne s'accordent pas sur la décision à prendre. De même, une mauvaise évolution d'une pathologie peut accroître le niveau d'urgence et/ou de priorité.

Sur la base des opérations évaluées en priorité d'intervention, le chef de service propose au directeur de l'exploitation une programmation pluriannuelle. Nous entrons dans la dernière phase du processus (logique de décision) où la validation de cette programmation (i.e., la décision de lancer l'opération par le service Structure Viabilité Sécurité (SVS) ou le Directeur d'Exploitation (DEX) à la Figure 17)

déclenche le processus de rédaction du Dossier d'Opération, du Dossier de Consultation des Entreprises, puis la réalisation des travaux pilotés par le COP (cf. en rouge Figure 17).

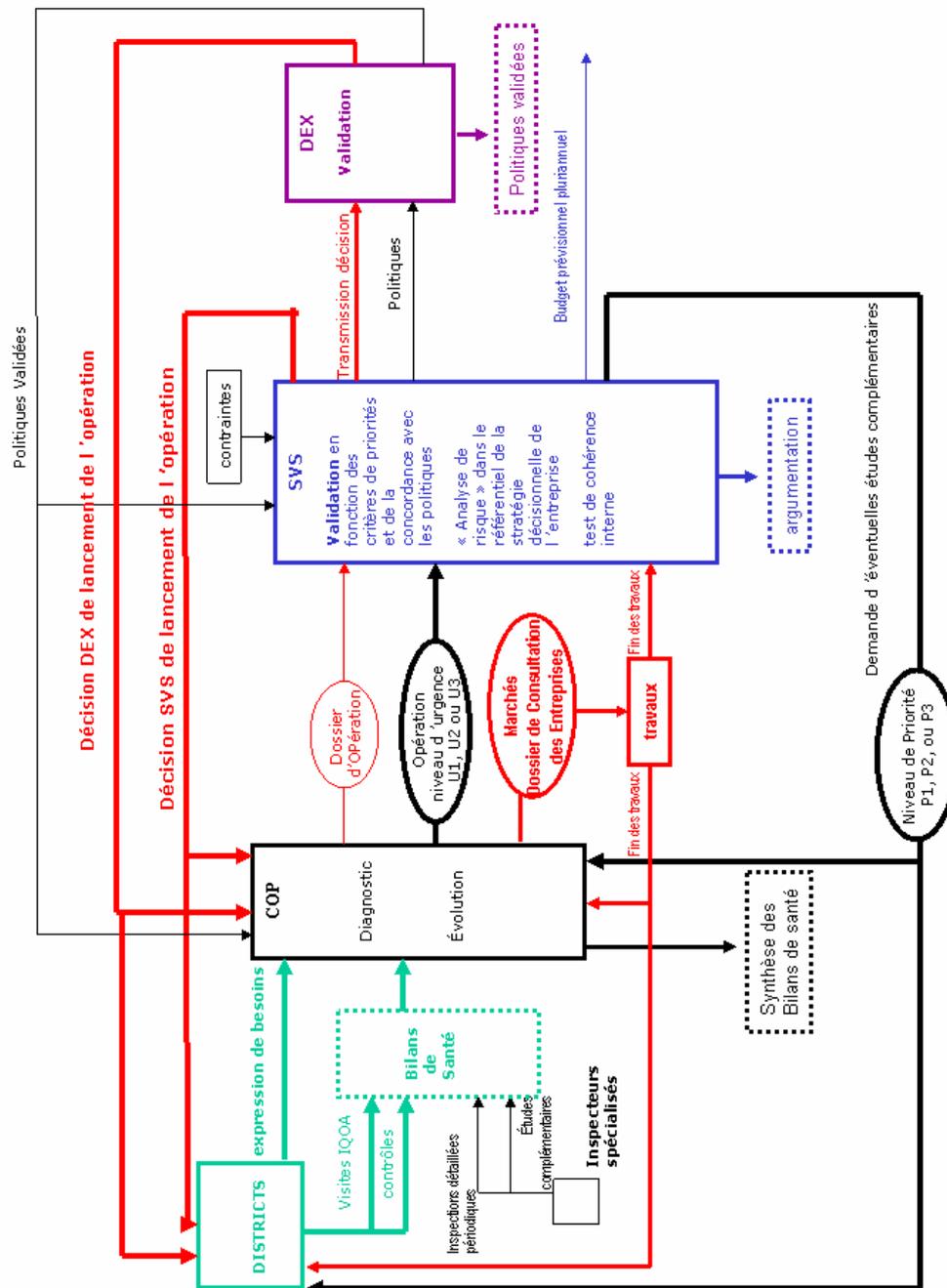


Figure 17 : schéma fonctionnel du processus décisionnel de la gestion du patrimoine d'ESCOTA

La description que nous venons de faire du processus décisionnel, qui part de la mesure de symptômes jusqu'à la planification d'opérations dans un plan pluriannuel chez ESCOTA, nécessite une adéquation entre les informations pertinentes disponibles au bon moment et les représentations propres à chaque niveau fonctionnel de l'exploitation pour que le processus se déroule correctement. La solution que nous proposons résulte donc du couplage entre un Système d'Information SI et un

outil d'Aide à la Décision basé sur une évaluation multicritère hiérarchique et capable de justifier ses conclusions depuis la base de connaissances du SI (cf. Figure 18) :

- Un **Système d'Information (SI)** pour stocker les informations et partager les connaissances. Ce SI doit être capable de gérer toutes les informations utiles aux évaluations des opérations et est destiné à devenir la mémoire de la gestion du patrimoine à ESCOTA ;
- Un **Système Interactif d'Aide à la Décision (SIAD)** pour aider les décideurs dans la façon dont ils utilisent leur capacité de raisonnement et de traitement de l'information dans les phases d'évaluation et de justification.

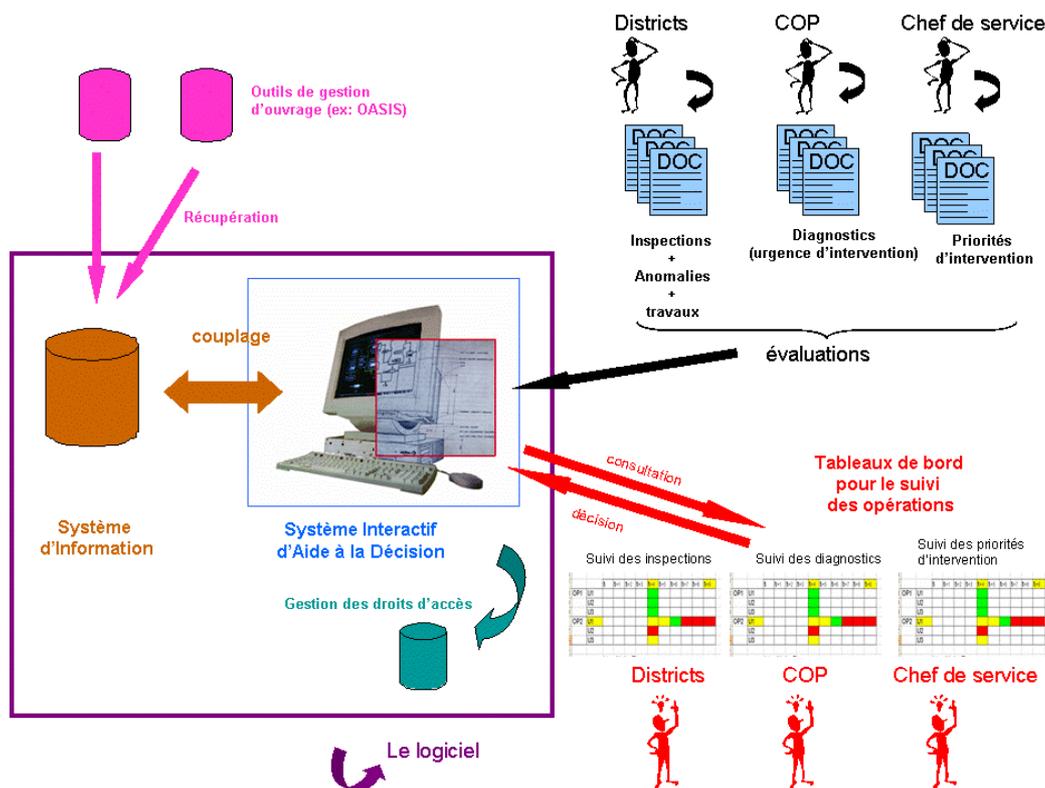


Figure 18 : le logiciel SINERGIE

La Figure 18 ci-dessus schématise le fonctionnement de ce couplage en mettant en évidence la participation de tous les acteurs (Districts, COP et chef de service SVS) dans le partage et la mise à disposition des informations de la gestion du patrimoine. Le SIAD, via un contrôle des droits d'accès des utilisateurs, assure la communication et propose les interfaces adéquates aux utilisateurs afin de :

- enregistrer et capitaliser l'information (en noir sur la Figure 18) : les Districts enregistrent les bilans de santé, les anomalies et entretiens courants, ainsi que le contrôle de la réalisation des travaux des opérations. Le COP (resp. le chef de service SVS) dispose d'interfaces pour enregistrer les évaluations en urgence (resp. en priorité d'intervention);
- consulter et avoir une vision globale du patrimoine : l'information contenue dans le SI est récupérée par le SIAD et restituée notamment sous la forme de tableaux de bord pour le suivi des bilans de santé, des évaluations en urgence et en priorité.

La fiabilité de ce fonctionnement repose sur la base de la collaboration de tous les acteurs dans l'enregistrement et la mise à disposition des informations dont ils disposent pour améliorer la connaissance et le suivi de l'état du patrimoine.

L'outil informatique qui doit supporter la gestion du patrimoine à ESCOTA a été baptisé **SINERGIE** pour **S**ystème **I**nteractif d'**E**valuation pour le **R**enouvellement et la **G**estion de l'**I**nfrastructure

d'ESCOTA. Ce projet doit induire une évolution significative dans le fonctionnement de la gestion du patrimoine via la formalisation du processus décisionnel qu'il instrumente et le partage des informations qu'il gère. La première étape consiste à structurer les données dans le Système d'Information. Ensuite, il faut développer les fonctions de traitement des données, les Interfaces Homme Machine (IHM) permettant la mise en forme, la consultation et le suivi des données proposées par le SIAD.

La description précédente du processus de décision chez ESCOTA a mis en avant les besoins informationnels et les tâches à réaliser à chaque niveau fonctionnel de l'exploitation. Il nous est donc maintenant possible de lister les fonctions principales attendues de SINERGIE.

Les fonctions d'administration

L'administrateur du système n'est pas un acteur dans la gestion du patrimoine, mais il est le garant du fonctionnement du logiciel SINERGIE. Il initialise l'application, c'est-à-dire qu'il enregistre les données nécessaires au fonctionnement de l'outil : la définition du réseau autoroutier et des éléments de patrimoine. Il assure la gestion des utilisateurs : création (resp. modification) d'un utilisateur District, COP et Chef de service SVS. Il enregistre également les données définissant l'environnement du réseau comme les données de trafic et de zones d'accumulations d'accidents (zaa). Ces données sont disponibles au service EIT (Études et Ingénierie du Trafic) à ESCOTA, où elles sont mises à jour annuellement. Le format de ces données est défini à EIT, l'administrateur dispose donc des fonctions d'insertion automatique de ces données dans le SI.

Les fonctions d'enregistrement / consultation

La surveillance du patrimoine est possible en consultant les informations relatives à tout élément de patrimoine : sa définition, sa localisation, les caractéristiques environnementales disponibles, les derniers bilans de santé, les anomalies, les entretiens courants réalisés et les derniers travaux le concernant. Pour chaque type de données nécessaires à la surveillance du patrimoine correspondent des fonctions d'enregistrement et de consultation.

La consultation dépend de la disponibilité des informations lesquelles doivent avoir été au préalable enregistrées dans le SI. Ainsi, les Districts renseignent des fiches pour les anomalies, les entretiens courants et la réalisation des travaux. Les bilans de santé sont enregistrés par le COP dans le cas des chaussées (dont le protocole est défini en Annexe 4). Dans le cas des Ouvrages d'Art, les bilans de santé sont contenus dans d'autres outils, comme l'outil de gestion des ouvrages OASIS (cf. Figure 18) et dans ce cas, SINERGIE se connecte à cet outil pour récupérer et afficher les informations demandées. Nous avons vu, au paragraphe précédent, que les informations de zaa et de trafic sont mises à jour annuellement par l'administrateur du système et consultables par tous les utilisateurs.

Nous avons là une vision sur les informations disponibles en cours. Pour répondre au besoin de capitalisation et d'historique évoqués précédemment, il doit également être possible de faire une recherche sur ces mêmes informations (bilans de santé, anomalies, ...) relativement à des années précédentes afin d'évaluer l'évolution de l'état du patrimoine. Par exemple, pour une chaussée où l'on constate des fissures, la consultation de bilans de santé sur l'année précédente permet de juger de l'évolution de l'ouverture de ses fissures.

Les évaluations

L'approche multicritère de l'évaluation en urgence et priorité d'intervention permet de décomposer le processus décisionnel relatif à la gestion du patrimoine en fonction des informations disponibles à chaque niveau fonctionnel de l'exploitation. Pour toute opération à réaliser sur un ou plusieurs éléments de patrimoine, le Conducteur d'Opération crée l'opération, rentre les éléments de patrimoine concernés par cette opération. Ainsi, pour chaque opération, il est possible de consulter sa nature, ainsi que les éléments de patrimoine concernés.

Les EP (concernés par une opération) doivent ensuite être évalués en urgence selon les critères propres au COP, puis en priorité d'intervention selon les critères du chef de service SVS. Lorsque les scores partiels de chaque opération ont été affectés, SINERGIE calcule le niveau global de l'urgence et de la priorité de l'opération. A cet effet, SINERGIE a recours à l'agrégation multicritère : des

opérateurs d'agrégation ont été définis au préalable dans le logiciel, ils permettent de passer d'un ensemble de scores partiels relatifs aux critères d'évaluation à une note de synthèse en urgence ou priorité. Ainsi, le COP (resp. le chef de service SVS) dispose bien sûr d'interfaces pour définir l'opérateur d'agrégation qui sied le mieux à son comportement décisionnel, mais SINERGIE lui propose également un support logiciel pour l'accompagner dans cette démarche d'identification et de définition de son modèle décisionnel. L'évaluation multicritère d'un élément de patrimoine en urgence (resp. en priorité) repose sur l'agrégation des scores partiels relativement aux critères d'évaluation ; la fonction d'évaluation permet d'enregistrer les scores attribués selon chaque critère et attribue un score global à chaque EP de l'opération. Il est ensuite possible de consulter toute évaluation en récupérant dans le SI la liste des couples critères / scores et recalculer le score global. Le suivi sous la forme d'un tableau récapitulatif (comme cela est proposé à la Figure 18) permet de superviser l'ensemble des opérations en cours avec leur score de synthèse.

Les fonctions d'analyse

Toute évaluation en urgence (resp. en priorité) enregistrée dans le SI comprend un ensemble de scores et de commentaires associés relativement à chaque critère d'évaluation. Deux fonctions sont essentielles pour l'analyse des évaluations effectuées par les Conducteurs d'Opération et le chef de service SVS : la justification et le contrôle d'erreurs d'évaluation.

La première concerne la capacité du système à expliquer quels sont les critères qui ont joué un rôle dans l'affectation du score global de l'opération et l'expliquer grâce à un argumentaire (les commentaires) enregistré lors des évaluations. Cette fonction est la justification : elle permet, à partir d'une note de synthèse, de remonter dans un premier temps aux critères qui ont été déterminants dans l'affectation de ce score, puis dans un second temps de restituer les commentaires textuels associés à ces critères discriminants lorsqu'ils ont été renseignés par le COP (resp. le Chef de Service SVS). Cette fonction constitue le support informatique nécessaire à la construction de l'argumentaire visant à justifier la décision prise par le COP et le Chef de Service quant à la date de programmation de l'opération concernée. Nous détaillerons cette fonction dans la section 4 du chapitre III.

La seconde est une analyse de sensibilité consistant à évaluer la fiabilité d'une évaluation en urgence (resp. en priorité) et à en donner les causes d'erreurs les plus probables, i.e. les critères pour lesquels une erreur d'estimation partielle conduit le plus probablement à une erreur d'évaluation en urgence (resp. en priorité). SINERGIE propose deux fonctions de contrôle des erreurs d'évaluation, qui permettent d'estimer les risques d'erreurs a priori et a posteriori et que nous développerons dans la section 5 du chapitre III.

L'aide à la planification

Enfin, pour chaque opération, les conducteurs d'opération proposent une programmation pluriannuelle en fonction des évaluations en urgence des opérations. En effet, il propose pour chaque EP évalué en urgence un échéancier sur plusieurs années avec le montant des dépenses prévues pour chaque année. Nous avons mis en place une fonction qui permet de contrôler la validité de cette proposition de planification. Ce contrôle systématique proposé par SINERGIE s'appuie sur un ensemble de règles d'exploitation et un test de cohérence entre les interprétations du COP et du Chef de Service pour une opération donnée. Nous avons évoqué précédemment la nécessité de proposer une aide à la planification pertinente dont le processus de construction repose sur l'ensemble des acteurs de la gestion du patrimoine. C'est ce que nous nous proposons de faire en basant notre fonctionnalité d'aide à la planification sur la cohérence des évaluations en urgence U_i et en priorité P_j qui constituent l'aboutissement de toute la chaîne de traitement de l'information assistée par SINERGIE. La planification, qui n'a pas de support mathématique particulier, sera détaillée dans la sous-section *aide à la planification* du dernier chapitre.

Dans un premier temps, l'outil est déployé pour **les Chaussées** pour ensuite être étendu aux autres métiers du service SVS. La conception de SINERGIE doit donc prévoir l'intégration de nouveaux domaines de gestion du patrimoine.

II.3 Les choix de conception

On distingue deux approches distinctes pour la conception de systèmes [Gabay, 05]. L'approche dite classique comprend de nombreuses variantes axées sur les techniques utilisées pour développer des systèmes d'information.

L'une des méthodes dite classique les plus utilisées est la méthode Merise. **Merise** se positionne comme une **méthode de conception de Système d'Information organisationnel**, plus tournée vers la compréhension et la formalisation des besoins du métier que vers la réalisation de logiciel. Cette méthode reste un classique en tant que méthode de conception des Systèmes d'Information et propose une démarche méthodologique de développement. De notre point de vue, sur la seule partie des formalismes, Merise est adaptée à la modélisation des données en vue de la construction d'une base de données relationnelle. Merise se réclame plus de l'ingénierie du Système d'Information métier que du génie logiciel.

Depuis quelques années, l'approche orientée objet est de plus en plus utilisée, car elle permet de considérer le système d'information comme une collection d'objets interdépendants qui fonctionnent ensemble pour exécuter des tâches. Un objet est vu comme un élément du système qui peut répondre à des messages. L'idée de l'approche objet est dans un premier temps de définir tous les objets qui travaillent ensemble dans le système. Ensuite, il s'agit de montrer comment ils interagissent entre eux pour exécuter des tâches.

Le langage **UML** (Unified Modelling Language) s'est imposé comme standard à utiliser en tant que langage de modélisation objet. UML, de par son origine (la programmation objet) s'affirme comme un ensemble de formalismes pour la **conception de logiciel**. C'est la méthode idéale pour concevoir et déployer une architecture logicielle développée dans un langage objet (Java, C++, VB.net).

Aujourd'hui, le courant objet est une réalité incontournable dans le monde des méthodes de conception et de développement des Systèmes d'Information. Toutefois, la modélisation des données via le formalisme « Entité Relation » de Merise est plus sophistiquée que le modèle de classe d'UML et garantit une plus grande fiabilité lors du passage au modèle logique et physique de la base de données. De nombreux systèmes développés aujourd'hui combinent les technologies classiques et orientées objets [Satzinger, 04], nous nous proposons donc d'utiliser ces deux méthodes de manière complémentaire. Dans un premier temps, notre analyse UML va nous permettre de poser de manière claire à quels besoins doit répondre SINERGIE, comment le système devra se comporter et structurer l'architecture logicielle. Ensuite, l'analyse Merise sera plus facile, notamment grâce au travail de modélisation général fait avec UML pour modéliser le Système d'Information.

II.4 Approche Objet UML

UML permet de modéliser de manière claire et précise la structure, le comportement d'un système indépendamment de toute méthode, de tout langage de programmation et de toute plateforme de réalisation. Il est devenu un outil puissant qui s'est révélé très efficace dans la formalisation des connaissances, par exemple pour comprendre un système complexe (voir l'exemple du système « incendie de forêt » [Guarnieri *et al.*, 04], où le modèle permet de mieux comprendre le phénomène, d'en prédire et d'en limiter les dégâts).

La puissance de ce langage réside dans la démarche d'abstraction proposée : représenter dans un langage objet notre façon de raisonner. Cette représentation est ensuite plus facile à transposer en langage informatique.

L'approche objet porte trois regards différents sur le système que l'on cherche à modéliser : **l'analyse**, la **conception** et la **programmation** [Muller *et al.*, 00].

Analyse

L'analyse objet essaie de comprendre, d'expliquer et de représenter la nature du système. Elle identifie le « quoi faire », c'est-à-dire les besoins des utilisateurs. L'analyse se poursuit par l'identification des objets et des classes du système, et par la représentation des interactions entre ces objets. Un objet représente une entité du monde réel qui se caractérise par une **identité**, un **état**

et un **comportement**. L'identité d'un objet est la propriété qui permet de le distinguer par rapport aux autres objets. Son état correspond aux valeurs de tous ses attributs à un instant donné. Son comportement est défini par l'ensemble des opérations qu'il peut exécuter en réaction aux messages en provenance d'autres objets.

Conception

Lors du passage à la conception, les modèles produits lors de la phase d'analyse sont enrichis pour décrire le « comment faire », c'est-à-dire que l'on va rendre possible les désirs de l'utilisateur exprimés dans le « quoi faire » en prenant en compte le domaine d'application et les contraintes de réalisation. La conception consiste à définir l'architecture logicielle, c'est-à-dire les éléments qui constituent le noyau, la base du développement définissant la forme générale de l'application. L'analyse et la conception se chevauchent puisque les diagrammes petit à petit ne représentent plus les objets du domaine mais reflètent le « comment faire ».

Programmation

La programmation en langage objet constitue le dernier maillon de la chaîne et reste le moyen le plus efficace pour traduire en langage informatique le travail de conception.

UML permet la description d'un système à l'aide de neuf diagrammes :

Les diagrammes de cas d'utilisation pour décrire les fonctions du système du point de vue de l'utilisateur. Cette étape permet de comprendre, d'expliquer et de représenter les besoins des utilisateurs ;

Les diagrammes d'interaction modélisent un comportement dynamique entre objets qui se traduit par l'envoi de messages entre objets. Nous utiliserons deux catégories de diagrammes d'interactions :

Les diagrammes de collaboration car ils représenteront de façon spatiale les rôles joués par les objets et les interactions entre ces objets via l'envoi de messages ;

Les diagrammes de séquence insisteront sur une interaction entre objet via la chronologie des échanges de message ;

Les diagrammes d'état transition montrent les différents états des objets et leurs réactions par rapport aux événements ;

Les diagrammes d'activités donnent un enchaînement des activités propres à un cas d'utilisation ;

Les diagrammes de déploiement décrivent l'architecture technique du système ;

Les diagrammes de composants représentent les composants logiciels du système et leurs dépendances dans l'environnement de réalisation (ils ne sont utilisés que pour des systèmes complexes) ;

Le diagramme d'objets représente les instances des classes, c'est-à-dire une situation concrète à un instant donné ;

Le diagramme de classes représente la structure statique du système sous forme de classes et de relations entre classes. Il constitue la partie pivot de la modélisation.

UML est un langage de modélisation et ne propose pas de méthode de modélisation. Nous sommes libres de choisir les diagrammes que nous allons utiliser. Il est vrai que le choix des diagrammes dépend en réalité du type de l'application à modéliser et de nos habitudes de développement. Notre objectif dans l'utilisation de ce langage est de produire le diagramme des classes destiné à être le modèle de notre Système Interactif d'Aide à la Décision. Ce diagramme se présente sous la forme d'un ensemble de classes. Une classe est l'abstraction d'un ensemble d'objets et représente leur structure (les attributs), leur comportement (liste d'opérations) et leurs relations avec les autres classes.

Les utilisateurs de SINERGIE sont confrontés à une masse conséquente d'informations, c'est pourquoi nous nous proposons de produire les diagrammes de cas d'utilisation afin de structurer les besoins des utilisateurs et d'exprimer ce que chaque acteur attend du système. Nous allons nous

servir de ces diagrammes comme fil conducteur tout au long de la modélisation. Les cas d'utilisation restent une description fonctionnelle des besoins : la première étape consiste à établir la liste des acteurs et décrire précisément leur rôle, la seconde consiste à représenter les interactions entre les acteurs et le système.

Le passage à la modélisation objet doit se faire en spécifiant chaque cas d'utilisation de façon à mettre en évidence les objets. Le comportement d'un cas d'utilisation peut se détailler en précisant pour chaque acteur les séquences d'interaction entre cet acteur et le système : c'est la description d'un scénario. Un scénario correspond donc à un ensemble d'échanges de messages entre les objets. Pour représenter ces scénarios, nous nous proposons d'utiliser les diagrammes d'interaction. Les diagrammes de collaboration décrivent quels objets interagissent en précisant les échanges de messages. Cependant, nous n'avons pas d'informations temporelles quant aux échanges de messages. Aussi, proposons-nous de compléter ces derniers par les diagrammes de séquence, lesquels décrivent la structure de la communication. Ces deux types de diagrammes sont complémentaires. Les collaborations insistent plus particulièrement sur les liens entre les objets de façon spatiale. Les séquences ne le permettent pas, mais apportent en revanche la notion de chronologie dans les échanges de messages.

II.4.1 Les acteurs

Les acteurs du système sont :

Le District enregistre les entretiens courants, les anomalies détectées sur le réseau. Ce sont les entités opérationnelles du terrain, les Districts sont donc également amenés à faire des propositions de travaux. Ils consultent toutes les informations concernant les bilans de santé et les opérations en cours pour tous les domaines métiers sur leur district ;

Le Conducteur d'Opération (COP) est responsable de la gestion et de la maintenance de l'ensemble des éléments de patrimoine de son domaine métier. Il enregistre les bilans de santé (dans le cas des chaussées où l'outil de gestion des chaussées doit être intégré à SINERGIE), évalue les opérations en urgence et propose un programme pluriannuel financier pour la réalisation des travaux au chef de service SVS. Il s'appuie sur les bilans de santé, les anomalies, les entretiens courants, les demandes des Districts pour évaluer l'urgence d'une opération ;

Le chef de service SVS s'appuie sur les évaluations en urgence des Conducteurs d'Opérations pour évaluer les opérations en priorité d'intervention. Il enregistre les budgets annuels dont il dispose pour chaque domaine et adapte les propositions des COP en conséquence. Il a accès à toutes les données enregistrées dans le système, des bilans de santé aux propositions de planification ;

Le Directeur de l'Exploitation DEX valide les propositions du chef de service SVS et a accès à toutes les données dans les mêmes conditions que le chef de service ;

L'Administrateur du système gère la base de données, il est en charge d'enregistrer les données à mettre à jour annuellement (données trafic et zones d'accumulation d'accidents), gère les utilisateurs, et rajoute la définition d'un nouveau domaine métier SVS.

Accès aux données

Les acteurs n'ont pas tous les mêmes droits d'accès aux données.

Chaque District dispose d'un accès total aux données qu'il a enregistrées sur le patrimoine infrastructure dont il a la charge d'exploitation. En revanche, un District ne peut pas avoir accès aux mêmes informations précitées sur un autre district.

Chaque COP dispose d'un accès total à toutes les données relatives aux évaluations des Urgences pour les opérations dont il est en charge. Il a également accès aux données de tous les Districts uniquement pour son domaine d'intervention SVS. En effet, le COP doit avoir une vision globale du réseau concernant son métier. Un COP ne peut avoir accès aux données d'un autre COP, ni à celles des Districts relevant d'un autre domaine SVS que le sien.

Le chef de service SVS et le Directeur de l'Exploitation disposent d'un accès total à toutes les données du Système d'Information afin d'avoir une vision globale du patrimoine infrastructure.

Tous les intervenants à tous les niveaux fonctionnels ont accès aux résultats des évaluations en priorité d'intervention des opérations les concernant ainsi qu'à la proposition de planning pluriannuel qui en découle. Les seules personnes habilitées à modifier le planning sont le chef de service SVS et le Directeur de l'Exploitation.

II.4.2 De la description des fonctions du système au modèle objet

Reprenons les cinq grandes fonctions décrites au début de cette section : **administration**, **enregistrement / consultation**, **évaluation**, **analyse** et **aide à la planification**. Elles vont être décrites dans les diagrammes de cas d'utilisation qui vont suivre. Ces derniers vont également nous permettre de structurer les besoins et de procéder à l'analyse du « qui fait quoi ». Le diagramme des cas d'utilisation général à la Figure 19 représente tous les acteurs de la décision au sein du service SVS ainsi que les grandes fonctions du système.

L'administrateur du système a une fonction globale de gestion du système d'information qui est déconnectée des autres fonctions. En effet, il est le garant de son bon fonctionnement, ce dont dépendent toutes les autres fonctions. Les fonctions d'enregistrement / consultation sont celles où l'on manipule les données liées à la description de l'état du patrimoine et de son environnement : d'une part les fonctions d'*enregistrement des mesures*, regroupant les bilans de santé, les entretiens courant et les anomalies, ainsi que l'*enregistrement des travaux* ; d'autre part, la fonction *surveiller le patrimoine* comprend les fonctions de consultations correspondantes. C'est sur l'analyse de ces données (les mesures enregistrées via la fonction précédente) que le Conducteur d'Opération crée une opération d'entretien, d'amélioration ou de mise à niveau. Les fonctions d'évaluation comprennent donc la *création d'une opération* et un ensemble de fonctions en permettant ensuite le traitement (*évaluer les opérations* : évaluation en urgence par le COP responsable, puis évaluation en priorité par le chef de service SVS). Ensuite, le Conducteur d'Opération responsable de l'opération, le chef de service et le DEX ont la possibilité d'utiliser les fonctions d'analyse et de *justification des évaluations*. Enfin, le chef de service et le DEX doivent planifier ces opérations évaluées.

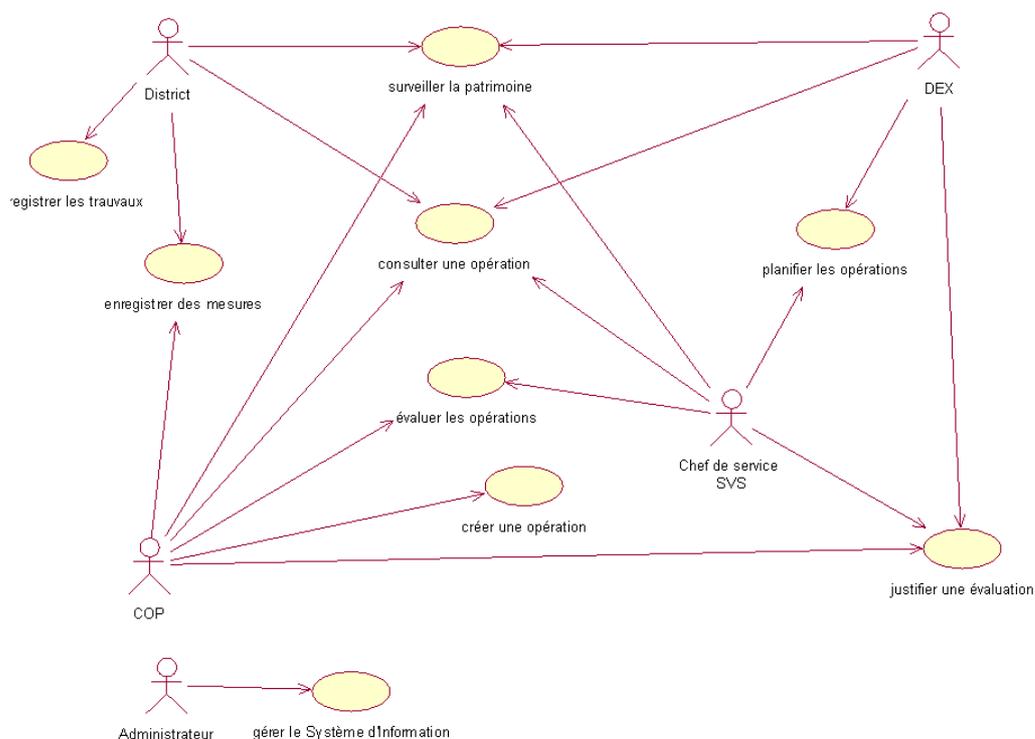


Figure 19 : le diagramme général des cas d'utilisation

Nous allons maintenant détailler dans les sous-sections suivantes les cas d'utilisation de la Figure 19 que nous venons de voir dans des sous diagrammes de cas d'utilisation.

II.4.2.1 Surveiller le patrimoine

La surveillance du patrimoine se fait via la consultation des données relatives à l'état de l'infrastructure lorsque les bilans de santé sont disponibles. Les anomalies détectées constituent un élément important car elles peuvent être une indication de la présence d'un symptôme d'une pathologie (cf. Figure 25). De plus, via un historique, cela permet de voir si une anomalie se reproduit de façon récurrente sur un EP. La réalisation des entretiens courant (cf. Figure 26) permet d'entretenir les ouvrages et constitue un traitement préventif. Toutes ces fonctions relatives à la surveillance sont représentées dans le diagramme de cas d'utilisation Figure 20.

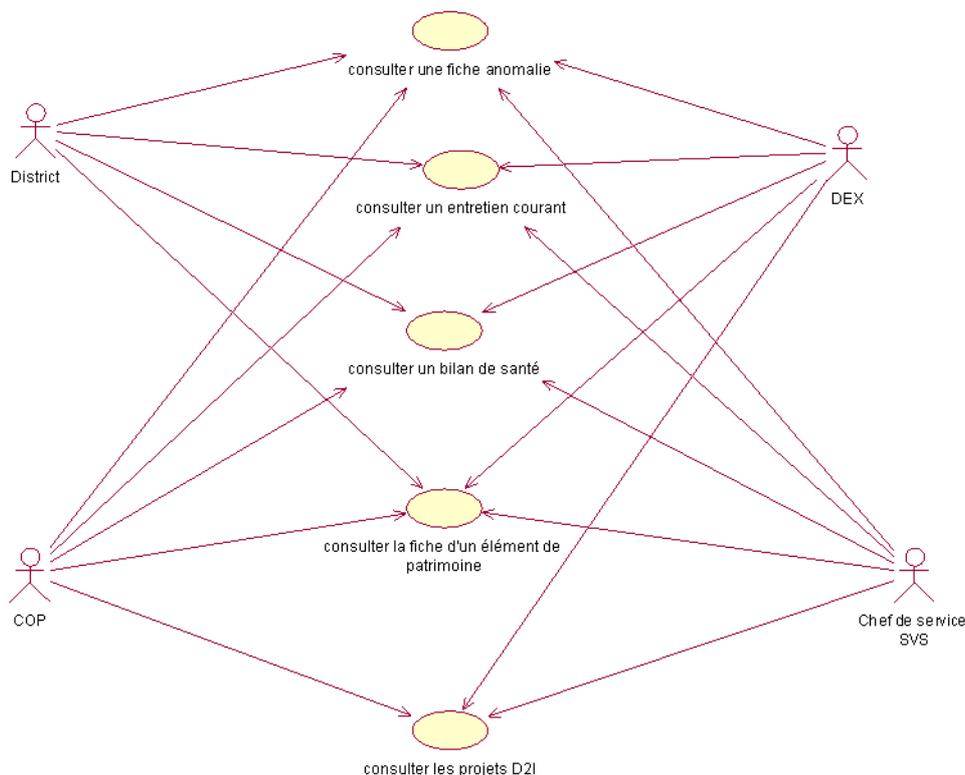


Figure 20 : la fonction de surveillance du patrimoine

Les données des consultations sont liées à un élément de patrimoine. Chaque utilisateur peut consulter la fiche identité d'un élément de patrimoine. Il s'agit de fonctions de consultations, dont les droits d'accès aux informations sont précisés en II.4.1. La Figure 21 détaille l'enchaînement des échanges avec le système pour pouvoir afficher les informations relatives à un élément de patrimoine. Le Conducteur d'Opération, pour consulter un élément de patrimoine, doit le sélectionner dans la liste des éléments de patrimoine dont il est responsable. Le nombre d'éléments de patrimoine étant important, le système propose au COP de les trier par District et lui renvoie la liste des Districts. Après avoir sélectionné un District, le système affiche la liste des éléments de patrimoine dépendant du COP correspondant. Le COP n'a plus qu'à sélectionner celui qui l'intéresse. La Figure 23 diffère légèrement de la sélection du COP Figure 21. En effet, par définition, il a accès uniquement aux éléments de patrimoine dépendant de son District, le système lui propose donc de trier les éléments de patrimoine par domaine métier.

Le diagramme de séquence Figure 21 est complété par une représentation spatiale en Figure 22. Les deux premières actions du COP sont respectivement de récupérer le domaine dont il est responsable

et de sélectionner un District. Ensuite, il demande la liste des éléments de patrimoine pour ce District et ce domaine métier pour sélectionner un élément de patrimoine. L'action numéro quatre correspond à la récupération des informations de l'élément de patrimoine choisi pour affichage. Les diagrammes de collaboration Figure 22 et

Figure 24 complètent les diagrammes de séquences Figure 21 et Figure 23 en montrant clairement que tout élément de patrimoine est défini pour un domaine métier et appartient à un seul District.

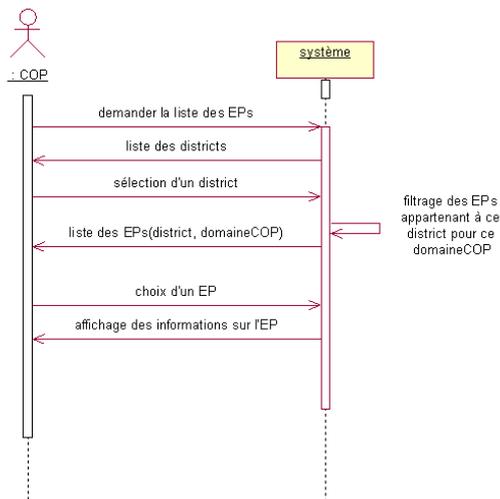


Figure 21 : diagramme de séquence consulter la fiche d'un EP (COP)

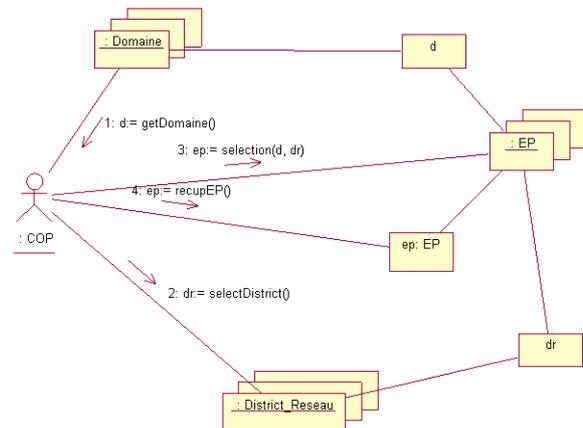


Figure 22 : diagramme de collaboration consulter la fiche d'un EP (COP)

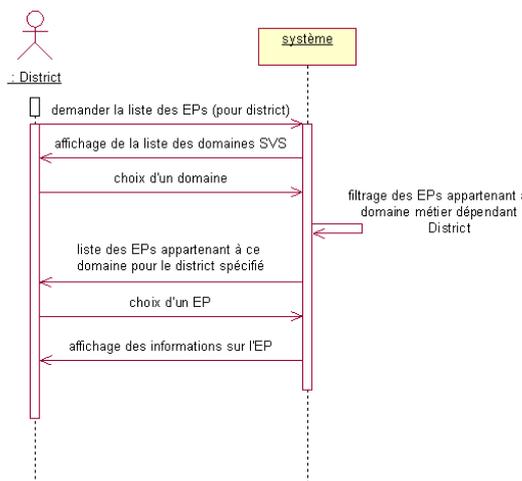


Figure 23 : diagramme de séquence consulter la fiche d'un EP (District)

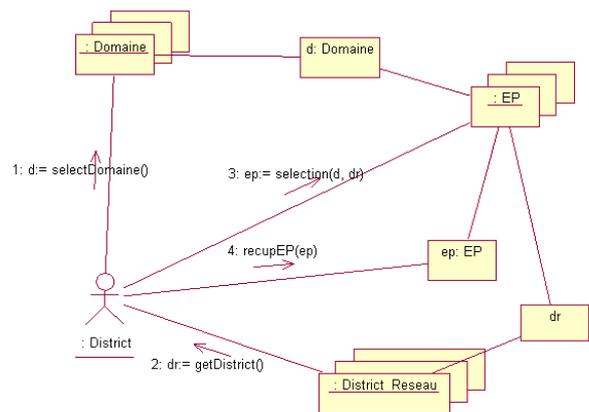


Figure 24 : diagramme de collaboration consulter la fiche d'un EP (District)

L'analyse est identique pour la consultation des anomalies et des entretiens courants. Une anomalie (respectivement un entretien courant) définit un défaut (respectivement un entretien) relativement à un élément de patrimoine. Les Figure 25 et Figure 26 représentent l'accès à une anomalie et un entretien courant pour un District. Comme pour la consultation d'un élément de patrimoine (

Figure 24), le District récupère la liste des anomalies et entretiens courants enregistrés pour son District pour le domaine métier qu'il a au préalable choisi. Ces deux diagrammes de collaboration ci-dessous mettent en évidence que la récupération d'une fiche anomalie ou entretien courant implique la récupération de l'élément de patrimoine concerné. Ainsi, nous venons d'introduire deux nouveaux objets, « Anomalie » et « Entretien Courant », ainsi que leurs liens utiles pour la construction de notre diagramme de classes.

Pour la suite de notre étude, nous ne détaillerons pas les diagrammes de collaboration et de séquence pour chaque cas d'utilisation. En effet, nous allons insister sur les diagrammes mettant en lumière un nouvel objet ou de nouveaux liens entre les objets dans l'objectif de construire le diagramme des classes.

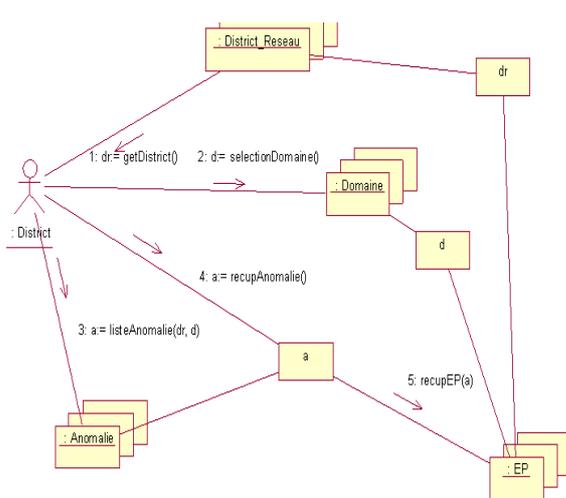


Figure 25 : consulter une fiche anomalie

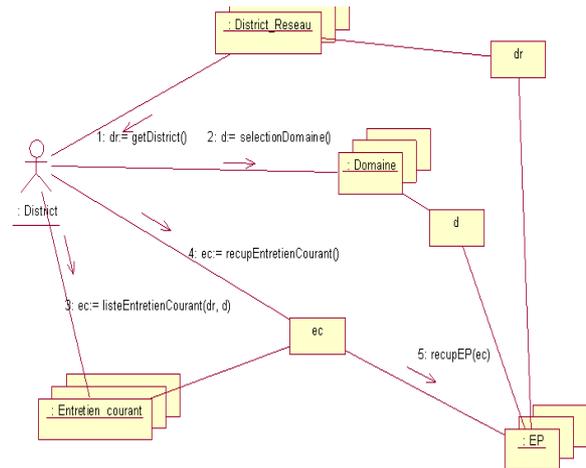


Figure 26 : consulter une fiche entretien courant

II.4.2.2 Enregistrer des mesures

Les enregistrements de mesures sur l'état de l'infrastructure sont détaillés Figure 27 et concernent l'insertion d'anomalies, d'entretiens courants ou de bilans de santé.

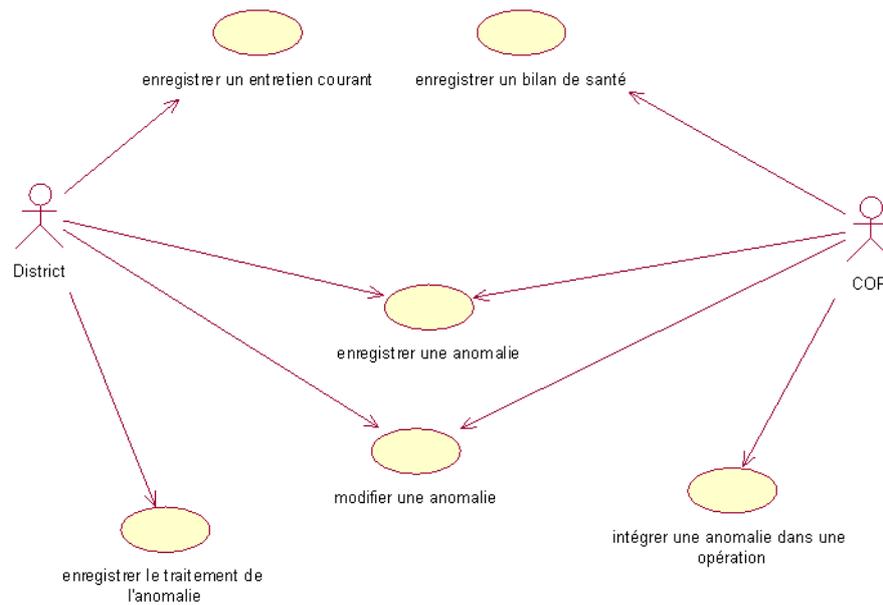


Figure 27 : enregistrer des mesures

Dans le cas où une pathologie est détectée par un District sur un élément de patrimoine, ce dernier enregistre une fiche anomalie. Le diagramme de séquence (cf. Figure 28) montre bien toutes les étapes précédant le remplissage de la fiche, notamment la sélection du domaine d'intervention, la sélection de l'élément de patrimoine concerné parmi ceux du domaine choisi. Le diagramme de collaboration de la Figure 29 met en évidence les échanges de messages entre l'acteur (i.e., le District) et les objets « Anomalie » et « EP » et confirme les liens entre ces objets vus à la Figure 25.

Une fois la fiche anomalie enregistrée, deux cas se présentent :

- soit le District traite l'anomalie directement et, dans ce cas, il enregistre le traitement effectué ;
- soit cette anomalie peut être traitée dans le cadre des travaux d'une opération programmée, le COP concerné devra l'intégrer dans une opération. Ainsi, pour savoir s'il existe une telle opération, il faut rechercher toutes les opérations dont la localisation PR contient celle de l'anomalie (cf. Figure 32).

Les Districts sont en charge de l'entretien courant sur le réseau (cf. Figure 30). L'entretien courant concerne toutes les opérations qui demandent peu de moyens et de technicité. Dans le cas des Ouvrages d'Art, l'entretien comprend des tâches de nettoyage des dispositifs d'évacuation des eaux, le nettoyage des joints de chaussées ou encore l'enlèvement de végétation. Les entretiens courants sont très importants. En effet, le défaut d'entretien peut être à l'origine de l'apparition de pathologies. Par exemple, le curage des gargouilles sur un Ouvrage d'Art permet d'éviter l'apparition de problèmes de drainage. Le diagramme de collaboration

Figure 31 est similaire à celui de l'enregistrement d'une anomalie Figure 29 car ils sont tous deux définis pour un élément de patrimoine.

Dans le cadre du suivi annuel des chaussées, des mesures caractérisant l'état de la chaussée sont effectuées (cf. Annexe 2) : la hauteur au sable, le coefficient de frottement transversal, l'orniérage, les fissures, etc. Ne disposant pas d'outil de gestion des chaussées, nous avons décidé de mettre en place une procédure d'intégration dans SINERGIE de ces mesures. La fonction « enregistrer un bilan de santé » (cf. Figure 33) concerne donc spécifiquement les chaussées. Un format de fichier présenté en Annexe 4 a été défini et nous avons demandé au CETE Méditerranée de nous fournir les données de mesures selon ce format. L'objectif est de pouvoir restituer à partir de ces données une vision globale des chaussées.

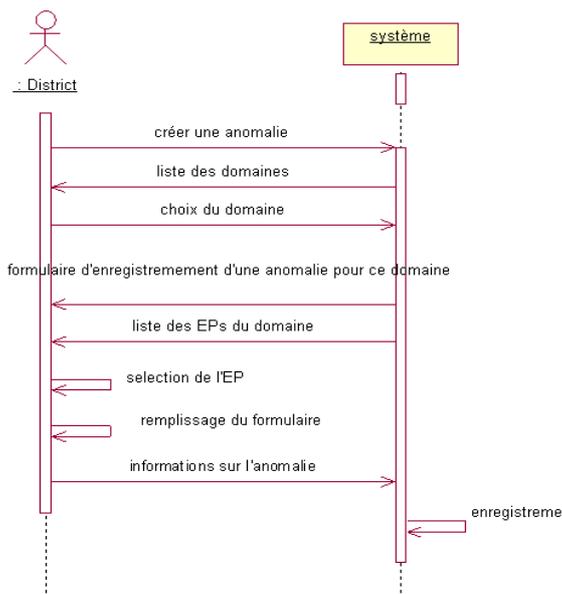


Figure 28 : enregistrer une anomalie (diagramme de séquence)

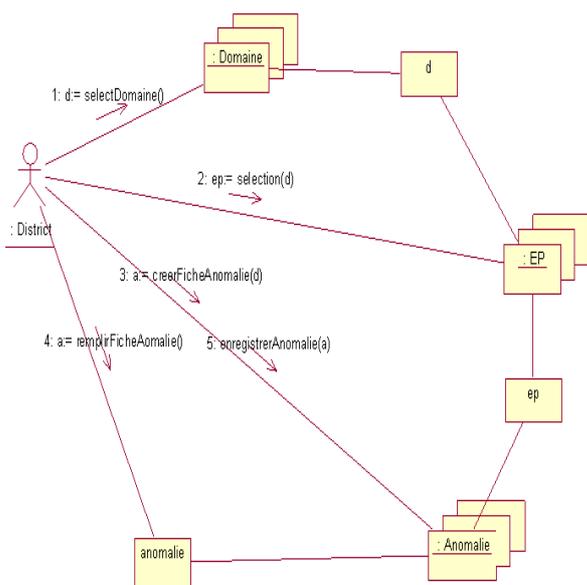


Figure 29 : enregistrer une anomalie (diagramme de collaboration)

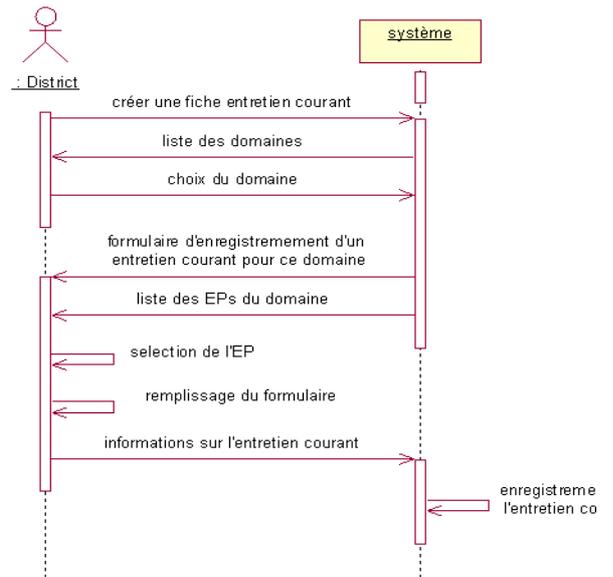


Figure 30 : enregistrer un entretien courant (diagramme de séquence)

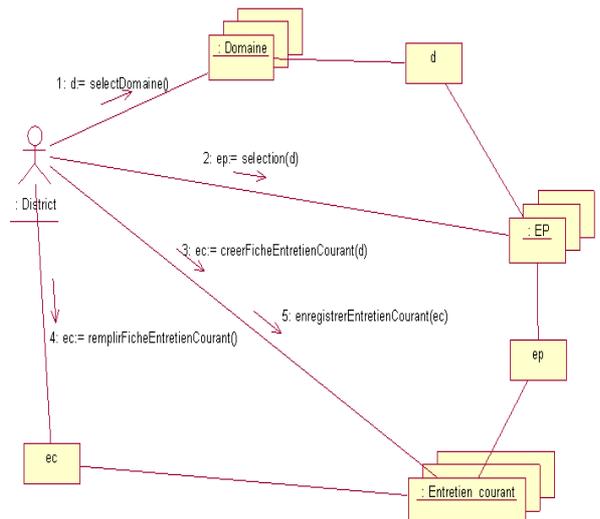


Figure 31 : enregistrer un entretien courant (diagramme de collaboration)

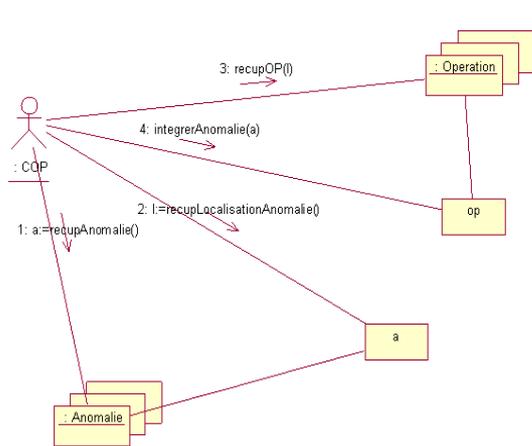


Figure 32 : intégrer une anomalie à une opération

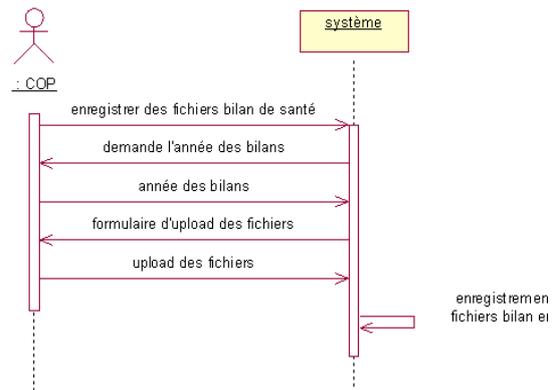


Figure 33 : enregistrer un bilan de santé

Si nous résumons notre étude à ce stade, parmi tous ces diagrammes, l'objet **EP** est un élément central. Il est défini pour un **Domaine** métier et appartient à un unique **District**. Les **Anomalies**, **Entretiens Courant** et **Bilans de santé** sont liés à un élément de patrimoine car ils fournissent des éléments d'information et d'état. Nous disposons ici des objets définissant notre réseau ainsi que ceux apportant les données consultables sur l'état des EP. Nous allons maintenant nous intéresser aux opérations qui vont être créées suite à la consultation de ces informations ainsi qu'à leur évaluation.

II.4.2.3 Créer une opération

Nous détaillons ici le cas d'utilisation « créer une opération » de la Figure 19. Une opération concerne un domaine métier et a donc un unique responsable : le Conducteur d'Opération (cf. Figure 34).

Définition d'une opération : c'est la description de travaux d'entretiens, d'amélioration ou de mise à niveau à réaliser sur un ou plusieurs éléments de patrimoine. Elle appartient à un domaine métier SVS.

Cette définition d'une opération est générale de façon à permettre à l'expert métier de rajouter des éléments de patrimoine à une opération. Considérons par exemple les deux opérations suivantes. La première résulte d'un diagnostic sur un ensemble de garde-corps pour lesquels une nouvelle norme impose un traitement pour ceux dont la hauteur et le barreaudage ne sont plus conformes. La seconde définit un traitement d'ornièrage de chaussée du PR_i au PR_{i+k} dû à l'importance du trafic poids lourd. La première concerne un ensemble d'éléments de patrimoine (garde-corps) tandis que la seconde traite de la section de chaussée entre le PR_i au PR_{i+k}. C'est la raison pour laquelle la création d'une opération (cf. Figure 35) n'est pas liée aux éléments de patrimoine.

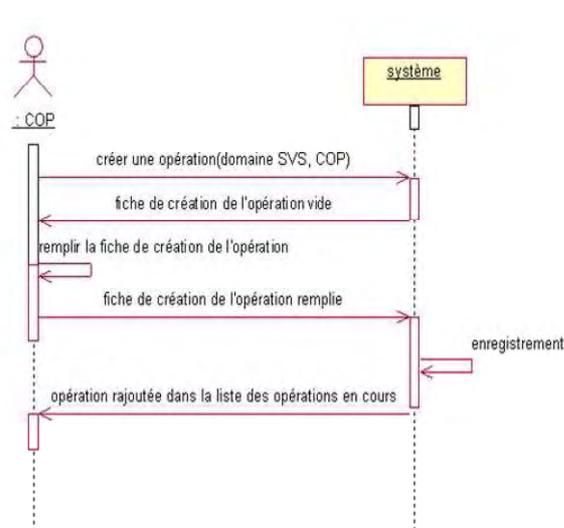


Figure 34 : création d'une opération
(diagramme de séquence)

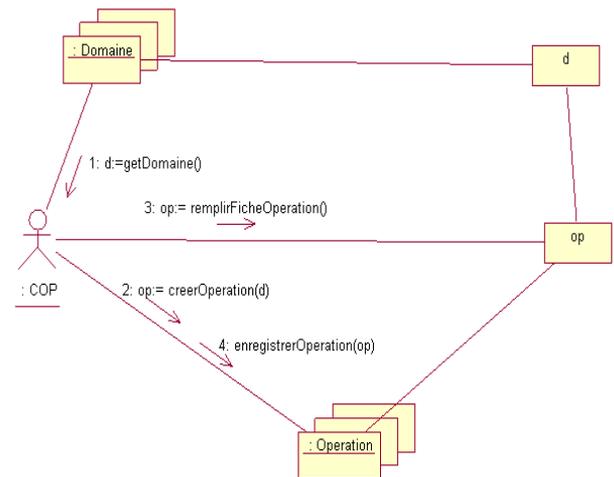


Figure 35 : création d'une opération
(diagramme de collaboration)

Les propriétés suivantes devront être exprimées dans notre diagramme des classes final :

- une opération concerne un ou plusieurs éléments de patrimoine ;
- un élément de patrimoine peut être concerné par une ou plusieurs opérations ;
- une opération appartient à un seul domaine métier SVS.

II.4.2.4 Évaluer une opération

Le cas d'utilisation « évaluer une opération » de la Figure 19 est le cœur du processus d'aide à la décision. Une fois que l'opération est créée, on peut procéder aux évaluations dont la décomposition correspond aux cas d'utilisation de la Figure 36. Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, une opération peut concerner un ou plusieurs éléments de patrimoine. Chaque élément de patrimoine est évalué en urgence d'intervention par le COP responsable, puis en priorité par le chef de service.

La méthode d'évaluation d'un élément de patrimoine que nous proposons repose sur une procédure d'analyse et d'agrégation multicritère qui sera présentée au chapitre suivant. Ainsi, l'évaluation d'un EP dans le cadre d'une opération correspond à l'association d'un score partiel selon chaque critère d'évaluation propre à l'un des agents du processus décisionnel et au calcul du score global via un opérateur d'agrégation qui, dans notre prototype actuel, est une moyenne pondérée comme nous le verrons dans le chapitre suivant. Nous introduisons pour ce faire la notion de **fiche d'évaluation**.

Définition d'une fiche d'évaluation : c'est l'évaluation d'un élément de patrimoine dans le cadre d'une opération. Elle associe à chaque critère d'évaluation un score et un commentaire. L'évaluation globale (ou score global) de la fiche est le score agrégé des scores selon chaque critère d'évaluation propre à un niveau fonctionnel. Par convention, cette valeur est un réel dans [0,1].

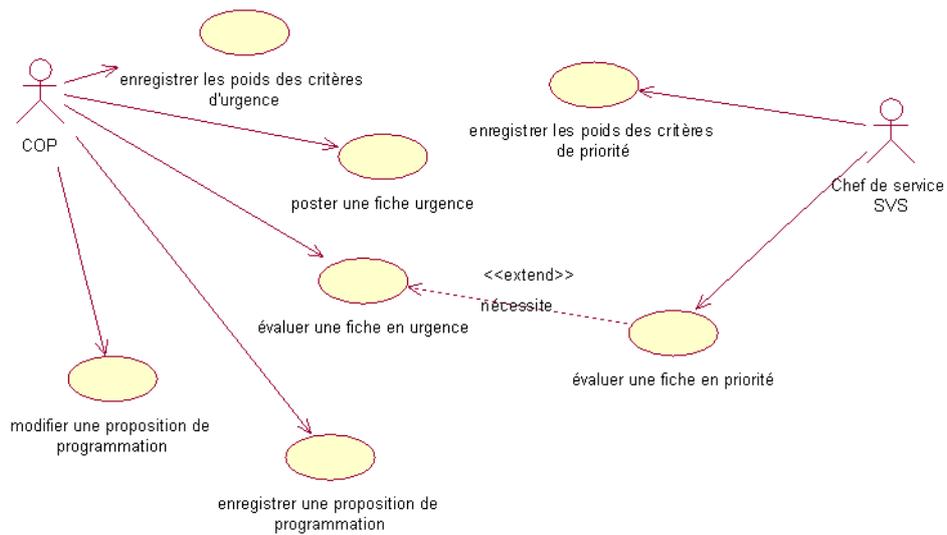


Figure 36 : évaluer une opération

De ce fait, pour chaque EP de l'opération, le COP doit remplir une fiche d'évaluation dont le score global est l'urgence d'intervention de cet EP dans le cadre de l'opération (cf. Figure 37).

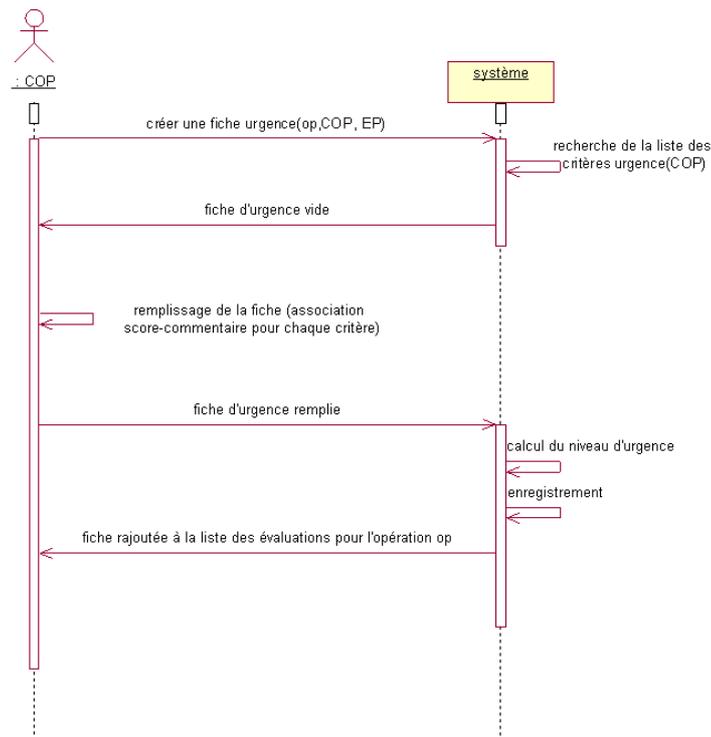


Figure 37 : évaluer une fiche en urgence

Pour que ces évaluations soient possibles, il faut au préalable paramétrer notre opérateur d'agrégation, i.e. la moyenne pondérée dans la version actuelle de SINERGIE : cela implique l'enregistrement des poids pour chaque critère d'évaluation en urgence (cf. Figure 38), et en priorité. Nous reviendrons dans le chapitre suivant sur la méthode d'identification des paramètres nécessaires à la procédure d'agrégation.

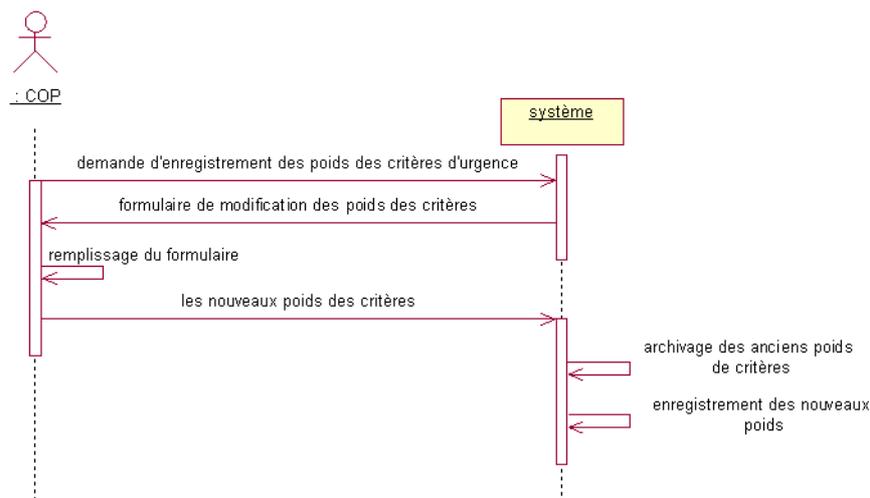


Figure 38 : enregistrer les poids des critères d'urgence

Une fois le niveau d'urgence calculé (score global), le COP peut proposer une programmation à un niveau macro des travaux : proposer une programmation pluriannuelle de la réalisation des travaux et une valorisation annuelle par type d'imputation budgétaire (cf. Figure 39). Le COP a la possibilité de modifier ses propositions tant qu'il n'a pas **posté** sa fiche pour validation par le chef de service SVS (cf. Figure 40).

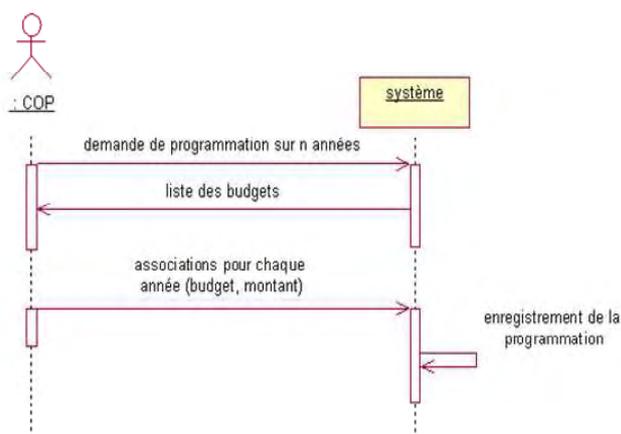


Figure 39 : enregistrer une programmation de planification

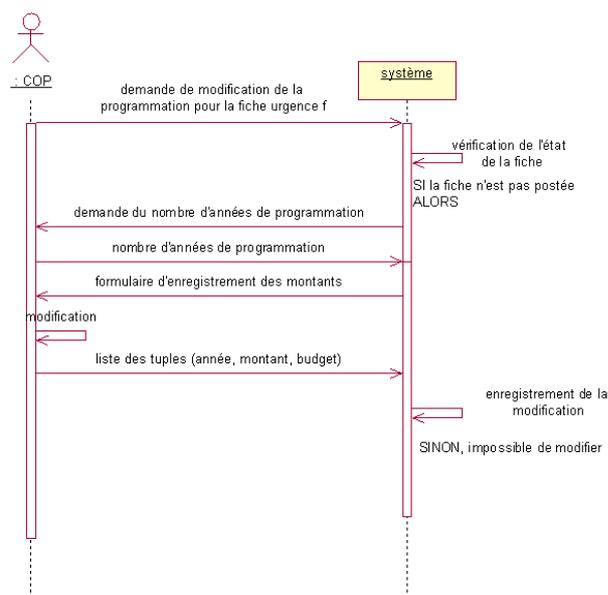


Figure 40 : modification d'une programmation de planification

Les fiches évaluées en urgence d'intervention sont ensuite soumises à validation par le chef de service SVS. Une fois que le COP a terminé ses évaluations et qu'il ne souhaite plus les modifier, il les transmet au chef de service SVS pour évaluation en priorité d'intervention : c'est l'action de **poster une fiche d'évaluation**.

L'évaluation en priorité se fait alors en associant un score partiel à chaque critère de priorité (i.e. relatif au chef de service SVS) pour calculer le score global agrégé de priorité (cf. Figure 41).

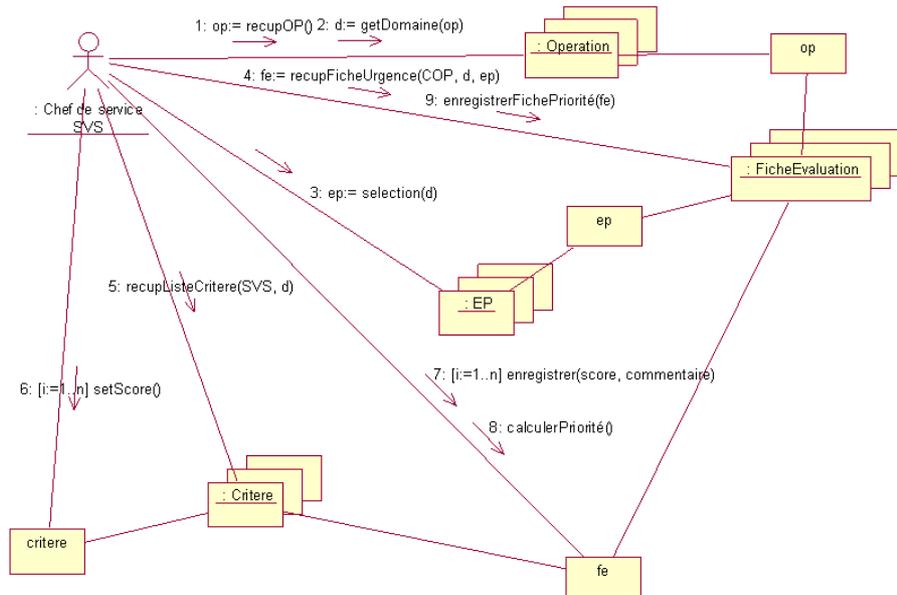


Figure 41 : évaluer une fiche en priorité

II.4.2.5 Consulter une opération

Pour consulter une opération, le COP récupère d'abord la liste des opérations en cours pour son domaine, le District celle des opérations tout domaine confondu concernant son District. Le chef de service SVS récupère la liste intégrale de toutes les opérations en cours. Après avoir sélectionné une opération, le système récupère la liste des fiches d'évaluation qui y sont rattachées ainsi que les propositions de planification de travaux enregistrées par le COP pour chaque fiche (cf. Figure 42).

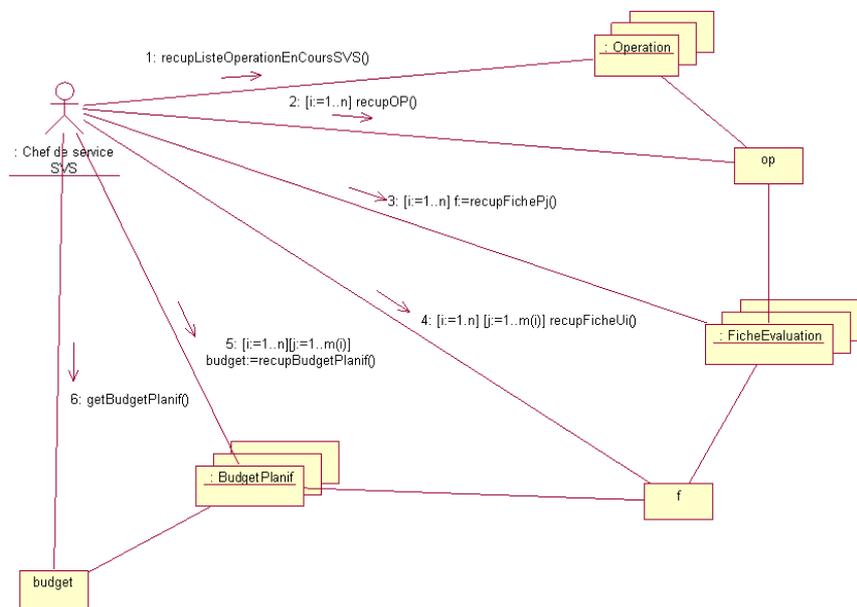


Figure 42 : récupérer la liste des opérations en cours (pour le chef de service SVS)

II.4.2.6 Justifier une évaluation

Justifier l'attribution d'un niveau d'urgence ou de priorité signifie, comme nous le verrons sous un angle plus mathématique dans le chapitre suivant, identifier les critères qui ont été déterminants dans l'attribution de ce score—i.e., ceux qui ont eu l'influence la plus significative lors de l'évaluation. Cette fonction permet à l'utilisateur de connaître la contribution de chaque critère dans le calcul de la note globale attachée à une fiche d'évaluation. L'auteur de la fiche a accès à la justification de son évaluation (cf. Figure 44). Ainsi, par exemple, le chef de service SVS et le DEX peuvent avoir recours à cette fonction pour comprendre quels critères ont prioritairement conduit le COP à attribuer tel ou tel score lors d'une évaluation (cf. Figure 43).

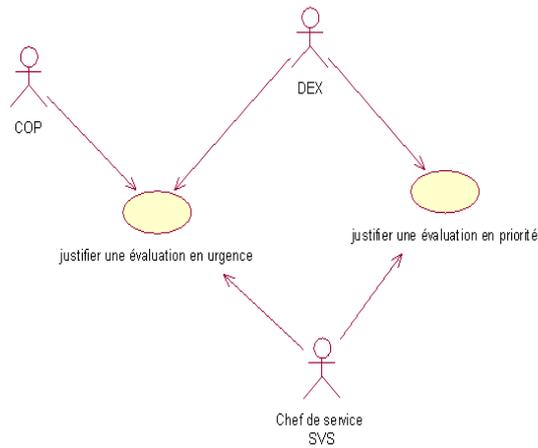


Figure 43 : justifier une évaluation

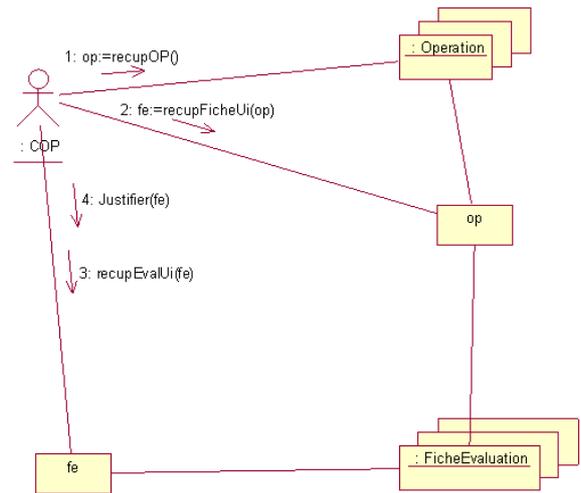


Figure 44 : justifier une évaluation en urgence

II.4.2.7 Planifier les opérations

Par délégation du Directeur d'Exploitation, le chef de service SVS définit et propose la politique d'entretien, de suivi et de réparation du patrimoine. Il suit l'évolution des différents ouvrages et propose des programmes d'entretien pluriannuels à l'approbation de la Direction d'Exploitation (cf. Figure 45). Il contrôle les dépenses correspondant à ces programmes, et peut ainsi modifier les propositions de planification faites par les COP lors de leurs évaluations en urgence. Il les transmet ensuite pour validation au Directeur d'Exploitation (cf. Figure 46 et Figure 47).

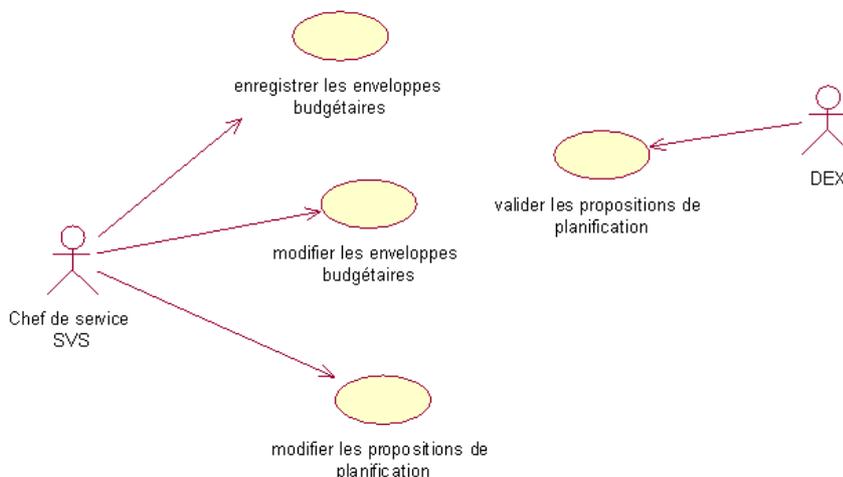


Figure 45 : planifier les opérations

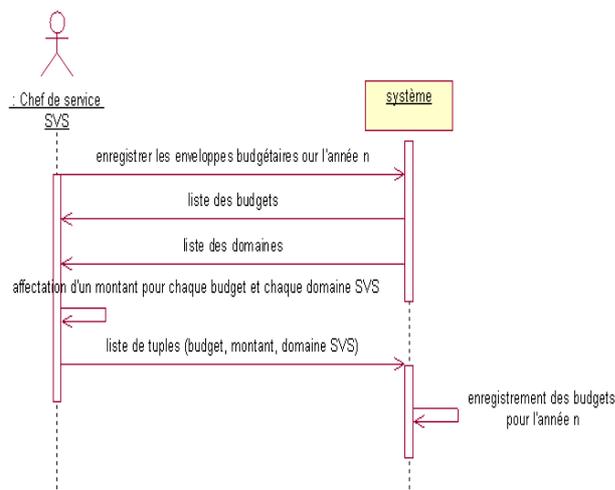


Figure 46 : enregistrer les enveloppes budgétaires

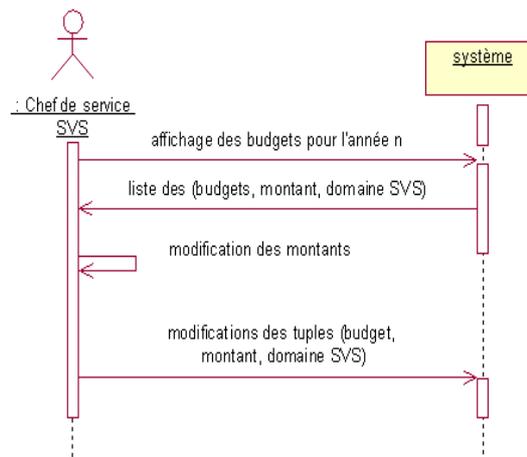


Figure 47 : modifier les propositions de planification

II.4.2.8 Gérer le système d'information

L'administrateur est le garant de la disponibilité et de la fiabilité des données. En effet, il a en charge non seulement la gestion des utilisateurs, mais il assure la gestion et la mise à jour des données trafic, zones d'accumulation d'accidents qui sont récupérées via d'autres services d'ESCOTA (cf. Figure 48).

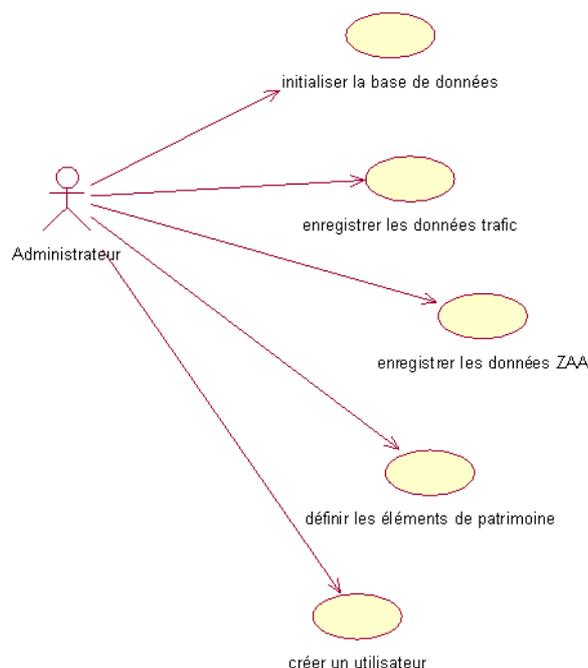


Figure 48 : gérer le système d'information

Les formats de fichiers des données de zones d'accumulations d'accidents et de trafic sont définis en interne à ESCOTA, une procédure de décodage de ces fichiers et d'insertion dans la base de données doit également être fournie. La procédure pour les données trafic est décrite Figure 49. La Figure 50 met en évidence qu'une donnée zaa est définie pour une localisation (i.e., elle est rattachée au réseau, sans distinction d'éléments de patrimoine).

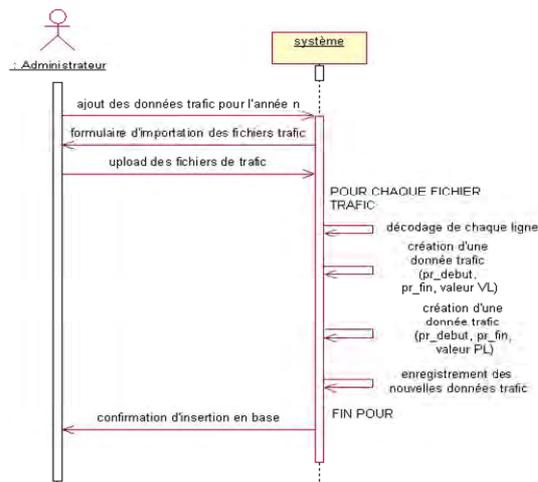


Figure 49 : insertion des données trafic

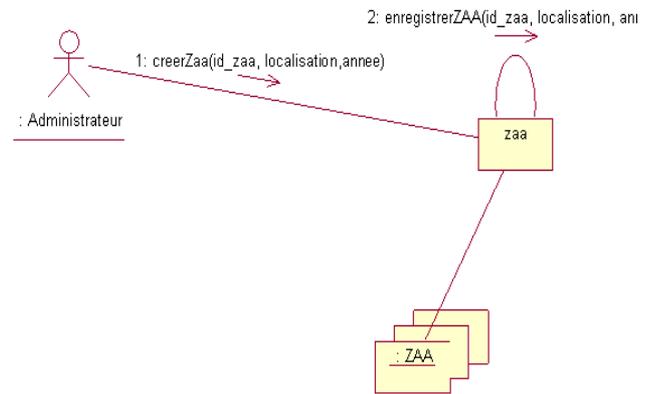


Figure 50 : insertion des données zaa

II.4.3 Modèle UML de SINERGIE (diagramme des classes)

Le diagramme des classes constitue un pivot essentiel dans la modélisation du système car il en donne une représentation statique. Cette représentation se base sur le concept de classe et d'association.

Le système que nous devons modéliser se compose de nombreux objets complexes en interaction. L'objectif du diagramme des classes est de regrouper les objets qui se ressemblent dans des structures de plus haut niveau d'abstraction : les classes.

Une classe décrit un groupe d'objet ayant les mêmes propriétés (attributs) et un même comportement (opérations). Une instance de cette classe est un objet défini par les attributs de la classe et dont le comportement est décrit par les opérations.

Ensuite, les liens qui lient les objets peuvent être représentés de manière abstraite dans le diagramme des classes. Pour chaque famille de liens entre les objets de deux classes correspond une **relation** entre les deux classes de ces deux objets.

On distingue 4 grands types de relations :

- **L'association** : elle représente le lien qui existe entre les instances de ces deux classes. Par exemple une association entre la classe « Autoroute » et « EP » permet d'associer chaque EP instance de la classe « EP » à une autoroute instance de la classe « Autoroute » ;
- **L'agrégation** : association permettant de représenter le lien de type « ensemble », c'est un lien structurel entre une classe et une ou plusieurs autres classes ;
- **La composition** est une relation d'agrégation dans laquelle il existe une contrainte de durée de vie entre les deux classes, où la suppression de la classe « composant » entraîne la suppression de la ou les classes « composé » ;
- **La généralisation** où on factorise les éléments communs aux classes « filles » pour les regrouper dans un classe « mère ». Chaque classe « fille » hérite donc des propriétés de la classe « mère » : c'est le principe de l'héritage où la superclasse est une abstraction de ses sous-classes.

L'analyse des diagrammes précédents va nous permettre maintenant d'établir la liste des classes. En effet, les diagrammes de collaboration ont fait apparaître les classes utiles à l'application. Les diagrammes de séquence proposent, quant à eux, la définition de chaque classe.

Cette analyse fait apparaître 4 catégories :

Notons que nous avons considéré les domaines d'intervention définis à ce jour au sein du service SVS. L'avantage du modèle objet obtenu est qu'il est extensible à d'autres domaines d'intervention que ceux envisagés pour l'instant.

Le modèle du SI n'est pas directement déductible de celui du SIAD. Il y a un travail d'adaptation à faire (on peut également utiliser des outils pour le générer). Plutôt que de baser notre SI sur un modèle déduit d'un autre, nous avons choisi d'utiliser la méthode Merise pour obtenir le modèle du Système d'Information.

II.5 Modélisation du Système d'Information

Merise est non seulement une méthode de conception de Système d'Information, mais propose également une démarche méthodologique de modélisation (cf. Figure 52). Cette méthode est basée sur la séparation des données et des traitements à effectuer en plusieurs modèles conceptuels et physiques, ce qui assure une longévité au modèle (car les données n'ont pas à être souvent remaniées ce qui n'est pas le cas des traitements). Le Système d'Information est décrit suivant différents niveaux d'abstraction allant de l'abstrait vers le concret. On peut regrouper ces niveaux en deux ensembles :

- Les niveaux décrivant les préoccupations des utilisateurs :
 - **le niveau conceptuel** : il s'agit de décrire « qui fait quoi » en faisant abstraction des contraintes de l'organisation ;
 - **le niveau organisationnel** : représente l'ensemble des données en fonction des différents sites de l'organisation ;
- les niveaux prenant en compte la technologie informatique retenue.

Les niveaux prenant en compte la technologie informatique retenue.

Le formalisme de Merise permet de décrire de façon précise les données. Il est normalisé ISO sous le nom « **Entité Relation** ».

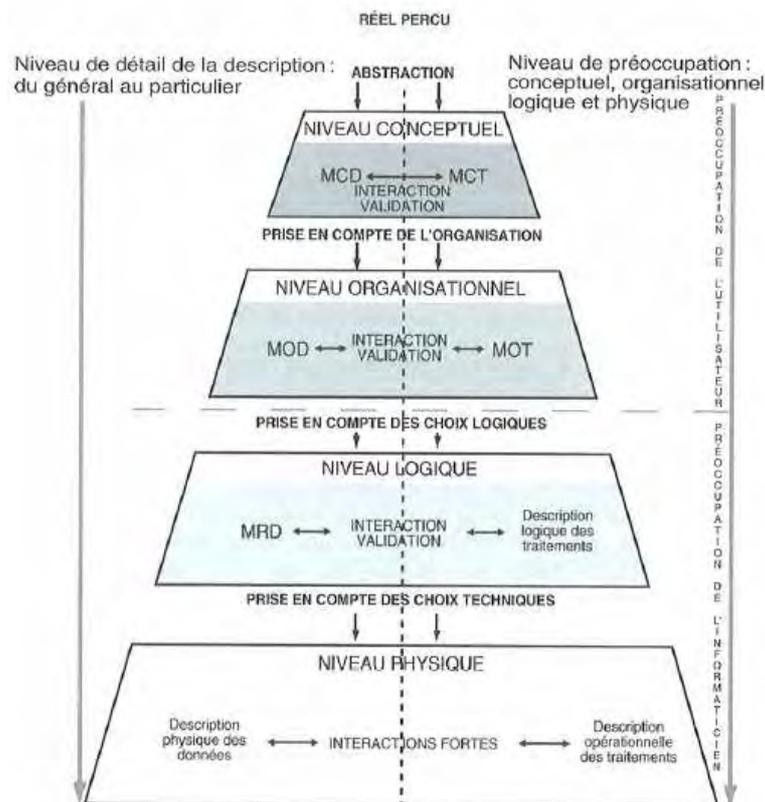


Figure 52 : les différents niveaux d'analyse de la méthode Merise [Gabay, 05]

Nous allons nous intéresser au premier ensemble, notamment au niveau conceptuel de représentation : **le Modèle Conceptuel des Données (MCD)**.

Le modèle conceptuel des données (**MCD**) a pour but d'écrire de façon formelle les données qui seront utilisées par le système d'information. Il s'agit donc d'une représentation des données, facilement compréhensible, permettant de décrire le système d'information à l'aide d'entités.

Une entité est la représentation d'un élément matériel ou immatériel ayant un rôle dans le système que l'on désire décrire.

On appelle **classe d'entité** un ensemble composé d'entités de même type, c'est-à-dire dont la définition est la même. Le classement des entités au sein d'une classe s'appelle *classification* (ou *abstraction*). Une entité est une *instanciation* de la classe. Chaque entité est composée de propriétés, données élémentaires permettant de la décrire.

Prenons par exemple une *Ford Fiesta*, une *Renault Laguna* et une *Peugeot 306*. Il s'agit de 3 entités faisant partie d'une classe d'entité que l'on pourrait appeler *voiture*. La *Ford Fiesta* est donc une instanciation de la classe *voiture*. Chaque entité peut posséder les propriétés *couleur*, *année* et *modèle*.

Les classes d'entités sont représentées par un rectangle. Ce rectangle est séparé en deux champs :

- le champ du haut contient le **libellé**. Ce libellé est généralement une abréviation pour une raison de simplification d'écriture. Il s'agit par contre de vérifier qu'à chaque classe d'entité correspond un et un seul libellé, et réciproquement ;
- le champ du bas contient **la liste des propriétés** de la classe d'entité.

Les cardinalités permettent de caractériser le lien qui existe entre une entité et la relation à laquelle elle est reliée. La cardinalité d'une relation est composée d'un couple comportant une borne maximale et une borne minimale, intervalle dans lequel la cardinalité d'une entité peut prendre sa valeur :

- la borne minimale (généralement 0 ou 1) décrit le nombre minimum de fois qu'une entité peut participer à une relation ;
- la borne maximale (généralement 1 ou n) décrit le nombre maximum de fois qu'une entité peut participer à une relation.

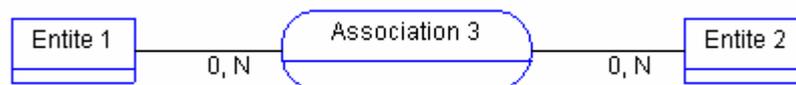


Figure 53 : exemple de relation entre 2 entités

Pour la construction du MCD du Système d'Information de SINERGIE, nous avons suivi une procédure en 4 étapes :

- **Inventaire des données** (cf. Tableau 3) et **contraintes** ;
- **Détermination des propriétés** : les données précédentes sont décomposées en données élémentaires qui sont les propriétés (cf. Tableau 4) ;
- **Détermination des entités** : regroupement des propriétés en objets ayant une cohérence interne ;
- Détermination des **relations** entre les entités en prenant en compte les contraintes.

II.5.1.1 Inventaires des données

Il s'agit de faire la liste exhaustive des éléments (ou attributs) qui sont utiles au fonctionnement de l'application. Pour chaque attribut, il s'agit de donner :

- son nom et une définition ;
- son type : élémentaire ou calculé ;

- les contraintes ou règles de calculs associés.

Voici ci-dessous une extraction du dictionnaire des données obtenues dans le Tableau 3.

nom	définition	type	contrainte ou règle de calcul
nomEP	nom de l'élément de patrimoine	élémentaire	
PR_debut_EP	PR de début de l'EP	élémentaire	
PR_fin_EP	PR de fin de l'EP	élémentaire	
PR_deb_localisation	PR de début de l'autoroute	élémentaire	
PR_fin_localisation	PR de fin de l'autoroute	élémentaire	
autoroute	nom de l'autoroute	élémentaire	
sens	sens de l'autoroute	élémentaire	$\in \{1,2\}$
nb_voies	nombre de voies correspondant de l'autoroute	élémentaire	entier > 0
nom_district	nom du district	élémentaire	
pr_district	pr de localisation du district	élémentaire	
autoroute_loc	autoroute sur laquelle se trouve la bastiment du district	élémentaire	
login_user_district	nom de connexion d'un utilisateur district	élémentaire	
passwd_user_district	mot de passe d'un utilisateur district	élémentaire	
nom_user_district	nom de l'utilisateur district	élémentaire	
prenom_user_district	prénom de l'utilisateur district	élémentaire	
dex	nom du directeur du réseau	élémentaire	
date_db_dex	date de prise de fonction du directeur	élémentaire	
date_fin_dex	date de fin d'exercice du directeur	élémentaire	
login_dex	nom de connexion du dex	élémentaire	
passwd_dex	mot de passe du dex	élémentaire	
id_svs	identifiant du chef de service svs	élémentaire	
chef_svs	nom et prénom du chef de service	élémentaire	
date_db_svs	date de début d'exercice du chef de service	élémentaire	
date_fin_svs	date de fin d'exercice du chef de service	élémentaire	
login_svs	nom de connexion du chef de service svs	élémentaire	
passwd_svs	mot de passe du chef de service svs	élémentaire	
id_env	identifiant de l'environnement	élémentaire	
zone_urbaine	type de zone urbaine	élémentaire	
zone_sismique	type de zone sismique	élémentaire	
topographie	type de topographie	élémentaire	

Tableau 3 : une partie du dictionnaire des données

II.5.1.2 Les règles de gestion

Il s'agit d'exprimer l'ensemble des contraintes et des règles que les données doivent respecter. Les règles de gestion pour notre Système d'Information sont énumérées au Tableau 4.

désignation	description de la règle	traitement
RG1	une opération concerne 1 ou plusieurs EP	mod
RG2	un EP appartient à un seul domaine SVS	mod
RG3	1 COP peut être responsable de plusieurs domaines	mod
RG4	SVS se compose d'au moins 1 domaine	mod
RG5	le planning est calculé en fonction des règles de dépenses et des budgets sur trois ans	mod
RG6	le chef de service SVS évalue au moins une fiche priorité pour une opération en urgence Ui, i=1,2,3,	mod
RG7	une fiche de priorité se compose d'un ensemble de critères priorité	mod
RG8	A chaque critère priorité d'une fiche priorité sont associés un score et un commentaire	mod
RG9	un COP évalue une ou plusieurs fiches urgence	mod
RG10	une opération est lié à un seul domaine SVS	mod
RG11	A chaque critère urgence d'une fiche urgence sont associés un score et un commentaire	mod
RG12	une fiche d'urgence se compose d'un ensemble de critères définis par le COP responsable du domaine	mod
RG13	une fiche urgence se rapporte à un seul domaine SVS	mod
RG14	une fiche priorité évalue une opération évaluée en niveau d'urgence Ui,	mod
RG15	un EP peut être concerné par plusieurs fiches d'évaluation	mod
RG16	Une fiche d'évaluation concerne un et un seul EP dans le cadre d'une opération	mod
RG17	un EP peut avoir plusieurs bilans de santé	mod
RG18	un EP peut être concerné par plusieurs fiches anomalies	mod
RG19	un EP peut avoir plusieurs fiches d'entretiens courants	mod
RG20	un budget est enregistré pour une année d'exercice	mod
RG21	un EP correspond à une seule localisation	mod
RG22	une même localisation peut être associée à plusieurs Eps	mod
RG23	Une opération peut concerner plusieurs Eps	mod
RG24	une localisation est associée à une seule donnée trafic et un seul environnement	mod
RG25	une même localisation peut correspondre à plusieurs EP,	mod
RG26	un entretien courant concerne un seul EP	mod
RG27	une anomalie est définie pour un seul EP	mod
RG28	une demande d'évolution ou une expression de besoin se rapporte à un unique domaine SVS	mod
RG29	une opération n'est archivée que si la fin des travaux sur tous les Eps concernés ont été enregistrés	trigger
RG30	tout critère doit avoir une valeur dans une fiche d'urgence ou de priorité	trigger
RG31	une fiche urgence évalue un EP dans le cadre d'une opération	mod
RG32	Une opération peut avoir plusieurs imputations budgétaires	mod
RG33	Tout critère d'urgence ou de priorité doit avoir une valeur de poids différent de la valeur nulle	mod

Tableau 4 : les règles de gestion

La prise en compte de ces règles de gestion peut se faire par :

- une **relation** entre deux ou plusieurs entités ;
- l'**arité** (ou cardinalité) d'une relation ;
- des **déclencheurs** (ou **triggers**) c'est-à-dire des procédures stockées en base qui vérifie la validité des opérations réalisées sur la base. Par exemple pour la règle de gestion 30, on doit interdire l'insertion en base d'une évaluation dont l'un des critères de la liste des critères n'a pas de valeur.

II.5.2 Regroupement des entités

Tous les attributs dont un exemple est donné au Tableau 3 peuvent être regroupés en 4 catégories :

- La définition du réseau et son environnement ;
- La caractérisation des éléments de patrimoine EPs ;
- Les opérations et évaluations ;
- Le service SVS.

Nous allons préciser le modèle de chacune de ces catégories dans les lignes qui suivent.

Dans la modélisation UML de la section précédente, nous avons basé notre modèle sur une définition de tout élément du réseau faisant apparaître les items suivants :

- Autoroute (nom) ;
- Intervalle de PR ;
- Sens.

Les entités de la catégorie i) définissant le réseau et son environnement s'appuient donc sur cette définition. Ce sont :

- Les voies de la chaussée ;

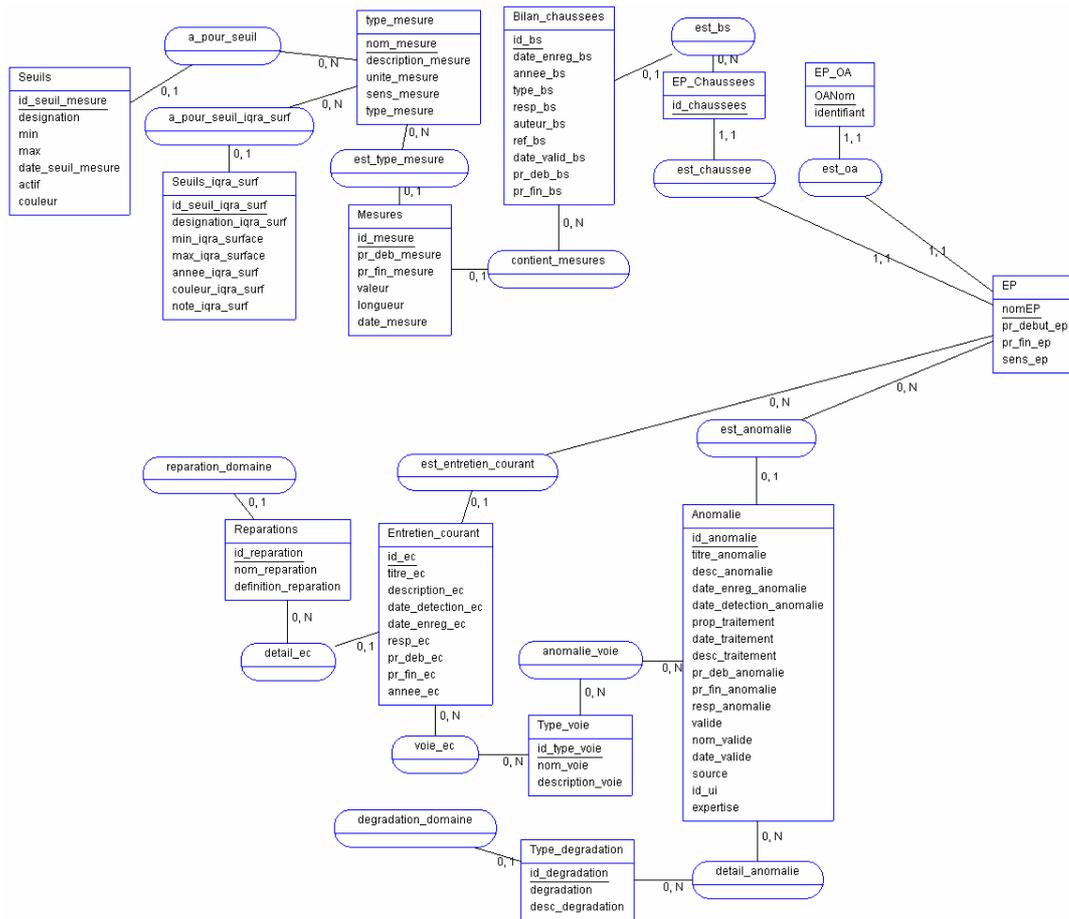


Figure 55 : définition des entités liées à la catégorie ii) des éléments caractérisant un EP

Nous pouvons maintenant faire le lien entre la catégorie i) liée à la localisation sur le réseau et la définition des EP de la catégorie ii) avec la relation « **a_pour_localisation** » (cf. Figure 56). Sur cette figure, sont reliés par le lien *a_pour_localisation* les deux modèles des catégories i) et ii).

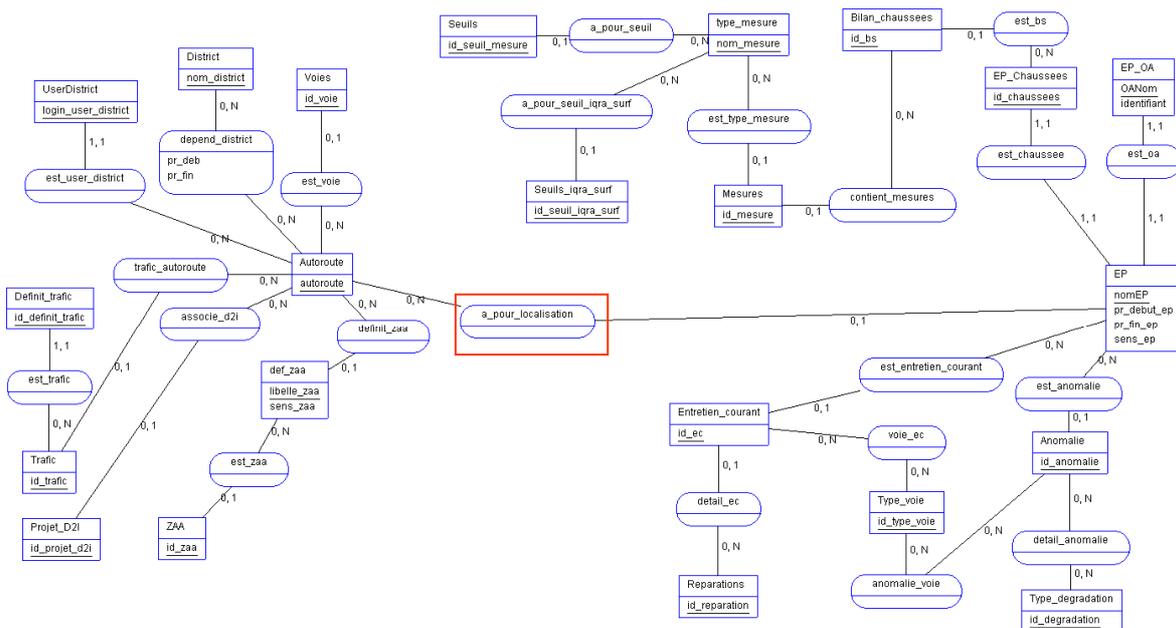


Figure 56 : liaison entre la définition du réseau et des EPs

Passons maintenant aux entités de la catégorie iii). Les règles de gestion 6 à 16, 23, 31 et 33 (cf. Tableau 4) sont à la base de la définition des entités liées aux opérations et aux évaluations de la classe iii). Par exemple, la règle 15 qui énonce qu'un EP peut être concerné par plusieurs fiches d'évaluation et la règle 16 qui dit qu'une fiche d'évaluation concerne un et un seul EP dans le cadre d'une opération, nécessitent la représentation d'une relation ternaire (evalue_ep) entre les trois tables EP, Operation et Fiche_ui (cf. Figure 57). La Figure 57 donne le modèle complet de la catégorie iii).

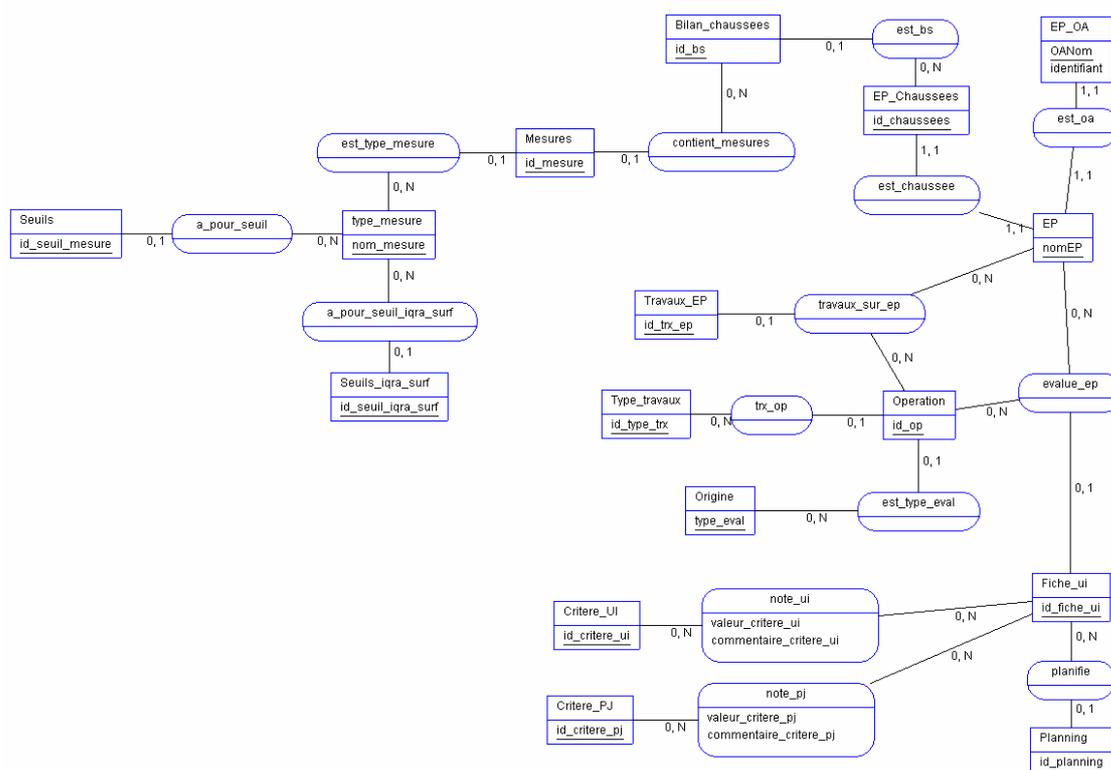


Figure 57 : définition des opérations et évaluations

La catégorie iv) concerne la définition du service SVS. Il se compose de plusieurs domaines ayant chacun un responsable. Dans cette catégorie, il faut encore considérer les types de budget (valables pour tous les domaines) et les demandes d'évolution ou expression de besoin se rapportant à un et un seul domaine (cf. Figure 58).

II.6.1 Ajout d'un nouveau domaine au modèle

La conception du SI repose sur plusieurs structures en étoiles, auxquelles il est plus facile de rajouter de nouvelles définitions.

Pour l'instant, SINERGIE n'a été développé que pour les Chaussées, les Ouvrages d'Art et la Signalisation Horizontale (cette dernière reprenant exactement la même définition pour les EP que pour les Chaussées).

L'ajout d'un nouveau métier au niveau du Système d'Information se fera par :

- L'ajout de la définition du domaine dans la table « domaine_svs » et du cop responsable dans la table « cop » ;
- La définition d'une nouvelle sous entité des EPs notée E'. Pour les bilans de santé, deux cas se présentent :
 - Lorsqu'on ne dispose pas d'un outil métier, une entité bilan de santé doit être définie (c'est le cas pour les Chaussées et la Signalisation Horizontale) ;
 - Lorsqu'on dispose d'un outil métier, comme OASIS pour les Ouvrages d'art, il s'agit de créer les fonctions de connexion à cet outil dans SINERGIE. Dans la nouvelle entité E', il faut ajouter les champs « clé » qui permettent d'identifier les EPs dans l'outil métier. Par exemple, dans l'entité « EP_OA », les champs « OANom » et « identifiant » permettent de récupérer les infos sur la structure de l'ouvrage mais aussi de rechercher les inspections dont il a fait l'objet.
- La définition des critères et des valeurs des poids dans les entités « critères_ui » et « critères_pj » (c'est-à-dire la définition des dimensions de l'analyse multicritère et les paramètres de l'opération d'agrégation) ;
- La définition des types de dégradations pour les anomalies.

Pour le SIAD, il faut définir :

- Pour les districts et le chef de service, les interfaces web relatives aux EPs, bilans de santé dont la structure dépend de leur définition ;
- Toutes les interfaces web relatives au COP du nouveau domaine. Ces interfaces sont pour la plupart identiques à celles des autres COP, à l'exception de celles relatives aux EPs et bilan de santé ;
- Les interfaces d'évaluations en urgence et priorité pour le COP et le chef de service ;
- Les tables Bilans de Santé et EP.

II.6.2 Un exemple d'intégration de nouvelles connaissances caractérisant le patrimoine : la caractérisation du risque naturel

SINERGIE est un outil de centralisation et de partage de la connaissance du réseau. Nous avons identifié et intégré un certain nombre de connaissances liées à l'environnement de l'infrastructure qui sont très importantes pour le COP ou le chef de service. En effet, les informations de contextualisation sur le trafic, les zones d'accumulations d'accidents peuvent modifier l'appréciation de l'utilisateur de SINERGIE lors d'une évaluation en urgence ou en priorité.

A la suite d'accidents survenus sur le réseau, il est apparu nécessaire pour ESCOTA d'améliorer sa connaissance en matière de risques dans les zones de part et d'autre de l'emprise autoroutière, susceptibles d'être à l'origine d'événements dangereux sur l'autoroute.

Une réflexion a eu lieu au sein du service SVS visant à définir les moyens nécessaires à la connaissance des risques naturels auxquels le réseau ESCOTA est susceptible d'être exposé. Le BRGM a créé une méta base de données à la demande d'ESCOTA regroupant l'ensemble des données existantes concernant les phénomènes naturels (événements, cartes d'aléas, cartes de risques), leur type et leur format. L'objectif est ensuite d'intégrer ces données dans SINERGIE en caractérisant le risque encouru par l'infrastructure.

Les phénomènes naturels pris en compte sont :

- Les inondations ;
- Les mouvements de terrain gravitaires (glissements, fluages, chutes de blocs et éboulements, coulée de boue et laves torrentielles) ;
- Les séismes ;
- Les feux de forêt.

Pour chacun de ces phénomènes naturels, nous disposons maintenant d'un outil localisant les zones où il existe un risque.

L'idée est d'associer à chaque tuple (autoroute, sens, PR de début, PR de fin), le type de risque et une quantification du risque. Cette définition ne pose aucun problème informatique car il suffit de :

- rajouter une entité dans le Système d'Information ;
- rajouter une classe supplémentaire dans notre modèle de l'application en définissant les attributs et les opérations qu'on peut effectuer ;
- rajouter les modules de consultation dans SINERGIE.

Le problème qui se pose encore concerne la **quantification** du risque sur laquelle nous continuons de réfléchir.

II.6.3 Transposition à une autre société d'autoroutes

Pour toute autre société d'autoroute, la structure du modèle resterait la même. Le point commun à tous les éléments de patrimoine, quel que soit leur domaine d'intervention, est la définition de leur localisation par le tuple (autoroute, sens, PR de début, PR de fin).

Au niveau du Système d'Information, les entités resteront les mêmes, seules leurs définitions pourraient être adaptées.

On peut intervenir au niveau du Système d'Information :

- En **modifiant les champs d'une ou plusieurs entités**. Les données n'ont pas la même signification, ou alors, des champs supplémentaires sont nécessaires. Il se peut qu'une autre société d'autoroute souhaite exploiter des informations plus détaillées sur les zones d'accumulations d'accidents (par exemple le nombre de blessés), et il suffit alors de rajouter les champs nécessaires dans la table « ZAA » ;
- En **rajoutant des entités** au modèle. Cela peut être le cas avec la disponibilité de nouveaux types de données permettant de caractériser l'environnement du réseau (par exemple le micro zonage sismique).

Au niveau du Système Interactif d'Aide à la Décision, pour tous les utilisateurs, il faut :

- Rendre ces données accessibles lors de la consultation des EP, bilans de santé et évaluations en urgence et priorité. Cela implique de **rajouter les rubriques de consultation** dans les pages web existantes. Par exemple, la Figure 60 montre les différentes rubriques de consultation existantes encadrées en rouge ;
- Également créer les fonctions d'enregistrement et de mise à jour de ces données.

Figure 60 : page de consultation d'un EP

II.6.4 Transposition à un autre gestionnaire de patrimoine

Le principe de base du SI comprenant les 4 groupes d'entités (cf. II.5.2) est transposable à un autre gestionnaire de patrimoine. La définition du SI reste basée sur un réseau décomposé en éléments repérables avec :

- un nom ;
- un sens ;
- et un intervalle de Point de Repère.

Il s'agit de définir un élément générique capable de localiser un élément de patrimoine. Ensuite, il faut donner une définition générique des éléments de patrimoine constituant le patrimoine. Chaque catégorie d'EP pourra être définie ensuite grâce à la définition de sous entités.

La structure des modèles du Système d'Information et du Système Interactif d'Aide à la Décision resteront les mêmes. En effet, nous conserverons nos quatre groupes d'éléments :

- Le réseau et son environnement ;
- Les EP et leurs bilans de santé ;
- Les opérations et les évaluations ;
- La définition des métiers et aspects budgétaires.

Il est évident que suivant le type de gestionnaire, le modèle devra être adapté, cela demandera une étude, mais l'extension nous semble tout à fait réalisable.

Le principe des évaluations multicritères est à adapter au fonctionnement de la décision au sein de la structure du nouveau gestionnaire. L'avantage de notre modèle est qu'il prévoit déjà le principe d'évaluation multicritère hiérarchisé qui peut se transposer à une autre entreprise.

II.6.5 Ajout de nouvelles fonctions

II.6.5.1 Méthodes de calculs basées sur l'exploitation de données stockées dans SINERGIE

Suite aux réunions entre les sociétés concessionnaires d'autoroutes françaises dans le cadre du Groupe Opérationnel Chaussées (GOC), une proposition de calcul d'un Indice de Qualité du Réseau Autoroutier IQRA pour la surface a été approuvée par la Direction des Routes (Annexe 3).

Le calcul de l'IQRA surface est basé sur un calcul matriciel à partir des valeurs de mesures issues du suivi annuel des Chaussées (cf. Figure 55). Les mesures intervenant dans le calcul de cet indicateur, Hauteur au Sable (HS), Coefficient de Frottement Transversal (CFT), UNI et l'orniérage (ORN) sont enregistrées dans SINERGIE dans le cadre du suivi annuel des Chaussées. Le développement de cette nouvelle fonctionnalité a nécessité l'implémentation des méthodes de calcul, la création d'entités dans le Système d'Information stockant les paramètres et l'ajout des pages de consultation pour les utilisateurs autorisés.

II.6.5.2 Définir une nouvelle fonction d'agrégation

Est-il possible d'implémenter une nouvelle méthode d'agrégation sans modifier le comportement des utilisateurs de SINERGIE ? En d'autres termes, est-il possible de changer le mode de calcul sans modifier la procédure d'agrégation existante (application de scores sous forme d'étiquettes symboliques selon les critères d'urgence ou de priorité) ? L'idée consiste donc à implémenter une nouvelle procédure de calcul du score global, ce qui doit rester transparent pour l'utilisateur.

Pour cela, il faut définir le nouvel opérateur mathématique. Prenons par exemple l'intégrale de Choquet. Cet opérateur est d'autant plus intéressant qu'il permet de modéliser, outre le poids des critères, les interactions pouvant exister entre ceux-ci [Akharraz, 04].

L'opérateur mathématique est défini dans les (objets) classes du Système Interactif d'Aide à la Décision. Il faut donc implémenter la (les) nouvelle(s) classe(s) définissant l'intégrale de Choquet. Or, les paramètres ne sont plus les poids de critères comme cela était le cas avec la moyenne pondérée. L'intégrale de Choquet nécessite d'autres paramètres : aux indices de Shapley modélisant l'importance relative des critères, viennent s'ajouter les indices d'interaction mutuelle entre les critères. Ces paramètres doivent être identifiés et stockés.

Nous avons deux solutions :

- soit nous les définissons dans la (les) nouvelle(s) classe(s) du Système Interactif d'Aide à la Décision ;
- soit nous les stockons dans le Système d'Information.

Nous avons retenu la seconde solution plutôt que de les « coder en dur » dans une fonction de calcul d'une classe du SIAD. En effet, la première solution rend la gestion des modifications éventuelles des valeurs des paramètres plus complexe car non seulement toute modification entraînerait la recompilation de SINERGIE, mais impliquerait également la perte de l'ancienne valeur. Étant donné que la notion d'historique est primordiale, il est indispensable de conserver les valeurs des paramètres précédentes. Il est évident que cette gestion est facilitée dans le Système d'Information en définissant les valeurs des paramètres avec des dates de début et de fin de validité.

Nous avons évoqué dans ce chapitre des méthodes d'évaluation numériques pour les niveaux d'urgence ou de priorité. Nous en détaillerons les principes dans le chapitre suivant. Nous avons également implémenté une version à caractère plus qualitatif de l'évaluation des opérations en nous inspirant des travaux décrits dans [Grabisch, 06]. Les mécanismes calculatoires y sont bien différents.

Cependant indépendamment des méthodes de calcul utilisées pour les fonctionnalités d'évaluation, de justification et de planification, nous pouvons conclure que :

- Le stockage des paramètres doit se faire dans le Système d'Information (via la création de nouvelles entités en relation avec l'entité « Critère ») ;
- L'implémentation des fonctions de calcul doit être réalisée dans le Système Interactif d'Aide à la Décision.

II.7 Conclusion

Nous venons de produire les modèles informatiques du Système d'Information et du Système Interactif d'Aide à la Décision composant le logiciel SINERGIE. Cette étape est très importante dans le développement d'un logiciel où il est indispensable de définir les fonctions que le système va remplir et de structurer les données manipulées. Nous nous sommes appuyés sur des méthodes de modélisation reconnues et fiables, UML et Merise, en justifiant notre volonté de les utiliser conjointement : d'une part, en montrant leur complémentarité, d'autre part pour assurer une cohérence entre le modèle « logique » et l'implémentation « physique ». Ces modèles représentent non seulement la base du développement de l'outil SINERGIE, mais également le support de ses évolutions futures. Sur le plan technique, le choix d'un serveur web (intranet) s'interfaçant avec un système d'information est une solution conforme aux besoins d'ESCOTA : centralisation des données dont le traitement (consultation, modification, ...) est assuré via un outil accessible sur plusieurs sites.

Jusqu'ici, nous nous sommes intéressés à SINERGIE sous l'angle fonctionnel et logiciel : nous avons listé les fonctionnalités attendues du logiciel et examiné les structures de données nécessaires à leur mise en place. Dans le chapitre suivant, nous allons reprendre chacune de ces fonctionnalités, mais cette fois-ci avec une perspective d'analyse toute autre : définir les outils mathématiques qui vont supporter les processus calculatoires afférents à chacune de ces fonctionnalités.

Chapitre III: Le support mathématique de SINERGIE

III.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons défini les fonctionnalités du logiciel SINERGIE destiné à supporter le processus d'aide à la décision du Service Structure Viabilité et Sécurité (SVS) de la Direction d'Exploitation. Nous proposons maintenant les solutions mathématiques que nous avons retenues pour réaliser les fonctionnalités avancées de SINERGIE. A cet effet, nous reprendrons certains éléments de la problématique d'ESCOTA en matière de gestion du patrimoine introduits au chapitre I afin d'éclairer les raisons qui ont guidé nos choix d'implémentation. Nous prêterons une attention toute particulière à la combinaison d'outils d'analyse multicritère numériques et de systèmes de cotation symbolique. De cette confrontation apparaîtront les résultats principaux de ce chapitre.

Les décisions afférentes à la gestion du patrimoine concernent la programmation d'opérations d'entretien, d'amélioration et de mise à niveau du patrimoine infrastructure et sont réparties dans cinq domaines de gestion de l'exploitation :

- les bâtiments ;
- les chaussées, les clôtures, la signalisation horizontale, la surveillance des talus ;
- la lutte contre l'incendie, le débroussaillage, la signalisation verticale,
- les ouvrages d'art, tunnels et murs de soutènement,
- l'environnement, les bassins, les plantations, l'assainissement, les dispositifs de retenue.

Tout élément de patrimoine (EP)—et donc toute opération (OP)—est rattaché (resp. affectée) à un domaine de gestion du patrimoine. Chaque domaine est placé sous la responsabilité d'un expert métier (EM) ou Conducteur d'Opérations (COP). Les activités de ces derniers sont coordonnées par le responsable de l'infrastructure. La gestion et la planification des *opérations* constituent une tâche complexe pour les décideurs. En tant que gestionnaire responsable, ils doivent prendre en compte plusieurs aspects dans leur politique de maintenance : les techniques à utiliser, la réglementation en vigueur, l'impact sur la sécurité des usagers et le coût de l'opération, le tout dans un contexte sociétal évolutif. Le problème d'aide à la décision d'ESCOTA est donc fondamentalement multicritère. Les décideurs ont besoin d'avoir une vision globale du patrimoine en termes d'objectifs et de contraintes, c'est-à-dire de disposer d'une évaluation continue de l'état du patrimoine dans un contexte d'exploitation dynamique. Il a donc été décidé de mettre en place un système informatique pour aider à la définition et au déploiement d'une stratégie de gestion optimisée du patrimoine reposant sur une évaluation continue de l'état des EP, de l'urgence et de la priorité des opérations induites. Nous pensons en effet que ce processus de décision complexe (cf. Figure 15) doit être décomposé en tâches élémentaires pour que l'on soit à même de proposer les aides informatisées adéquates. Les fonctionnalités qui nous semblent constituer le cœur du SIAD sont : l'évaluation du niveau d'urgence et de priorité des opérations, la justification et le contrôle de la fiabilité de ces évaluations, la planification à proprement parler.

Cette courte synthèse de la problématique d'ESCOTA évoque chacune des caractéristiques fondamentales de l'aide à la décision souhaitée par la direction d'exploitation :

- il y a d'abord un problème d'évaluation de l'état des éléments du patrimoine et de l'urgence d'intervention. Au-delà de l'usage de méthodes normalisées en Génie Civil pour caractériser l'état d'un élément de patrimoine, l'évaluation doit concerner ici l'urgence d'une situation, la priorité d'une opération. Il n'y a bien sûr aucune norme relative à ces notions ;
- l'appréciation d'une urgence ou d'une priorité d'intervention relève d'une analyse multicritère hiérarchisée ; il y aura donc lieu de prêter attention à la commensurabilité des dimensions de l'analyse ;

- la construction des échelles d'évaluation doit être contrôlée pour réduire le caractère subjectif des appréciations ; de plus, les échelles doivent être établies de façon cohérente avec l'analyse multicritère qu'elles supportent ;
- en Génie Civil, comme dans nombre d'activités d'ingénierie, la culture des chiffres est fortement développée. Les gens manipulent communément des étiquettes symboliques et s'autorisent néanmoins, lorsque nécessaire, à les convertir en valeurs numériques plus ou moins arbitrairement, sans plus de précaution pour pouvoir procéder à toutes sortes de calculs : une attention particulière devra être prêtée à cette interface numérique / symbolique ;
- l'aide à la décision ne se situe pas dans une logique d'optimisation au sens classique du terme : il s'agit davantage d'être assisté dans la supervision des opérations à entreprendre (ou entreprises) et de savoir répondre à tout instant de la politique d'exploitation auprès de la direction générale, des partenaires économiques, des autorités civiles, etc., que de chercher l'optimum d'une fonction objectif, le minimum d'une fonction coût ou le maximum d'une fonction sécurité, sous des contraintes d'exploitation données. La justification de la politique de maintenance permet de faire remonter les raisons des choix arrêtés à chaque niveau fonctionnel, l'une des attentes de l'aide à la décision est donc d'assurer la traçabilité de cette politique ;
- s'il s'agit au final de formaliser la planification des opérations de maintenance sur le réseau sur un plan quinquennal, les étapes d'évaluation des opérations et de justification des options retenues apparaissent néanmoins comme des préoccupations à part entière ; il est donc opportun de bien décomposer le processus de décision qui va du recueil des mesures sur l'état d'un élément du patrimoine jusqu'à la planification de l'opération afférente à sa maintenance en passant justement par ces différentes phases d'évaluation.

Le chapitre sera structuré en conséquence : il a pour objet de donner le support mathématique nécessaire à l'implémentation des fonctionnalités qui ressortent de l'analyse des exigences du chapitre I et de l'analyse fonctionnelle du chapitre II. Dans un premier temps, nous expliquons le choix de l'agrégation multicritère dans la phase d'évaluation de l'urgence et de la priorité d'une opération. Par la suite, dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur l'évaluation multicritère en urgence par les COP ou EM : en effet, la procédure sera identique au niveau de l'évaluation en priorité avec un référentiel de critères différent. Nous faisons quelques rappels rapides sur le principe d'agrégation puisque nous nous contentons dans ce travail des opérateurs de type « moyenne pondérée ». Nous revenons ensuite sur le problème des échelles d'évaluation. A ce propos, nous nous intéressons plus particulièrement à la méthode Macbeth qui permet d'assurer la cohérence entre les échelles d'évaluation et l'opérateur d'agrégation. Parce que les scores attribués par les ingénieurs prennent la forme d'étiquettes symboliques et qu'ils sont néanmoins utilisés dans les opérateurs d'agrégation qui supportent le processus d'évaluation d'une opération, nous faisons mention d'un traitement purement symbolique pour résoudre ce problème a priori paradoxal et pourtant fréquemment mis en place dans nombre d'activités d'ingénierie. Nous appliquons ce traitement symbolique à notre problématique et comparons les résultats avec notre méthode de traitement numérique. Nous nous intéressons alors à la notion de sensibilité d'une procédure d'évaluation basée sur l'agrégation multicritère. Sur cette notion, sont élaborés deux nouveaux types de fonctions pour l'aide à la décision informatisée. D'abord, l'analyse de sensibilité permet de quantifier le risque de commettre une erreur d'évaluation, et de diagnostiquer les causes les plus probables d'erreur. Puis, elle est vue comme le support mathématique de l'étape de justification. Enfin, nous concluons notre décomposition formelle du processus de décision par une aide à la planification informatisée qui s'appuie sur l'ensemble des résultats précédents et qui est présentée plus en détails dans le chapitre suivant.

III.2 L'évaluation multicritère

III.2.1 Introduction : trois niveaux d'évaluation hiérarchisés

Comme nous l'avons expliqué dans les chapitres I et II, l'évaluation concernant les opérations de maintenance relèvent de trois logiques bien distinctes :

- une logique de mesure pour la détection de symptômes sur les EP ;

- une logique d'évaluation pour les urgences d'intervention ;
- une logique de décision pour les priorités d'intervention.

Ces logiques correspondent à des niveaux fonctionnels de l'exploitation. Des inspections périodiques sont menées pour détecter et mesurer, aussi tôt que possible, tout symptôme significatif d'une dégradation d'un élément de l'infrastructure (logique de mesure). L'expert métier (EM) responsable d'un domaine de gestion analyse ensuite le diagnostic technique qui lui a été remonté à l'issue de l'inspection. Il évalue la criticité de la situation en termes de risques techniques (logique d'évaluation en urgence). Cette évaluation repose sur un ensemble de critères propres au domaine de gestion, elle permet d'attribuer un degré d'urgence à l'opération afférente à l'EP défectueux. Ce degré d'urgence est ensuite soumis au responsable en charge de l'infrastructure. Ce dernier coordonne et arbitre les demandes d'opérations de chacun des COP afin de planifier les interventions. A cet effet, il attribue un degré de priorité aux opérations requises par les EM.

De nouvelles dimensions d'analyse sont apportées à chaque niveau hiérarchique du processus de décision, de la mesure jusqu'à la planification. L'apport et l'interprétation des informations à chaque niveau fonctionnel enrichissent le contenu décisionnel du flux d'informations. Une décision ne se prend jamais sur l'information brute, mais sur l'interprétation que l'on en fait dans un contexte et à un niveau fonctionnel donné. L'analyse multicritère est un processus communément utilisé par l'exploitant. Cette façon de procéder semble trouver son origine dans la logique de mesure où de nombreuses méthodes permettent déjà une évaluation normalisée de l'état de patrimoines.

III.2.2 À l'origine, l'évaluation de symptômes

Le suivi du patrimoine est réalisé de façon périodique : des inspections détaillées périodiques (idp) sont réalisées tous les 3, 5 ou 6 ans en fonction du niveau de surveillance de chaque EP. Ces inspections permettent la détection de symptômes de dégradation ou d'anomalies sur un EP. Des comptes-rendus d'inspection sur les éléments de patrimoine sont transmis aux experts métiers, qui sont les responsables des divers domaines d'intervention. Pour les Ouvrages d'Art (OA), par exemple, une méthode d'évaluation normalisée par le SETRA est utilisée pour les visites annuelles et pluriannuelles : la méthode IQOA [Setra, 1996]. Son objectif est de synthétiser les constats en vue d'améliorer la maintenance.

Les inspections périodiques sont ainsi des bilans de santé, qui fournissent une évaluation globale et synthétique de l'état des EP inspectés. On dispose d'environ 140 points [Setra, 96] auxquels on attribue un score partiel caractérisant quantitativement la gravité d'un symptôme selon une échelle de valeurs propre à la méthode d'évaluation comme il est indiqué sur le Tableau 5. De plus, si le point évalué présente un risque pour la sécurité des usagers, alors on ajoute la mention « S » à la note (ex : 1S, 2ES, ... etc.). Ces points sont regroupés par parties d'ouvrages : les équipements, les éléments de protection et la structure. Pour chacune de ces parties d'ouvrage, le score associé correspond à la fusion des différents scores partiels relevés, i.e. la note maximale obtenue sur l'ensemble des points évalués dans cette partie. La note finale de l'ouvrage est le maximum des notes des parties d'ouvrage. Nous remarquons que cette méthode IQOA est déjà le résultat d'une agrégation multicritère.

Classe IQOA	Signification
Classe 1	Ouvrage en bon état relevant de l'entretien courant au sens de l'Instruction Technique sur la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art.
Classe 2	Ouvrage, dont la structure est en bon état apparent mais dont les équipements ou les éléments de protection présentent des défauts, Ou dont la structure présente des défauts mineurs, et qui nécessite un entretien spécialisé sans caractère d'urgence.
Classe 2E	Ouvrage dont la structure est en bon état apparent mais dont les équipements ou les éléments de protection présentent des défauts ou dont la structure présente des défauts mineurs, et qui nécessite un entretien spécialisé urgent, pour prévenir le développement rapide de désordres dans la structure et son classement ultérieur en 3.
Classe 3	Ouvrage dont la structure est altérée et qui nécessite des travaux de réparation mais sans caractère d'urgence.
Classe 3U	Ouvrage dont la structure est gravement altérée, et qui nécessite des travaux de réparation urgents liés à l'insuffisance de capacité portant de l'ouvrage ou à la rapidité d'évolution des désordres pouvant y conduire à brève échéance.

Tableau 5 : définition des scores (ou classes) IQOA

Les niveaux de gravité quantifiés des différents symptômes relevés sur un EP sont donc agrégés via un opérateur normalisé qui dépend du domaine de gestion de patrimoine : moyenne pondérée normalisée par le CETE Méditerranée pour les chaussées, agrégation par opérateur Max pour la méthode IQOA du SETRA pour les Ouvrages d'Art [Setra, 96] (Tableau 6). La notion d'agrégation de scores partiels pour définir un indice synthétique fait donc l'objet de développements spécifiques dans plusieurs secteurs métiers du Génie Civil.

Exemple 1 : Prenons l'exemple de la visite d'un mur de soutènement dans un état général « moyen » avec une coulure sur le parement. Les notes selon les quatre grandes parties d'ouvrage pourraient être celles du Tableau 1. La note IQOA, le score global, est $\max(1, 1, 2, 2E) = 2E$ (Tableau 5 et Tableau 6).

Partie d'ouvrage	Note
Zone d'influence	1
Équipements	1
Drainage	2
Structure	2E
NOTE IQOA	2E

Tableau 6 : Évaluations partielles et note IQOA

Le Tableau 7 fait encore apparaître l'indice IQRA Structure qui, lui, est destiné à apprécier la qualité du réseau autoroutier du point de vue de l'état de la structure de la chaussée. Il est le résultat de l'agrégation de deux indices « mesurables », le STRU et l'IESC (cf. sous-section du *suivi périodique des chaussées* au chapitre IV). L'agrégation est présentée ici sous la forme d'une table de composition de neuf cases. Cette représentation est d'autant plus intéressante qu'elle permet d'avoir simultanément la répartition sur tout le réseau de la nature et de la gravité des défauts constatés, mais encore des techniques de réparation préconisées. ESCOTA s'est inspiré de ces principes pour définir un indice de qualité du réseau autoroutier relativement à la surface des chaussées, l'IQRA Surface. Là, la volonté de normaliser la procédure d'évaluation des symptômes vient d'ESCOTA. Cependant, il faut tout de même mentionner l'existence d'un Groupe Opérationnel Chaussées GOC qui fait partie de l'Association Française des Sociétés d'Autoroutes ASFA. Il rassemble les experts « chaussées » des sociétés d'autoroutes APPR, ASF, COFIROUTE, ESCOTA, SANEF, SAPN et SFTRF. Ce groupe se réunit plusieurs fois par an et mène des réflexions sur des travaux de recherche et le développement de méthodes visant à améliorer le suivi des chaussées autoroutières.

Calcul de l'indicateur IQRA Structure Réseau

Les indices de dégradation de structure **STRU** et de qualité structurelle **IESC** sont exprimés en pourcentage. Nous avons basé notre calcul de l'indicateur IQRA Structure sur la comparaison des valeurs des deux indices STRU et IESC. Ainsi, les deux premières matrices *Traitements* et *Notes IQRA* donnent respectivement les traitements préconisés ainsi que les notes IQRA en fonction des seuils des 2 indices.

Traitements

STRU/IESC	0 à 7%	7 à 25%	> 25%
0 à 5%	Pas de traitement	Rabo + BBTM	EME 9cm U3
5 à 10%	Rabo + BBTM	U2	EME 24cm U2
> 10%	EME 9cm U3	EME 24cm U1	U1

Notes IQRA

STRU/IESC	0 à 7%	7 à 25%	> 25%
0 à 5%	18	18	14
5 à 10%	18	14	2
> 10%	14	2	2

Résultats

IQRA Structure Réseau **16.804**

Ci-dessous, la répartition en pourcentage et mètres du linéaire des quotations IQRA Structure.

Répartition linéaire (%)

STRU/IESC	0 à 7%	7 à 25%	> 25%
0 à 5%	51.383 %	29.573 %	5.299 %
5 à 10%	3.326 %	4.14 %	0.954 %
> 10%	1.954 %	2.192 %	1.174 %

Répartition linéaire (mètres)

STRU/IESC	0 à 7%	7 à 25%	> 25%
0 à 5%	335822.0	193284.0	34637.0
5 à 10%	21741.0	27063.0	6236.0
> 10%	12772.0	14330.0	7673.0

Désignation	Indice
Indice de dégradation structurelle	STRU
Indice de qualité structurelle	IESC

Tableau 7 : IQRA Structure pour les chaussées

En conclusion, au niveau de la logique de mesure, lorsqu'un score global est affecté à un EP pour caractériser son état :

- celui-ci est le résultat de l'agrégation des niveaux de gravité quantifiés des différents symptômes relevés sur l'EP ;
- l'opérateur d'agrégation utilisé relève d'une norme généralement imposée par un organisme extérieur ou un consortium d'acteurs majeurs du domaine, d'une législation selon une méthode d'évaluation standard.

La normalisation de la caractérisation des défauts pour chaque type d'éléments de patrimoine est donc bien une préoccupation majeure qui mobilise une réflexion au niveau des exploitants et des instances nationales où l'analyse multicritère est déjà un outil familier.

L'objet de notre travail n'est certainement pas de discuter la façon dont sont définis les index résumés dans chacune de ces méthodes normalisées (le max pour l'IQOA, etc.). Nous avons tenu à accorder quelques lignes à ces principes déjà mis en place pour expliquer comment nous avons été logiquement amenés pour définir les degrés d'urgence et de priorité des opérations de maintenance à avoir recours à des techniques d'agrégation multicritère : il y a une pratique déjà solidement ancrée dans les techniques d'évaluation du Génie Civil. Si initialement les connaissances symboliques et les évaluations qualitatives des intervenants ont pu nous laisser penser que l'on s'orienterait vers une solution de type système expert pour la décision—c'est-à-dire un formalisme sous forme de règles, il s'est avéré que cette conclusion hâtive ne reposait que sur des a priori et qu'elle faisait fi de la culture métier déjà largement imprégnée de l'analyse multicritère.

III.2.3 Agrégation multicritère

Cette première partie part du postulat suivant. Les opérations sont évaluées par un expert métier (COP ou EM) selon un certain nombre de critères propres au domaine associé de l'exploitation, puis par le chef de service Structure Viabilité Sécurité (SVS) qui fait appel à des dimensions d'analyse plus stratégiques pour arbitrer les demandes des EM. A chaque niveau fonctionnel, un score partiel est donc établi au regard de chacun de ces critères et ce pour chaque opération. Ce score se réfère à une échelle de ratio ou d'intervalles si nécessaire (pour cette hypothèse voir la section suivante). On peut donc imaginer que l'on stocke cette information dans une grille d'évaluation où les lignes sont les critères de sélection et les colonnes les opérations candidates. Ensuite, il s'agit de fusionner les scores partiels attribués à une opération afin de lui octroyer un score global. C'est sur ce score global que les opérations seront ensuite classées. Ce paragraphe précise cette notion de fusion des scores partiels : cette opération est communément appelée *l'agrégation*. On va distinguer deux grandes classes d'agrégation :

- les critères sont considérés comme des **votants** qui participent tous à même hauteur à **l'élection de candidats**. On parlera de groupe homogène de critères. Le problème du choix collectif est de trouver des fonctions d'agrégation qui agissent sur l'ensemble des profils d'intensité de préférence ;
- une stratégie de sélection a été exprimée, les dimensions de l'évaluation ne jouent pas un rôle symétrique. Un modèle de la stratégie de sélection peut être envisagé prenant en compte l'expression d'intensités de préférence, de priorités exprimées par le décideur (le COP ou le chef de service SVS). Les votants—les critères— ne jouent plus un rôle symétrique dans l'élection et cette distinction repose sur la capacité du décideur à expliciter sa stratégie. On parlera de groupes inhomogènes de critères. Le caractère inhomogène peut également être relié à la nature du processus d'élection que l'on souhaite mettre en place lorsque les critères n'ont pas tous le même droit de vote. Cela conduit à étendre les notions de majorité, unanimité, veto, dictature, etc. à des formes plus souples pondérées.

III.2.3.1 Notation

Nous appellerons les opérations candidates les alternatives de la procédure de sélection multicritère. L'indice associé à une alternative est la lettre k (sauf mention explicite). Nous appellerons critères ou critères d'évaluation les différentes dimensions de l'analyse comparative entre les alternatives. La lettre réservée pour indiquer un critère est i (sauf mention explicite). Le nombre d'alternatives est n ; le nombre de critères est p pour un COP donné ou le chef de SVS.

On définit ainsi une grille d'évaluation dont chaque case (i, k) est un score partiel relatif au couple (*critère i ; alternative k*) : c'est le score u_i^k de l'alternative k sous l'angle d'analyse du critère i .

L'évaluation globale d'une alternative nécessite ensuite l'agrégation des appréciations partielles selon chaque critère. Il existe différents opérateurs mathématiques qui permettent de modéliser cette procédure d'agrégation, correspondant aux différentes propriétés qu'une **procédure de vote** peut satisfaire.

Dans cette section, nous rappelons dans un premier temps la terminologie et les conditions minimales nécessaires pour définir un problème d'agrégation multicritère cardinale où l'on agrège des scores (information cardinale) et non des préférences (information ordinale).

Prenons donc les conventions suivantes :

S : Ensemble d'alternatives (les opérations envisagées) parmi lesquelles le décideur doit choisir.

C : Ensemble des critères permettant d'évaluer les alternatives.

$U = [0,1]$: Univers de description des degrés de satisfaction ou évaluations partielles. En effet, pour des raisons de simplification des notations, les valeurs des scores sont exprimées dans l'intervalle $[0,1]$, 1 correspond à la satisfaction complète d'un critère, 0 exprime l'insatisfaction complète.

Nous considérons l'ensemble fini des p critères $C = \{c_1, c_2, \dots, c_p\}$ et $P(C)$ l'ensemble des parties de C , $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_p)$ représente les valeurs numériques de satisfaction des critères, de sorte que u_i est le degré de satisfaction du critère c_i .

A chaque alternative $s^k \in S$ est associé un profil $s^k = (u_1^k, u_2^k, \dots, u_p^k)$ avec u_i^k l'évaluation partielle de s^k selon le critère c_i .

L'un des problèmes d'aide à la décision multicritère est d'aboutir à un classement des alternatives de la meilleure à la moins bonne, au vu de l'ensemble critères, ou tout simplement à trouver la meilleure alternative. Dans l'approche cardinale, l'objectif est alors de construire une fonction $h: [0,1]^p \rightarrow [0,1]$ telle que, pour chaque alternative s^k , on ait : $h(s^k) = h(u_1^k, \dots, u_p^k)$, où $h(s^k)$ représente l'évaluation globale de l'alternative s^k relativement à tous les critères, h est l'opérateur d'agrégation à déterminer. Les alternatives s^k peuvent donc ensuite être classées relativement à leur score de synthèse $h(s^k)$.

Les conditions nécessaires sur l'opérateur h sont les suivantes :

- h est continu ;
- $h(0,0,\dots,0) = 0$ et $h(1,1,\dots,1) = 1$;
- $\forall (u_i, v_i) \in [0,1]^2$, si $u_i \geq v_i$ alors $h(u_1, \dots, u_p) \geq h(v_1, \dots, v_p)$.

III.2.3.2 Groupes homogènes

Dans ce paragraphe, on considère que tous les critères ont la même importance, c'est-à-dire qu'ils participent à même hauteur dans la procédure de vote que l'on souhaite implémenter. Il n'est pas nécessaire de recueillir une quelconque connaissance **experte** en termes de préférences ou de priorités de la part du décideur, il s'agit simplement de construire une procédure de vote collectivement rationnelle en trouvant des fonctions d'agrégation qui agissent sur l'ensemble des profils d'intensité de préférence (le collectif désignant ici l'ensemble des critères).

Pour une opération exprimant la satisfaction simultanée des objectifs, un axiome naturel est :

$\forall (u_1, \dots, u_p), h(u_1, \dots, u_p) \leq \min(u_1, \dots, u_p)$, c'est-à-dire que l'évaluation globale d'une action ne peut être meilleure que la plus mauvaise des évaluations partielles : dans ce type de modèle, on souhaite donc que les critères soient simultanément satisfaits. On appellera ces opérateurs des conjonctions.

Un opérateur exprimant la redondance de deux objectifs satisfera un axiome dual du précédent :

$\forall (u_1, \dots, u_p), \max(u_1, \dots, u_p) \leq h(u_1, \dots, u_p)$, c'est-à-dire que c'est la meilleure des évaluations partielles qui conditionne l'évaluation globale. La satisfaction complète de l'un des critères est suffisante, une satisfaction conjointe de tous les critères est superflue.

Une opération exprimant le compromis satisfera l'axiome suivant, complémentaire des deux précédents : $\forall (u_1, \dots, u_p), \min(u_1, \dots, u_p) \leq h(u_1, \dots, u_p) \leq \max(u_1, \dots, u_p)$.

On peut alors s'interroger quant à la manière de procéder pour l'identification de l'opérateur h . Cette opération peut être décomposée en deux étapes. On peut cerner le comportement du décideur en lui demandant de fournir une appréciation linguistique du niveau de compatibilité entre conséquence et objectif sur un ensemble réduit d'actions. Il est alors possible de se fixer rapidement sur le type d'agrégation à employer : conjonction, compromis ou disjonction. Une fois l'une des trois attitudes fondamentales possibles du décideur déterminée, on peut utiliser des familles de fonctions paramétrées propres à l'un des trois comportements pour affiner la détermination de l'opérateur

d'agrégation : le choix de h est ramené à un problème d'identification paramétrique [Dubois, 83] [Plantié, 06].

Une identification très précise peut être jugée inutile ; seul un certain comportement de l'opérateur h peut être souhaité. Cela est à rapprocher du caractère arbitraire de la définition des critères d'évaluation, et de la traduction numérique des jugements émis par le décideur. Il vaut mieux dans ce cas là, se donner un catalogue restreint, mais bien dispersé, d'opérations simples et identifier h de façon qualitative en demandant au décideur de formuler à l'aide d'une échelle linguistique de jugement (totalement compatible, plutôt compatible, ..., incompatible) un jugement global sur chaque action.

Si on trouve que plusieurs opérations sont des modèles possibles, on pourra malgré tout tenter de classer les éléments. On pourra introduire une incertitude sur le résultat de l'agrégation. Par exemple si on n'a pas pu (ou voulu) discriminer entre les opérations h_1, h_2, \dots, h_t on peut poser :

$$\forall (u_1, \dots, u_p), h(u_1, \dots, u_p) \in \left[\min_{i=1,t} h_i(u_1, \dots, u_p), \max_{i=1,t} h_i(u_1, \dots, u_p) \right] \quad (1)$$

Une autre façon, plus pragmatique, d'envisager le choix de l'opérateur h d'agrégation est de se construire une base d'exemples minimale et, au lieu de procéder par optimisation comme évoqué ci-dessus, on choisit simplement dans un « catalogue » prédéfini d'opérateurs représentatifs des trois comportements décisionnels type, l'opérateur du catalogue qui coïncide au mieux avec les scores de synthèse que l'on aurait affectés intuitivement. Par expérience, compte tenu de l'imprécision des évaluations partielles liée à la subjectivité des appréciations du décideur, de la taille toujours réduite de la base d'apprentissage, procéder de la sorte n'affecte en rien l'identification de h , toute précision plus fine n'est bien souvent qu'illusoire.

Les caractéristiques symétriques de h n'impliquent pas que l'agrégation soit nécessairement symétrique. En effet, les scores sont attribués de manière plus ou moins approximative par le COP ou le chef de SVS, on peut donc imaginer que les critères partiels soient modélisés par des sous-ensembles flous comme il est proposé sur la Figure 61. L'agrégation repose donc sur les ensembles flous décrivant les objectifs partiels (Figure 61) et des dissymétries peuvent facilement être introduites en manipulant les fonctions d'appartenance.

Ainsi, sur l'exemple de la Figure 61, on s'intéresse au critère « Poids idéal pour un homme de 1.80m ». Un poids de 72kg satisfera complètement l'objectif que l'on s'est fixé (satisfaction égale à 1). Au-delà de 80kg ou en deçà de 64kg, on considérera l'individu comme n'ayant pas un poids réputé normal pour sa taille. Entre 64kg et 80kg, le degré de satisfaction du critère se lit comme indiqué sur la figure : un individu de 75kg satisfait à hauteur de 0.65 le critère « poids idéal pour 1.80m ». Une façon de rendre l'agrégation dissymétrique est d'être particulièrement exigeant sur la valeur idéale de 72kg pour 1.80m. On définit alors un second ensemble flou (ligne formée de points) avec un support restreint. Si l'on reprend l'exemple de l'individu de 1.75m, alors avec cette nouvelle définition du critère « poids idéal », l'individu ne satisfera plus le critère qu'à hauteur de 0.3. Il s'agit là d'une manière contournée pour accorder une importance relative plus ou moins grande à un critère donné en le rendant plus ou moins sélectif. Une autre façon de procéder est d'introduire la notion de quantificateur sur les critères. Par exemple, si l'on a défini le critère « grand » à l'aide d'un ensemble flou (ligne pleine) comme proposé sur la Figure 61(b), le critère « très grand » pourra être modélisé par le carré de la fonction d'appartenance de « grand » : on ne peut être « très grand » que si l'on est déjà considéré « grand » (ligne points). Ainsi, un individu de 1.90m satisfera à hauteur de 0.85 le critère « grand » alors qu'il ne sera considéré appartenir à la classe « très grand » qu'à hauteur de 0.5. Les fonctions d'agrégation ci-dessus peuvent être également généralisées avec des coefficients de pondération ou poids pour introduire les dissymétries de façon naturelle ou du moins plus commune [Dubois, 83; Dubois *et al.*, 85], mais c'est ce que nous verrons dans la sous-section suivante.

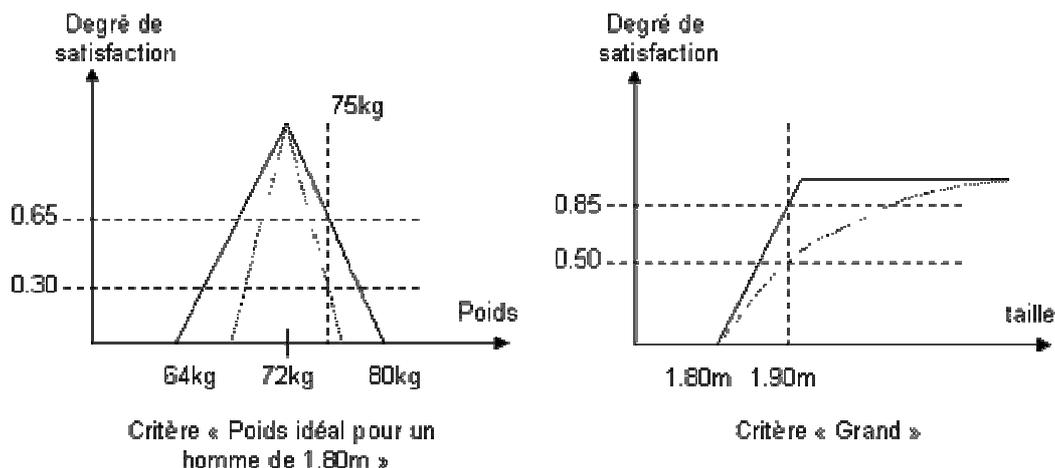


Figure 61 : fonction d'appartenance du critère « poids idéal pour un homme de 72 kg » (a) Fonctions d'appartenance des critères « grand » et « très grand » (b)

III.2.3.3 Groupes non homogènes

Très souvent, on peut admettre que les différents critères selon lesquels on évalue les alternatives n'ont pas tous la même importance (tous les critères n'ont pas le même poids dans la procédure de vote). Une façon naturelle de modéliser cet aspect est d'affecter un poids w_j à chaque critère. Le problème du choix collectif est alors de trouver des fonctions d'agrégation qui agissent sur l'ensemble des profils d'intensité de préférence **pondérés**.

La notion d'importance relative des critères (le sens accordé à la notion d'importance restant par ailleurs souvent *vague* dans la littérature) conduit naturellement à introduire des distributions de poids sur les critères dans le cadre de la théorie précédente :

$$\forall s^k \in S, h(s^k) = \sum_{i=1}^p p_i u_i^k \tag{2}$$

La notion de poids peut être transposée sur de nombreux opérateurs d'agrégation comme évoqués dans la sous-section précédente dès lors que l'opération présente une structure additive sous-jacente [Dubois *et al.*, 84]. Ainsi, lorsque h est de la forme $\Psi^{-1}(\Psi(.) + \Psi(.))$, une extension de l'équation (2) peut être proposée :

$$\bar{h}(u_1, \dots, u_n) = \Psi^{-1}\left(\Psi \sum_{i=1}^p p_i \Psi(u_i)\right) \text{ où } \sum_{i=1}^p p_i = 1 \tag{3}$$

A titre d'exemple, pour le produit, en posant $\Psi = \text{Log}$, on obtient : $\bar{h}(s^k) = \prod_{i=1}^p (u_i^k)^{p_i}$.

[Cholewa, 85] décrit une série d'axiomes que les agrégations pondérées doivent vérifier et propose la moyenne arithmétique pondérée comme fonction d'agrégation typique satisfaisant ces axiomes. [Montero, 89] justifie cette règle comme étant celle qui maximise la décision relative des critères d'évaluation, proportionnellement à l'importance de chaque critère.

Une interprétation du poids peut être la pertinence du critère dans le processus de sélection. Ce niveau de pertinence peut agir en tant que contrainte sur les intensités de préférence qu'un critère peut exprimer. Par exemple, on peut souhaiter qu'un critère ne puisse pas entraîner l'acceptation ou le rejet complet des alternatives. Étant par essence antidémocratique, ce type de poids n'est pas adapté aux règles de type majorité, mais peut être utile pour limiter l'influence d'un critère dictateur ou d'un critère veto, en interdisant des classements extrêmes quand l'influence de certains critères doit être restreinte. Par exemple, si $\varphi(u_1^k \dots u_p^k) = \min_{i=1..p} u_i^k$ alors n'importe quel critère a un droit de veto, mais ce

droit devient limité avec l'agrégation pondérée $\varphi(u_1^k \dots u_p^k, w_1 \dots w_p) = \min_{i=1..p} \max(w_i, u_i^k)$ où le critère i ne peut pas exprimer un niveau d'intensité plus petit que w_i , $\min_{i=1..p}(w_i) = 0$. La règle duale pour la dictature est : $\varphi(u_1^k \dots u_p^k, w_1 \dots w_p) = \max_{i=1..p} \min(w_i, u_i^k)$, où $\max_{i=1..p}(w_i) = 1$.

Les règles de majorité peuvent s'obtenir en utilisant la notion de moyenne ordonnée pondérée (OWA pour Ordered Weighted Average) introduite par [Yager, 88]. L'idée est d'utiliser un ensemble de poids w_1, \dots, w_p qui ne sont pas a priori affectés à des critères ; par exemple, les plus hauts poids sont affectés aux critères exprimant les plus hautes intensités de préférence pour une alternative donnée. D'autres modèles de majorité flous ont été proposés dans [Kacprzyk, 87; Zadeh, 83]. Les règles d'unanimité restreintes diffèrent des règles de majorité quantifiées en ne permettant pas de compensation entre les critères. C'est une altération de la règle du minimum selon laquelle une alternative est collectivement approuvée si tous les critères approuvent séparément cette alternative [Koning, 90].

III.2.3.4 Interactions entre critères

Un des aspects significatifs dans les problèmes d'agrégation est donc la prise en compte de l'importance des attributs ou critères considérés, laquelle est habituellement modélisée par l'utilisation de poids, et jusqu'à récemment, les fonctions les plus utilisées étaient les moyennes pondérées. Cependant, ces fonctions présentent certaines faiblesses, puisque aucune d'elles n'est capable de modéliser une quelconque interaction entre attributs ou critères. En effet, il est bien connu en théorie de l'utilité multi-attribut (MAUT) que ces fonctions conduisent à **l'indépendance préférentielle mutuelle** [Keeney *et al.*, 76] parmi les critères, qui exprime, dans un certain sens l'indépendance des critères. Comme ces fonctions ne sont pas appropriées en présence de critères interdépendants, la tendance a été de construire des critères censés être indépendants, ce qui entraînait souvent des erreurs dans les évaluations.

Dans le but d'obtenir une représentation flexible des phénomènes complexes d'interaction parmi les critères, il est utile de substituer au vecteur poids (dans le cas additif) une fonction d'ensemble non additive, appelée mesure floue, un concept introduit en aide à la décision en 1974 par Sugeno [Sugeno, 74]. Ces mesures permettent ainsi de définir une importance relative non seulement pour chaque critère, mais aussi sur chaque sous-ensemble de critères. On appelle mesure floue (mesure non-additive, capacité) sur C , une application d'ensemble $\mu : P(C) \rightarrow [0,1]$ satisfaisant les axiomes :

$$\mu(\emptyset) = 0 ; \mu(C) = 1 ;$$

$$\forall S, T \subset C / S \subset T \Rightarrow \mu(S) \leq \mu(T) \text{ (Monotonie).}$$

Dans le contexte d'analyse multicritère, le coefficient $\mu(K)$, pour $K \subseteq C$, est interprété comme le poids ou l'importance de la coalition des critères de K . Ainsi, en plus de la distribution de poids usuels sur les critères pris individuellement, des « poids » sur toute combinaison de critères sont également définis. L'axiome de monotonie (moins fort que le classique axiome d'additivité) signifie alors simplement que le fait d'ajouter un critère à une combinaison ne peut faire décroître l'importance de celle-ci. Les intégrales floues sont des intégrales d'une fonction par rapport à une mesure non additive, et donc permettant d'intégrer les mesures introduites ci-dessus. Parmi celles-ci, outre les propriétés usuelles des opérateurs d'agrégation, et la modélisation de l'importance relative des critères, la famille de **l'intégrale de Choquet** a la distinction de permettre la représentation de phénomènes d'interaction mutuelle qui peuvent exister entre certains critères. Les interactions s'étendent de la synergie négative (interaction négative) à la synergie positive (interaction positive). On trouve une littérature assez abondante sur les mesures et intégrales floues, ainsi que sur leurs applications, voir par exemple [Sugeno *et al.*, 77] ; [Grabisch *et al.*, 95 ; 98 ; 00], [Marichal, 98] ; [Murofushi *et al.*, 91 ; 93] ; [Akharraz., 04] ; [Denguir, 07].

III.2.3.5 Conclusion

[Dubois *et al.*, 06] propose un modèle très général des situations où plusieurs experts expriment leur avis sur la valeur d'alternatives selon un référentiel de critères donné, les critères n'ont pas tous la même importance relative, les experts n'ont pas tous le même degré de fiabilité pour une dimension de l'évaluation donnée, les scores relatifs aux critères et les degrés de confiance accordés aux experts peuvent être exprimés qualitativement, variés d'un domaine à l'autre. Même si ce modèle doit rester une référence parce qu'il permet d'introduire dans un processus d'évaluation multicritère et multi acteurs tous les paramètres susceptibles d'intervenir, il nous est apparu bien difficile d'obtenir l'ensemble de ces paramètres dans le processus particulier d'ESCOTA. Même si dans ce modèle les paramètres ne sont définis que qualitativement, leur sémantique offre de trop nombreuses nuances qui, une fois « agrégées », « fusionnées » limitent les possibilités de justification des choix. Qui plus est, faire intervenir des niveaux de confiance en des experts métiers peut difficilement être compatible avec un processus d'évaluation par un collectif d'acteurs où doivent régner partage des responsabilités et transparence des logiques de décision.

L'agrégation multicritère est l'outil mathématique qui supporte tout processus d'évaluation en urgence et en priorité dans SINERGIE. Les opérations sont cotées selon chacun des critères du COP (resp. le chef de SVS). Un opérateur d'agrégation est affecté à chaque métier d'ESCOTA autrement dit à chaque COP (resp. au chef de SVS). Cet opérateur dans l'outil logiciel SINERGIE, aujourd'hui, est une somme pondérée. Identifier l'un de ces opérateurs d'agrégation revient donc à déterminer le vecteur des poids accordés à chacun des critères par le COP (resp. le chef de SVS). Nous ne prétendons pas à l'heure actuelle, avec le retour d'expérience encore limité que nous avons quant à l'usage de l'outil dans la pratique de la gestion du patrimoine, que l'opérateur moyenne pondérée (MP) soit le modèle le plus adéquat. La MP a pour avantage de faire appel à des notions familières chez les utilisateurs de SINERGIE comme l'importance relative des critères et de pouvoir ainsi introduire le processus d'évaluation multicritère en urgence (resp. en priorité) basé sur l'agrégation sans qu'il y ait de réticences vis-à-vis de la mathématique sous-jacente. L'objectif de cette première version est davantage de tester l'usage de SINERGIE et l'impact de l'outil informatique sur la gestion du patrimoine que d'identifier finement les modèles d'agrégation optimaux.

III.3 Identification expérimentale des paramètres et échelles d'évaluations

III.3.1 Macbeth

Il existe plusieurs méthodes pour construire un opérateur d'agrégation de type moyenne pondérée (MP). AHP (*Analytic Hierarchy Process*) est probablement la plus connue d'entre elles dans l'industrie [Saaty, 80]. Toutefois, la méthode Macbeth [Bana e Costa *et al.*, 94] (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*), parce qu'elle garantit une cohérence globale entre la construction des échelles des critères d'évaluation et l'identification des paramètres de la MP, pourrait s'imposer dans les années à venir. De plus, une version étendue de Macbeth a été proposée dans [Clivillé, 04].

Dans les paragraphes précédents, une hypothèse importante a été faite quant à la nature des échelles utilisées pour les scores partiels : les opérateurs utilisent des échelles cardinales. Nous discuterons de cette hypothèse dans la section suivante. Mais pour l'heure, revenons en quelques mots sur la définition d'échelles ordinales et cardinales.

Soit un ensemble fini d'éléments X . On dit qu'on a une information ordinale lorsqu'on est capable de ranger les éléments X par satisfaction décroissante. Disposer d'une information ordinale sur les préférences des éléments de X signifie qu'on peut associer un nombre $n(x)$ à tout élément x de X satisfaisant les conditions :

$$\forall x, y \in X : [xPy \Leftrightarrow n(x) > n(y)] \quad (4)$$

$$\forall x, y \in X : [xIy \Leftrightarrow n(x) = n(y)] \quad (5)$$

où la relation P « est plus attractif que » est antisymétrique et la relation I « est aussi attractif que » est une relation d'équivalence. Un exemple pour $n(x)$ est de prendre le nombre d'éléments de X rangés après x . $n(x)$ définit une échelle ordinale.

Sur la base de cette information ordinale, il peut être possible de construire une échelle d'intervalles en recueillant sous forme de différences les intensités de préférence entre les éléments de X :

$$n(x) - n(y) = k\alpha, k \in N \quad (6)$$

où k caractérise l'intensité de préférence et α permet de respecter les bornes du domaine (par exemple $[0,1]$). L'échelle d'intervalle est obtenue par résolution d'un système d'équations de type (4), (5) et (6) complétées (si possible) par la comparaison des expressions aux valeurs extrêmes 0 et 1 du domaine $[0,1]$: $1 - n(x) = k\alpha$ et $n(x) - 0 = k\alpha$ [Clivillé, 04]. Lorsque le système est juste déterminé (le nombre d'inconnues est égal au nombre d'équations indépendantes), il s'agit d'un système de Gauss. Si le nombre de contraintes est supérieur au nombre d'inconnues, le problème se résout par programmation linéaire.

Le problème de la commensurabilité des dimensions à agréger constitue le cœur de la méthode Macbeth. L'agrégation ne peut être envisagée que si les échelles relatives aux critères agrégés sont commensurables [Clivillé, 04]. Cette vérification doit précéder la procédure d'agrégation.

Une fois établies les échelles cardinales commensurables à agréger, la méthode Macbeth permet ensuite de déterminer les poids de la moyenne pondérée sur le même principe : en effet, les poids affectés aux critères définissent eux-mêmes une échelle d'intervalle (le poids d'un critère i n'est autre qu'une valeur particulière de la moyenne pondérée appliquée au vecteur $[0 \dots 0 \underset{i^{\text{ème position}}}{1} 0 \dots 0]$).

En pratique, on construit d'abord les échelles d'intervalle pour l'ensemble des critères à agréger. A cet effet, il est nécessaire de comparer par paire des alternatives, constituant une base d'apprentissage, selon le critère dont on cherche à établir l'échelle d'évaluation. Puis, un classement des critères en termes de priorité est établi. A ce stade, l'information est purement ordinale. Ensuite, les critères sont comparés deux à deux. La comparaison par paire des critères consiste à quantifier la différence d'importance relative entre les deux critères en jeu. Cette différence est exprimée dans une échelle finie d'étiquettes : par exemple, "équivalent", "faible", "forte" et "extrême". L'ensemble de contraintes associées (voir les équations (4), (5) et (6) précédentes) définit dans le cas général un problème de programmation linéaire résolu par Macbeth. La solution de ce problème fournit l'échelle cardinale des poids de critère.

Sur l'exemple de la Figure 62, Macbeth est appliquée pour identifier les poids des 8 critères utilisés par le COP responsable des Chaussées. La base d'apprentissage est constituée de 10 opérations réputées représentatives des différents cas de figure que rencontre régulièrement le COP. Pour construire la table présentée, on utilise d'abord l'information ordinale qui a permis de classer les critères du plus important au moins important. En pratique, il est rare de remplir l'intégralité de la partie supérieure de la matrice symétrique de comparaison. En effet, parce que les critères ont été rangés dans la table par ordre décroissant, on se contente généralement de remplir les cases juste au-dessus de la première diagonale : on ne compare que les poids de rang i et $i+1$ et l'étiquette **positive** que l'on affecte partout ailleurs dans la matrice indique simplement une contrainte **molle** qui signifie que le poids du critère i est supérieur à celui du critère $i+k$ (tableau inférieur de la Figure 62). Les contraintes à satisfaire sont ainsi moins sévères et on évite les erreurs de cohérence (transitivité en particulier) lors de la comparaison paire par paire. L'échelle d'intervalle des poids p_i du COP Chaussée, ($i = 1..8$) identifiée par Macbeth est donnée dans la partie supérieure de la Figure 62.

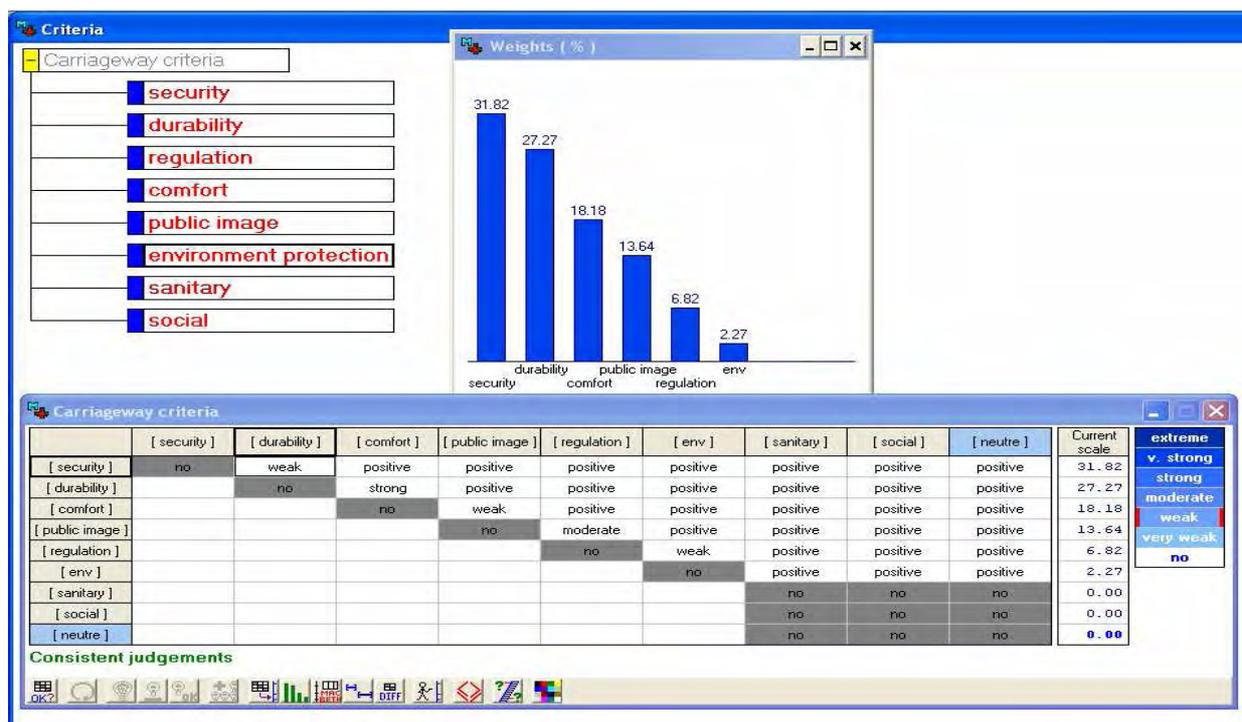


Figure 62 : Macbeth – la comparaison paire par paire des critères et identification des poids

Ce qu'il est intéressant de retenir de cette approche pour l'identification des paramètres de l'opérateur d'agrégation est qu'elle repose sur une interview du « décideur ». On est bien loin des techniques d'optimisation (d'identification) évoquées dans la section précédente sur des familles paramétrées. Là, le décideur est associé au processus d'identification de l'opérateur d'agrégation.

Nous avons utilisé une version de démonstration de Macbeth pour calculer les échelles d'intervalle de chaque critère utilisée dans l'application logicielle de SINERGIE aujourd'hui. L'expertise requise auprès des COP ou du Chef de SVS pour paramétrer l'outil, en particulier les poids des critères, s'est avérée une entreprise très concluante. Une identification calculatoire sur base de données ou bien un questionnaire direct sur la valeur des poids aurait vraisemblablement été mal perçu : dans le premier cas à cause de l'absence totale d'expertise ; dans le second, l'importance relative d'un critère n'est pas une connaissance experte directement manipulée par un COP lors de ses évaluations, elle reste une connaissance tacite jamais explicitée en dehors du contexte SINERGIE. La comparaison par paire sur une base d'opérations choisies au préalable par le COP (resp. le chef de SVS) constitue une technique d'interview indirecte qui a permis d'explicitier cette connaissance tacite des experts sans obstacle méthodologique (indépendamment de la notion mathématique d'Importance Relative des Critères, IRC) et sans que l'expert voie son référentiel de connaissances remis en cause. Son savoir « direct » est utilisé dans la comparaison par paire, la transcription de son analyse de la base d'apprentissage en termes de paramètres pour l'agrégation est transparente pour lui, par contre il valide les paramètres de l'opérateur d'agrégation sur les résultats de l'évaluation en urgence des opérations de la base.

III.3.2 Échelles d'évaluations et cotations discrètes

Dans la sous-section précédente, nous avons fait l'hypothèse que les scores attribués aux opérations selon un référentiel de critères donné relevaient d'échelles cardinales. Compte tenu des fortes sources d'imprécision et d'incertitude qui affectent le système de cotation, il n'est vraisemblablement pas nécessaire de définir des échelles de cotation fines. Cette réflexion nous conduit à nous poser la question de l'agrégation multicritère lorsque les scores sont imprécis ou définis sur des échelles qualitatives finies. Nous pensons qu'il est utile de préciser quelques points en insistant sur les erreurs potentielles dans un processus d'évaluation multicritère nécessitant l'attribution de tels scores. Le premier point présenté dans cette sous-section aborde le problème de cohérence entre une agrégation qui, a priori, nécessite en entrée des scores numériques et des systèmes de cotation dont les valeurs sont de type énumératif (*Exemple* : {nul, passable, moyen, bien, excellent}). Le second

point qui sera exposé dans la sous-section suivante traite de l'imprécision des scores attribués et de leur gestion dans la procédure d'agrégation. Ces deux points de vue se rejoignent dans notre problématique puisqu'ils constituent deux alternatives possibles pour le système de cotation des COP et du chef de service SVS : soit on considère que les cotations sont des valeurs imprécises et on les gère comme telles (environ 10, autour de 12, etc.), soit on définit une échelle finie de scores qualitatifs (bien, acceptable, satisfaisant, etc.) dont la granularité est plus en accord avec les moyens dont dispose l'expert pour attribuer son score.

III.3.2.1 Opérateur moyenne et échelles discrètes finies [Grabisch, 06]

L'agrégation des scores partiels par une MP sur des échelles continues ne pose pas de problème particulier une fois que les échelles d'évaluation ont été établies et les paramètres de la MP identifiée. Il suffit d'appliquer :

$$MP(u_1, \dots, u_p) = \sum_{i=1}^p p_i u_i = u_{Ag} \quad (7)$$

Le processus devient moins naturel lorsque les scores partiels sont exprimés sur des échelles discrètes ou finies.

Dans de nombreuses activités d'ingénierie, on est amené à attribuer des notes ou cotations. Ces scores s'expriment généralement en langage naturel—des étiquettes symboliques, ce qui soulève un nouveau problème lorsque, ensuite, ces scores sont utilisées dans diverses opérations mathématiques [Jullien *et al.*, 06][Grabisch, 06]. Pour effectuer une moyenne pondérée, classiquement, ces étiquettes sont converties en valeurs numériques afin que la MP des scores partiels puisse être calculée. Aucune attention particulière n'est bien souvent prêtée à cette conversion symbolique / numérique en pratique. Pourtant, les conséquences sur les résultats de l'agrégation par MP ne sont généralement pas négligeables.

Comme nous l'avons déjà évoqué, chez les ingénieurs, la culture des chiffres est fortement développée. Les gens manipulent communément des étiquettes symboliques et s'autorisent, lorsque nécessaire, à les convertir en valeurs numériques plus ou moins arbitrairement, sans plus de précaution pour pouvoir procéder à toutes sortes de calculs. Ces considérations « culturelles » permettent de mieux appréhender pourquoi une modélisation de type agrégation multicritère est souvent préférée à une base de règles pour attribuer un score global à une alternative, un projet, etc., bien que les appréciations soient fournies sous la forme d'étiquettes symboliques. Une approche purement symbolique pour une agrégation de type moyenne sur des échelles finies a été envisagée dans [Grabisch, 06]. Nous en donnons le principe et l'illustrons sur un jeu d'opérations à classer en urgence dans le paragraphe qui suit.

Tout d'abord, commençons donc par appliquer la méthode proposée par Grabisch [Grabisch, 06] afin de vérifier qu'il existe bien un opérateur de type moyenne cohérent avec le classement des opérations.

Il s'agit là simplement de synthétiser les résultats de [Grabisch, 06]. L'auteur cherche à modéliser les préférences d'un décideur par un opérateur moyenne.

Il considère un ensemble fini E de k éléments $e_1 < e_2 < \dots < e_k$ et $A \subseteq E^p$. Une alternative est décrite par son profil de performances : $a = (a_1, a_2, \dots, a_p) \in A$. On note la relation d'ordre « a est préférée à b » par aPb . On définit encore la relation d'équivalence (indifférence) $I : aIb \Leftrightarrow aPb \vee bPa$. Les classes d'équivalence de I sont notées A_1, A_2, \dots, A_k . (A, P, E) est appelé le profil de décision.

Grabisch rappelle ensuite qu'un opérateur moyenne (de compromis) est défini de la façon suivante :

$$\min_{i=1}^p a_i \leq M(a_1, a_2, \dots, a_p) \leq \max_{i=1}^p a_i, \forall (a_1, a_2, \dots, a_p) \in E^p$$

$$\forall i \in \{1, \dots, p\}, a_i > a_i' \Rightarrow M(a_1, a_2, a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_p) \geq M(a_1, a_2, a_{i-1}, a_i', a_{i+1}, \dots, a_p)$$

Il pose alors le problème suivant : quelles sont les conditions nécessaires et suffisantes pour qu'il existe un opérateur moyenne M qui vérifie pour toute paire d'alternatives a et b , $aPb \Leftrightarrow M(a) \geq M(b)$.

Les alternatives sont affectées à une classe A_j selon leur évaluation globale. Les classes sont ordonnées du rang 1 au rang k' avec k' le nombre de termes de l'échelle finie de l'évaluation globale. Les concepts principaux utilisés dans la recherche de l'opérateur moyenne sont les suivants :

- le noyau de chaque classe A_j noté $K_j : K_j := \left[\min_{a \in A_j} \max_{i=1}^p a_i, \max_{a \in A_j} \min_{i=1}^p a_i \right]$ avec a_i l'évaluation pour le critère i d'une alternative appartenant à la classe A_j ;

- la plage des valeurs autorisée notée $\langle A_j \rangle : \langle A_j \rangle := \left] \underline{A}_{<j}, \overline{A}_{>j} \right]$ avec $\underline{A}_{<j} = \max_{j' < j} \max_{a' \in A_{j'}} \min_{i=1}^p a_i^{j'}$ et $\overline{A}_{>j} = \min_{j' > j} \min_{a' \in A_{j'}} \max_{i=1}^p a_i^{j'}$;

- l'intérieur de la classe A_j noté $\left[A_j^o \right] := \left[\underline{A}_j \right] \cap \langle A_j \rangle$ avec $\left[\underline{A}_j \right] := \left[\min_{a \in A_j} \min_{i=1}^p a_i, \max_{a \in A_j} \max_{i=1}^p a_i \right]$ (cf. Figure 63).

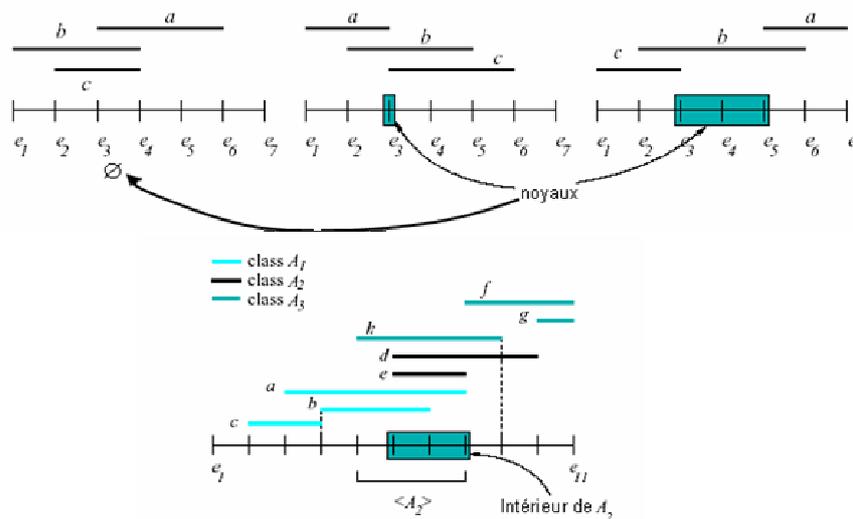


Figure 63 : calcul de noyaux (a), gamme des valeurs autorisées et intérieur pour $k=7, k'=3$ et $a, b, c \in A_1, d, e \in A_2, f, g, h \in A_3$ (b) (d'après [Grabisch, 06])

Pour vérifier qu'il existe bien un opérateur de type moyenne qui permette de rendre compte des préférences du décideur il faut que :

- le profil de décision soit cohérent⁶ ;
- pour tout j et j' tels que $j > j'$ et les noyaux de A_j et $A_{j'}$, non vides, le nombre d'éléments de $\left[\max(K_{j'}), \min(K_j) \right]$ soit supérieur ou égal à $j - j' + 1$;

⁶ Un profil de décision est dit cohérent lorsque pour aucune paire d'alternatives a et b , on a à la fois a est globalement préféré à b alors que tous les scores partiels de a sont inférieurs à ceux de b .

- Pour tout j , l'intérieur de A_j ne soit pas vide ;
- Pour tout j et j' tels que $j \succ j'$, le nombre d'éléments de $\left[\min(\underline{A}_{j'}), \max(\underline{A}_j) \right]$ soit supérieur ou égal à $j - j' + 1$;
- Le noyau K_j contienne au plus un élément.

Les expressions qui suivent permettent de calculer l'opérateur moyenne pour une alternative de la classe j :

- Si le noyau n'est pas vide : $M(a_1^j, a_2^j, \dots, a_p^j) := K_j \cap \left[\min_{i=1}^p a_i^j, \max_{i=1}^p a_i^j \right]$
- Si le noyau est vide, alors :

$$M(a_1^j, a_2^j, \dots, a_p^j) := \max K_{j-1}, \min K_{j+1} \left[\cap \underline{A}_j \right] \cap \left[\min_{i=1}^p a_i^j, \max_{i=1}^p a_i^j \right]$$

Afin d'illustrer la méthode exposée ci-dessus, nous proposons de l'appliquer à un jeu d'opérations à évaluer en urgence. Nous rappelons la liste des critères d'évaluation en urgence indépendamment du métier :

- Sécurité
- Pérennité
- Réglementation
- Confort
- Image de marque
- Protection de l'environnement
- Social organisation
- Sanitaire

Les urgences sont exprimées sur une échelle discrète finie : les notes selon chaque critère appartiennent à $\{U_1, U_2, U_3, 0\}$ avec $U_1 \geq U_2 \geq U_3 \geq 0$. L'échelle de l'évaluation globale est $\{U_1, U_2, U_3\}$ (une évaluation en urgence de 0 n'aurait aucun sens : l'opération ne serait jamais remontée au niveau de SVS).

Intéressons nous plus particulièrement au domaine de gestion du patrimoine Chaussées pour lequel l'expert métier a évalué 49 opérations (23 sur un banc de tests réels (tableau supérieur) et 26 opérations fictives (tableau inférieur)). Selon chaque critère, il a attribué une note appartenant à $\{U_1, U_2, U_3, 0\}$, puis a estimé la note globale en U_1, U_2 ou U_3 . Le Tableau 8 fournit cette base d'opérations avec leurs scores partiels et leur évaluation globale.

Opérations	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23
Pérennité																							
Sécurité																							
Confort																							
Image de marque																							
Protection de l'env.					0	0																	
Réglementation																							
Social	0	0	0	0	0	0				0	0									0	0	0	0
Sanitaire	0	0	0	0	0	0				0	0	0	0							0	0	0	0
Global																							

légende ■ U1
■ U2
■ U3
0 0

Vecteurs fictifs

Opérations	F24	F25	F26	F27	F28	F29	F30	F31	F32	F33	F34	F35	F36	F37	F38	F39	F40	F41	F42	F43	F44	F45	F46	F47	F48	F49
Pérennité																										
Sécurité																										
Confort																										
Image de marque																										
Protection de l'env.																										
Réglementation																										
Social	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0														
Sanitaire	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0															
Global																										

Tableau 8 : évaluations en urgence domaine Chaussées

La Figure 64 ci-dessous représente les classes d'évaluation à l'instar de la Figure 63. Chaque « trait » représente la plage de variations des scores partiels attribués à une opération. Les opérations ayant la même plage de variations de scores partiels sont regroupées pour chacune des classes d'évaluation globale en urgence : si l'on s'en réfère à leur plage d'évaluations partielles, il existe ainsi deux types d'opérations en U_3 , trois en U_2 et U_1 .

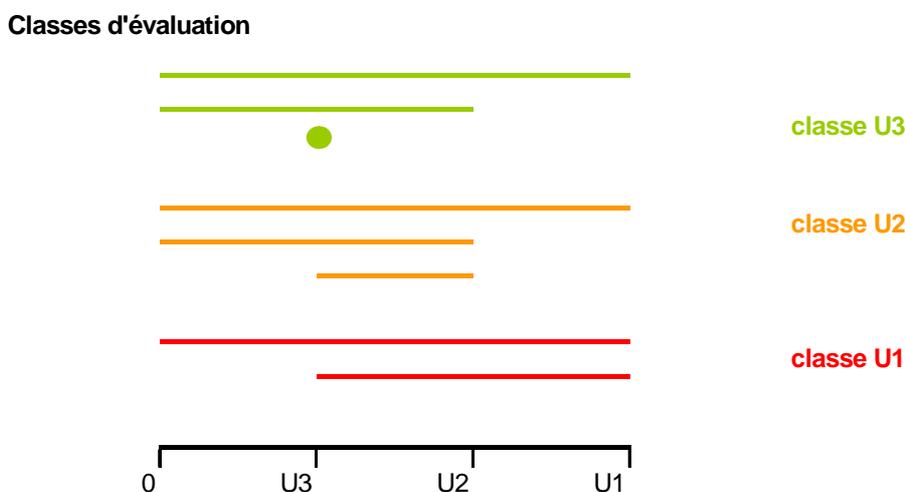


Figure 64 : représentation des classes d'évaluation sur la base d'opérations

Calcul des noyaux

Le noyau de la classe U_j , est noté K_j . On a : $K_1 = K_2 = \emptyset$ et $K_3 = \{U_3\}$. La figure 4 illustre le calcul des noyaux sur la base. Pour les classes U_1 et U_2 la borne supérieure est inférieure à la borne inférieure dans le calcul du noyau : le noyau est vide.

$$K_j = \left[\min_{u \in U_j} \max_{i=1}^p u_i, \max_{u \in U_j} \min_{i=1}^p u_i \right] \text{ avec } u_i \text{ l'évaluation selon le critère } i \text{ d'une opération appartenant à la classe } U_j.$$

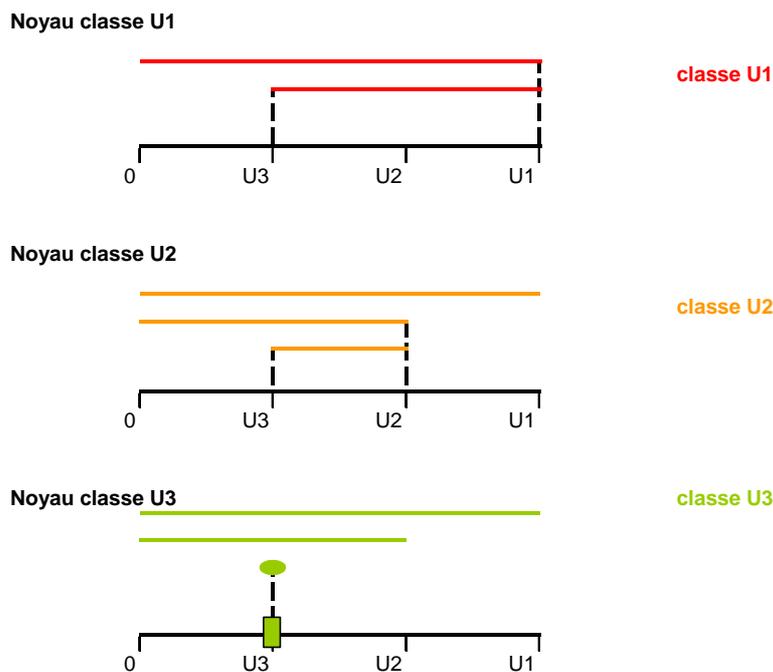


Figure 65 : calcul du noyau

Les noyaux de U_1 et U_2 sont vides. Pour trouver un noyau non vide, il faut qu'il existe dans la classe deux alternatives ayant leur support disjoint, ou coïncidant seulement en un point : c'est le cas de la classe U_3 .

Calcul de la plage de valeurs autorisées

La plage des valeurs autorisées de la classe U_j est notée $\langle U_j \rangle$:

$$\langle U_j \rangle :=] \underline{U}_{<j}, \overline{U}_{>j} [\quad \text{avec} \quad \underline{U}_{<j} = \max_{j' < j} \max_{u^{j'} \in U_{j'}} \min_{i=1}^p u_i^{j'} \quad \text{et} \quad \overline{U}_{>j} = \min_{j' > j} \min_{u^{j'} \in U_{j'}} \max_{i=1}^p u_i^{j'}$$

Les calculs pour chacune des trois classes U_j , $j = 1, \dots, 3$ donnent :

$$\langle U_1 \rangle =] U_3, U_1 [$$

$$\langle U_2 \rangle =] U_3, U_1 [$$

$$\langle U_3 \rangle =] 0, U_2 [$$

Calcul de l'intérieur

L'intérieur de la classe U_j noté $\overset{\circ}{U}_j$ est donné par :

$$\overset{\circ}{U}_j := \underline{U}_j \cap \langle U_j \rangle \quad \text{avec} \quad \underline{U}_j := \left[\min_{u \in U_j} \min_{i=1}^p u_i, \max_{u \in U_j} \max_{i=1}^p u_i \right]$$

Nous obtenons les résultats suivants :

$$\begin{aligned} \underline{U}_1^{\circ} &= \underline{U}_1 \cap \langle U_1 \rangle = [0, U_1] \cap]U_3, U_1[=]U_3, U_1[\\ \underline{U}_2^{\circ} &= \underline{U}_2 \cap \langle U_2 \rangle = [0, U_1] \cap]U_3, U_1[=]U_3, U_1[\\ \underline{U}_3^{\circ} &= \underline{U}_3 \cap \langle U_3 \rangle = \{U_3\} \cap]0, U_2[= \{U_3\} \end{aligned}$$

Pour vérifier qu'il existe bien un opérateur de type moyenne, on vérifie que les conditions du théorème exposé ci-dessus sont vérifiées.

Les noyaux sont vides ou contiennent au plus un élément (Figure 65). Pour tout j , l'intérieur de U_j n'est pas vide (Tableau 9). Pour tout j et j' tels que $j \succ j'$ (attention les indices des notations en urgence sont de la forme $k = inv(k')$), le nombre d'éléments de $[\min(\underline{U}_{j'}^{\circ}), \max(\underline{U}_j^{\circ})]$ est supérieur ou égal à $j - j' + 1$: le nombre d'éléments de $[\min(\underline{U}_2^{\circ}), \max(\underline{U}_1^{\circ})] = 3 \geq 2$, $[\min(\underline{U}_3^{\circ}), \max(\underline{U}_2^{\circ})] = 3 \geq 2$ et $[\min(\underline{U}_3^{\circ}), \max(\underline{U}_1^{\circ})] = 3 \geq 3$ (Tableau 9). Il existe donc bien un opérateur d'agrégation de type moyenne qui satisfasse l'ensemble des préférences exprimées sur la base d'apprentissage.

	Noyau	Plage	Intérieur
U_1	\emptyset	$]U_3, U_1[$	$]U_3, U_1[$
U_2	\emptyset	$]U_3, U_1[$	$]U_3, U_1[$
U_3	$\{U_3\}$	$]0, U_2[$	$\{U_3\}$

Tableau 9 : noyaux, plages et intérieurs des classes U_i pour la base d'apprentissage

La méthode proposée par Grabisch n'est pas simple à mettre en œuvre. La détermination de l'opérateur moyenne dépend de la qualité et de la diversité des vecteurs de la base d'apprentissage. Elle rejoint l'idée de substituer à l'agrégation une base de règles symboliques et, finalement, requiert en entrée un grand nombre de vecteurs échantillons pour que l'opérateur de moyenne symbolique puisse être identifié de manière fiable. Si dans l'application que propose [Jullien *et al.*, 06], le nombre d'individus échantillons est extrêmement élevé et l'identification de l'opérateur moyenne ne pose pas de problème, dans notre cas, la construction de l'opérateur apparaît moins fiable parce que résolue sur un faible nombre d'échantillons, qui plus est, non nécessairement représentatif de l'ensemble de l'espace d'évaluation. En effet, nombre d'opérations vont reposer sur des diagnostics semblables ou du moins voisins qui ne laissent donc apparaître qu'un nombre de cas de vecteurs d'évaluation limité (dans la pratique, les opérations concernent un nombre fini de défauts que l'on retrouve de façon récurrente dans un des métiers).

Nous avons néanmoins décidé d'implémenter cette méthode d'agrégation symbolique dans l'outil SINERGIE en parallèle des approches plus numériques que nous détaillons dans ce chapitre. SINERGIE propose donc une version « symbolique » de l'identification de l'opérateur moyenne et du calcul des niveaux d'urgence et de priorité. Nous expliciterons donc une version « symbolique » et une version « numérique » de chacune des notions mathématiques qui supportent mathématiquement SINERGIE (importance relative des critères, sensibilité et robustesse) lorsque nous les introduirons dans la suite de ce chapitre. Nous comparerons systématiquement les résultats de chaque fonctionnalité selon qu'elle s'appuie sur l'approche symbolique ou l'approche numérique de l'opération d'agrégation.

La sous-section III.3.2.2 qui suit développe l'approche numérique que nous avons finalement retenue (par défaut dans SINERGIE) pour résoudre ce problème de cotations discrètes dans un opérateur d'agrégation [Sanchez *et al.*, 07].

III.3.2.2 Cotations symboliques et agrégation

Du symbolique vers le numérique

Illustrons le problème de l'agrégation avec des échelles finies sur un exemple. Supposons que l'univers de discours d'un ingénieur de sécurité pour un critère relatif à la gravité de la situation qu'il analyse soit : $\{\text{insignifiant, sérieux, alarmant}\}$. On peut imaginer qu'un ensemble possible de valeurs numériques associées (prises dans $[0,1]$) puisse être : $\{0; 0.5; 1\}$. Derrière cette transposition symbolique / numérique, il y a plusieurs hypothèses concernant la nature de l'échelle. Remarquons simplement ici que les valeurs numériques sont usuellement choisies équidistantes. Maintenant, considérons un autre univers de discours : $\{\text{insignifiant, mineur, alarmant}\}$. Cette fois, l'ensemble des valeurs numériques associées $\{0; 0.5; 1\}$ apparaît intuitivement plus discutable. L'ingénieur pourrait lui préférer, par exemple, $\{0; 0.25; 1\}$. Quand les scores partiels (i.e. relatifs aux différents critères) sont agrégés, le résultat de l'agrégation dépend bien sûr fortement du choix de cet ensemble de valeurs numériques. Enfin, il est à noter que, dans tous les cas, la valeur numérique de la MP des scores partiels de l'opération n'appartient pas nécessairement à l'ensemble fini d'origine $\{0; 0.5; 1\}$ ou $\{0; 0.25; 1\}$. Si l'on exige que cette contrainte d'**internalité** soit vérifiée, la valeur de MP doit être convertie en retour en l'étiquette adéquate. C'est ce processus, souvent implicitement mis en place sans beaucoup de rigueur, que nous abordons dans les quelques lignes qui suivent (pour un point de vue purement symbolique le lecteur pourra aussi se reporter à [Rico *et al.*, 07]).

La façon dont sont converties les étiquettes en valeurs numériques (et inversement), ajoutée au problème de la commensurabilité des échelles des différentes dimensions à agréger peut conduire à un classement erroné des alternatives concernées par le processus d'évaluation. Dans cette section, nous proposons une méthodologie pour construire des échelles d'évaluation finies et cohérentes avec la façon dont les paramètres de la *MP* sont déterminés [Sanchez *et al.*, 07]. La méthode Macbeth en est la première phase. Pour résoudre le problème engendré par les échelles finies que les ingénieurs utilisent pour affecter des scores partiels à une opération, il est proposé une méthode qui garantit la rigueur de l'interface entre les appréciations exprimées symboliquement et les calculs purement numériques afférents à l'opération d'agrégation par la *MP*.

Pour une lecture plus simple de cette section, nous allons imaginer un univers de cotation à trois niveaux : $\{U_1, U_2, U_3\}$, U_1 est le score maximal. Les U_i définissent une échelle discrète cardinale. Or, le calcul de la *MP* requiert des valeurs numériques en entrée, par conséquent des valeurs numériques doivent être affectées à chacune des valeurs de U_i . Dans la suite, nous décrivons la façon dont cette affectation peut être effectuée en cohérence avec une phase préliminaire d'identification d'échelles par Macbeth.

Une échelle continue est d'abord identifiée avec Macbeth pour chaque critère de façon relativement qualitative : c'est-à-dire que l'on a procédé à une comparaison d'alternatives d'un lot d'apprentissage sur la base de ce critère (voir sous-section III.3.2.1). On répartit donc sur l'échelle propre à un critère les différentes alternatives avec Macbeth en utilisant les équations (4), (5) et (6).

Le problème est maintenant d'attribuer, à partir de ce résultat, un ensemble de valeurs numériques $\{u_3^i, u_2^i, u_1^i\}$ aux étiquettes $\{U_1, U_2, U_3\}$ de chaque critère i . Afin de respecter la cotation à trois niveaux, on regroupe ainsi les scores des opérations de la base d'apprentissage en 3 clusters sur chacune des échelles d'évaluation associées aux critères (on choisit ainsi la granularité des scores). Supposons que l'échelle cardinale continue pour chaque critère i ait été identifiée avec un ensemble d'apprentissage de n alternatives s_j (j est l'indice des alternatives, i celui des critères et k celui des étiquettes U_k). Selon chaque critère, les alternatives sont regroupées en trois clusters correspondant à U_1, U_2, U_3 . Le calcul des clusters et de leur centre est réalisé en minimisant l'erreur quadratique :

$\sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^{n_k} (u_k^i - u^i(s_j))^2$ où n_k est le nombre d'alternatives attribuées au cluster U_k et $u^i(s_j)$, $i=1..p$, le score de l'alternative s_j de la base d'apprentissage obtenu avec Macbeth selon le critère i . La minimisation de ce critère donne les valeurs $\{u_3^i, u_2^i, u_1^i\}$, c'est-à-dire les centres des clusters.

Cette affectation est répétée pour chaque critère. Ensuite, la moyenne numérique peut être calculée pour n'importe quelle alternative évaluée en U_1, U_2, U_3 selon les p critères :

- Pour chaque critère i , $i=1..p$, une étiquette U_k est affectée à l'alternative s . Notons ce score partiel $U_{k(i)}$;
- s peut alors être décrite par son vecteur de scores partiels $[U_{k(1)}, \dots, U_{k(p)}]$;
- Le vecteur de valeurs numériques correspondant est : $\{u_{k(1)}^1, u_{k(2)}^2, \dots, u_{k(p)}^p\}$
- Finalement,

$$MP(s) = \sum_{i=1}^p p_i \cdot u_{k(i)}^i \quad (8)$$

Du numérique vers le symbolique

La dernière contrainte à satisfaire est que les valeurs de MP soient converties en retour dans l'univers $\{U_1, U_2, U_3\}$ (contrainte d'internalité). En effet, il est souvent exigé que le score agrégé reste dans le même univers de discours $\{U_1, U_2, U_3\}$. Le résultat dans $[0;1]$ de MP doit être discrétisé dans $\{U_1, U_2, U_3\}$. Le dernier point à résoudre est alors de déterminer les centres des clusters U_k de l'échelle des scores agrégés. Pour cela, notons que la MP est un opérateur idempotent. Par suite, nous avons donc les contraintes symboliques suivantes:

$$\forall U_k, k \in \{1, 2, 3\}, MP(U_k, \dots, U_k) = U_k \quad (9)$$

Une condition suffisante pour que (9) soit satisfaite est que les centres des clusters U_k de l'échelle des scores agrégés soient les images par la MP des centres U_k correspondant des échelles partielles, autrement dit :

$$\forall k \in \{1, 2, 3\}, MP(u_k^1, \dots, u_k^p) = \sum_{i=1}^p p_i \cdot u_k^i = u_k^{Ag} \quad (10)$$

où u_k^{Ag} est le centre de la classe U_k sur l'échelle de scores agrégés.

Par conséquent, quand une alternative s est définie par son vecteur de degrés d'urgence partiels $[U_{k(1)}, \dots, U_{k(n)}]$, l'équation (8) fournit la valeur numérique $MP(s) = \sum_{i=1}^p p_i \cdot u_{k(i)}^i$; puis, l'attribution d'une classe U_k à cette valeur numérique dans l'échelle agrégée est obtenue par la formule suivante :

$$\min_k \left| u_k^{Ag} - \sum_{i=1}^p p_i \cdot u_{k(i)}^i \right| \quad (11)$$

La valeur de k dans $\{1, 2, 3\}$ qui minimise l'expression (11) fournit la classe U_k de centre u_k^{Ag} de l'alternative s . La Figure 66 résume le processus d'évaluation complet d'une alternative s .

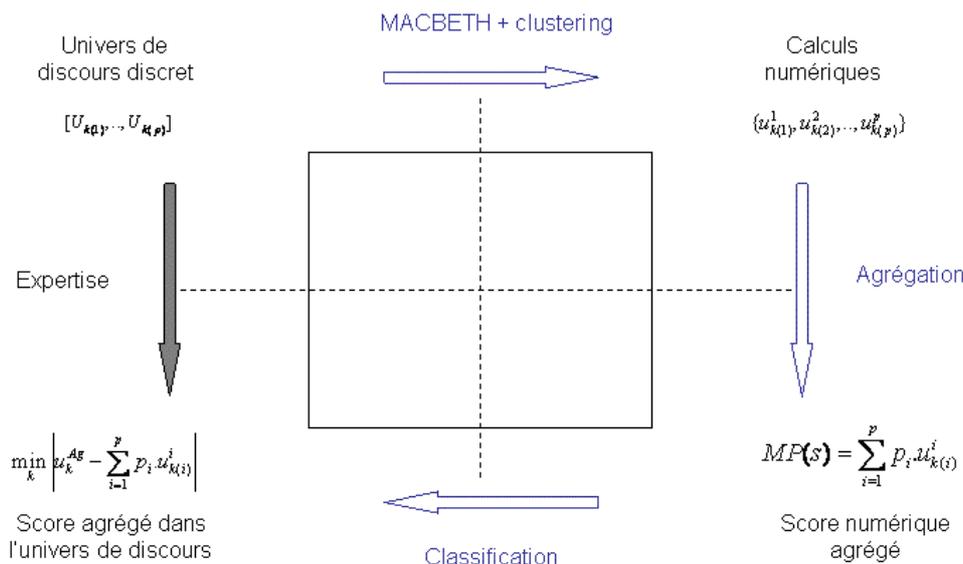


Figure 66 : processus d'évaluation symbolique/numérique

Conclusion

Cette méthode a un caractère qualitatif. Le clustering effectué à la suite de la construction des échelles avec Macbeth fixe la granularité des évaluations : on reconnaît une forme d'imprécision dans le jugement des experts. Sur une base constituée de 23 opérations réelles dans le domaine Chaussées, nous avons comparé la méthode intuitive que nous venons de proposer à l'approche symbolique du paragraphe précédent. Les deux dernières lignes de la table de la Figure 72 montrent que le niveau d'urgence (score agrégé) de chacune des opérations de la base est le même avec l'approche symbolique de Grabisch ou la méthode proposée ici qui couple Macbeth et des techniques élémentaires de clustering. Ce résultat « parfait » s'explique en partie par le manque de finesse des échelles d'évaluations. Pour une comparaison plus approfondie, il eût été intéressant de travailler avec des univers de discours plus fins.

III.3.3 Imprécision des évaluations

Nous avons abordé le problème de la cotation « approximative » sous l'angle de l'interface numérique/symbolique, introduit la notion de granularité des échelles d'évaluation. Le besoin de cette interface s'explique par la difficulté d'attribuer des degrés d'urgence précis aux opérations compte tenu de la qualité et de la quantité des informations dont on dispose. Nous proposons donc dans le paragraphe qui suit une alternative plus formelle pour poser le problème de l'imprécision en utilisant cette fois-ci des scores vagues qui seront modélisés par ses sous-ensembles flous.

Imprécision des scores dans une évaluation multicritère

On souhaite donc ici attribuer formellement des scores imprécis selon chacune des dimensions de l'espace d'évaluation. On retrouve cette problématique sur tous les sites de recommandation qui foisonnent sur le net : les clients affectent des notes à un produit, un site marchand, etc., en se référant à une échelle d'évaluation qui repose sur l'affectation d'un nombre de barres ou d'étoiles à une entité évaluée [Denguir, 07]. La granularité de l'échelle d'évaluation peut être la demie ou le quart de barre ou d'étoile. Personne ne sait très bien ce que signifie précisément la barre ou l'étoile. Chaque internaute évaluateur, dans son système de valeurs, a son interprétation de ce que signifie pour lui un score de 3 barres... La subjectivité de ces interprétations nécessiterait une formulation mathématique rigoureuse du processus de cotation en particulier en ce qui concerne la gestion de l'imprécision des scores. Nous avons proposé dans le cadre d'une application à l'évaluation de sites marchands sur le web une interprétation possibiliste de l'évaluation par une communauté de cyberconsommateurs [Denguir *et al.*, 06 ; Denguir, 07]. Il ne s'agit pas ici de déployer ce que pourrait apporter la théorie des possibilités à la problématique de SVS, mais simplement de juger de l'intérêt de modéliser les scores attribués par les conducteurs d'opération par des sous-ensembles flous, c'est-

à-dire reconnaître le caractère vague des scores et les modéliser comme tels. Il faut voir ce paragraphe comme une extension de la procédure d'évaluation dans une version plus évoluée de SINERGIE.

Les exemples ci-dessous illustrent la modélisation de scores par des sous-ensembles flous (Figure 67).

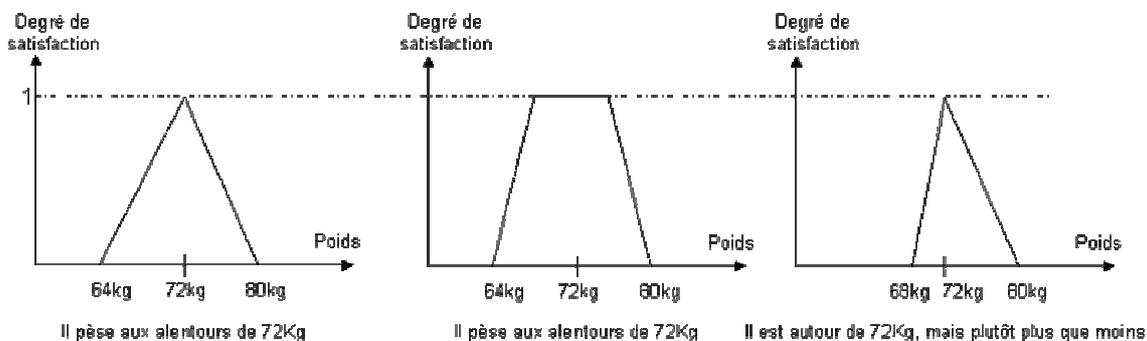


Figure 67 : exemples de scores flous

« Il pèse aux alentours de 72Kg » est une évaluation vague du poids d'un individu donné (précédemment, un score était un réel dans $[0 ; 1]$, perçu comme une évaluation précise, il pouvait être interprété comme la mesure de la satisfaction du critère considéré par l'opération évaluée (cf. Figure 61). L'ensemble flou proposé pour modéliser ce score a une fonction d'appartenance triangulaire symétrique. La valeur précise 72 est l'unique valeur ayant un degré d'appartenance de 1 (un degré de satisfaction). Le noyau de l'ensemble flou est donc le singleton $\{72\}$. Sur le second exemple de nombre flou modélisant ce même score, on a choisi une fonction d'appartenance trapézoïdale : le noyau de l'ensemble flou (les valeurs dont le degré d'appartenance est égal à 1) est un intervalle. Pour le troisième exemple, on souhaite de plus introduire une asymétrie dans le modèle.

Plaçons-nous donc dans le cas où les évaluations partielles en urgence d'une opération sont toutes décrites par des nombres flous comme sur la Figure 67. Il s'agit maintenant d'affecter un score de synthèse à l'opération : ce score sera le résultat par l'opérateur d'agrégation des scores partiels flous. Dans cette perspective, l'agrégation de scores partiels flous revient à propager l'incertitude des scores partiels sur le score global via l'opérateur d'agrégation. Le score global sera un nombre flou lui aussi. Autrement dit, l'imprécision des scores partiels se répercutera sur la note de synthèse. Que le score de synthèse soit un ensemble flou permet de juger de l'imprécision avec laquelle on classe les opérations. Cela n'empêche nullement au final de **déflusser** le score, c'est-à-dire de lui attribuer une valeur précise (une des valeurs du noyau du nombre flou calculé par agrégation), mais on peut accompagner l'évaluation d'un indicateur d'incertitude. Cela peut s'avérer extrêmement utile pour la sélection des opérations prioritaires.

Prenons un exemple avec deux candidats en concurrence dans le cadre d'une quelconque consultation (Figure 68). Sur cet exemple, le premier candidat « aux alentours de 14 » pourrait être préféré au second dont le score est « voisin de 13 ». Néanmoins, pour le second, on a une imprécision moindre sur l'adéquation entre sa réponse à la consultation et la demande. Cette information supplémentaire sur le niveau d'incertitude relatif aux candidats peut faire que l'on choisisse finalement le second parce que l'on estime que le risque de se tromper en le choisissant est moindre.

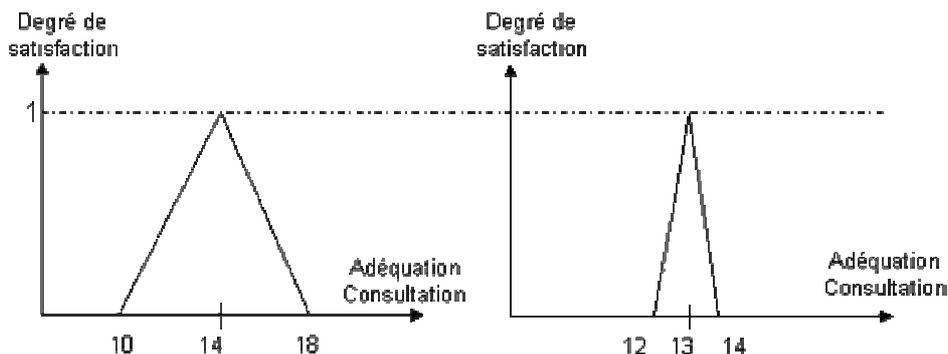


Figure 68 : exemple de scores flous pour deux prestataires concurrents

Dans les modèles d'évaluation que nous avons proposés jusqu'ici, on ne modélisait pas cette imprécision et il nous semble qu'elle peut avoir un impact non négligeable dans la décision finale. Le modèle pour la phase d'évaluation que nous proposons ici, en offrant la possibilité d'agrèger des scores flous, permet de conserver une information plus riche sur les concurrents. Les paragraphes qui suivent ont pour objectif de laisser entendre comment on agrège des scores flous : dans une interprétation possibiliste de ce modèle, il s'agit ni plus ni moins de propager l'incertitude sur les scores partiels au score de synthèse. Pour ne pas nuire à la compréhension du principe, nous allons décrire le processus pour une moyenne pondérée avec des ensembles flous à fonction d'appartenance trapézoïdale. L'extension à des nombres flous plus sophistiqués et des opérateurs non linéaires comme l'intégrale de Choquet est décrite précisément dans [Denguir, 07].

Avoir un score de synthèse sous la forme d'un sous-ensemble flou pouvant paraître un artefact mathématique complexe pour les besoins de l'application, nous proposons a posteriori de doter le score flou agrégé d'indicateurs d'aide à la décision. On ne présentera ici qu'un indicateur de position et un indicateur de dispersion pour faire un parallèle direct avec les notions de valeur moyenne et d'écart type en probabilités. Cette « instrumentation » a posteriori des distributions laisse la possibilité de construire autant d'indicateurs qu'on le veut, alors que si l'on avait propagé ces seuls indicateurs, le reste de l'information eût été perdu et l'obtention de tout autre indicateur eût été rendue impossible. L'instrumentation a posteriori permet de conserver l'entropie du processus d'évaluation.

Moyenne pondérée et imprécision des scores

Nous avons donné l'expression de la moyenne pondérée dans l'équation (7) lorsque les p scores partiels étaient exprimés dans $[0,1]^p$. Il s'agit maintenant de l'étendre au cas où les scores partiels ne sont plus des réels de $[0,1]$, mais des sous-ensembles flous dont le support (les valeurs d'appartenance non nulles) sont des intervalles inclus dans $[0,1]$.

Les scores partiels sont décrits par des sous-ensembles flous avec des fonctions d'appartenance simples triangulaires ou trapézoïdales (Figure 67 et Figure 68). π_i^s est le score partiel flou de l'alternative s selon le critère i . Puisque nous nous limitons au cas de fonctions d'appartenance triangulaires ou trapézoïdales, il suffit de quatre paramètres pour définir $\pi_i^s : (a,b,c,d)$, a et d étant les bornes du support de l'ensemble flou (degrés d'appartenance non nuls), b et c les bornes du noyau (degrés d'appartenance à 1) ; si le score est représenté par un triangle alors b et c sont confondus.

La propagation de sous-ensembles flous par un opérateur d'agrégation h obéit au principe d'extension de Zadeh [Zadeh, 78] :

$$\pi_{ag}(m) = \sup_{(u_1, \dots, u_p) / h(u_1, \dots, u_p) = m} (\min(\pi_1(u_1), \dots, \pi_p(u_p))) \quad (12)$$

Le principe d'extension est très général et peut s'avérer lourd sur le plan calculatoire. Nous allons utiliser le fait que les fonctions d'appartenance sont des fonctions affines par morceaux convexes simples et que la moyenne pondérée est linéaire pour en simplifier grandement le calcul.

Le nombre flou, somme des deux nombres flous (a,b,c,d) et (a',b',c',d') , est ainsi : $(a+a',b+b',c+c',d+d')$.

Le produit d'un nombre flou (a,b,c,d) par un réel λ est : $(\lambda.a, \lambda.b, \lambda.c, \lambda.d)$.

Ainsi, si les scores partiels d'une alternative sont décrits par des nombres flous

$\tilde{u}_i = (a_i, b_i, c_i, d_i)$ alors l'agrégation par somme pondérée des \tilde{u}_i est : $\tilde{u} = \sum_{i=1}^p p_i \tilde{u}_i$ avec

$$\tilde{u} / a = \sum_{i=1}^p p_i . a_i, b = \sum_{i=1}^p p_i . b_i, c = \sum_{i=1}^p p_i . c_i, d = \sum_{i=1}^p p_i . d_i \tag{13}$$

Le score flou agrégé est lui-même une fonction d'appartenance affine par morceaux définie par 4 paramètres calculés par (13). **La propagation d'incertitudes sur les scores partiels revient à agréger des nombres flous en utilisant le principe d'extension** extrêmement simple dans le cas présenté.

Indicateurs pour l'aide à la décision

La propagation des scores flous partiels permet de conserver toute l'information produite par le processus d'évaluation. Néanmoins, le décideur dispose au final du score flou agrégé de chacune des alternatives. Nous pensons qu'il est nécessaire dans ce cas de concevoir des indicateurs sur les ensembles flous générés afin qu'ils représentent des grandeurs directement utilisables par le décideur dans sa sélection. Les deux indicateurs que nous présentons ici sont un indicateur de position—une note de synthèse réelle, et un indicateur d'imprécision moyenne—une estimation de l'incertitude moyenne que l'on a sur cette valeur de synthèse.

Pour comprendre la sémantique et la construction de ces indicateurs, sont rappelés en annexe quelques éléments de la théorie des possibilités (Annexe 5). Sinon le lecteur peut se reporter directement au Tableau 10 et à la Figure 69 et admettre les définitions indiquées pour les indicateurs de position et d'imprécision moyenne.

Une façon d'aborder les possibilités est de considérer qu'une distribution de possibilité définit une famille de probabilités [Dubois *et al.*, 86] (Annexe 5) : cela permet de représenter une connaissance incomplète des probabilités et de définir des bornes inférieures et supérieures de ces probabilités imprécises. On peut en effet définir une fonction de répartition supérieure (F^*) et une fonction de répartition inférieure (F_*) telles que $\forall F, \forall u, F_*(u) \leq F(u) \leq F^*(u)$ (Figure 69) avec :

$$\forall u \in \mathbf{R}, F^*(u) = \Pi([-\infty, u]) \quad \text{et} \quad F_*(u) = N([-\infty, u])$$

La différence entre les bornes $F_*(u)$ et $F^*(u)$ rend compte de l'imprécision de l'information. On peut

ensuite définir la valeur moyenne inférieure $E_*(\pi) = \int_{-\infty}^{+\infty} x dF_*(x)$ et la valeur moyenne supérieure

$E^*(\pi) = \int_{-\infty}^{+\infty} x dF^*(x)$ prises par les distributions de probabilités de la famille considérée. L'intervalle

$[E_*(\pi), E^*(\pi)]$ est la valeur moyenne de π . Une propriété fondamentale pour la suite est l'invariance des valeurs $E_*(\pi)$ et $E^*(\pi)$ par transformations linéaires sur π (Figure 69) [Dubois *et al.*, 87].

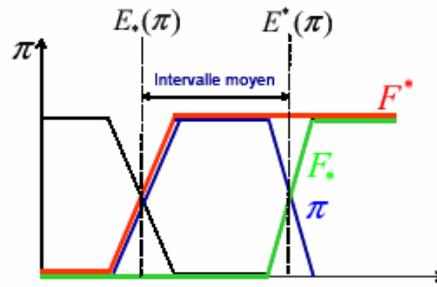


Figure 69 : Exemple de F^* , F_* , E^* , et E_*

Nous avons donné les notations minimales à connaître pour maintenant pouvoir construire les indicateurs de position et d'imprécision moyenne sur nos ensembles flous. Ils reposent tous deux sur les deux grandeurs $E^*(\pi)$ et $E_*(\pi)$ associées à π , invariantes par transformations linéaires sur π . Nous en donnons la définition dans le tableau suivant :

Indicateurs de description	de	Description	Définition	illustration
Indicateur de position $MD(\pi) : \pi \rightarrow [a; b]$		Cet indicateur est une valeur réelle de synthèse du sous-ensemble flou	$MD(\pi) = (E_*(\pi) + E^*(\pi))/2$	
Indicateur d'imprécision moyenne		Cet indicateur est la valeur moyenne de l'imprécision du sous-ensemble flou	$\Delta(\pi) = E^*(\pi) - E_*(\pi)$	

Tableau 10 : expressions des indicateurs de position et d'imprécision moyenne

Notons que l'expression de $\Delta(\pi)$ permet de retrouver les deux cas extrêmes de l'imprécision moyenne, i.e., le consensus (dans ce cas $E^*(\pi) = E_*(\pi)$ et c'est toute la première partie de ce document) et l'ignorance totale ($E^*(\pi) - E_*(\pi) = b - a$).

Il ne nous reste plus qu'à nous intéresser à la façon dont se propage ces indicateurs de décision par l'opérateur d'agrégation. E^* et E_* se conservent par transformations linéaires, autrement dit on peut écrire que :

$$E_*(\pi_{ag}) = \sum_{i=1}^p p_i \cdot E_*(\pi_i^k) \text{ et } E^*(\pi_{ag}) = \sum_{i=1}^p p_i \cdot E^*(\pi_i) \quad (14)$$

L'équation reste très simple d'utilisation même si l'on venait à utiliser d'autres fonctions d'appartenance que les trapèzes.

Sur la base de cette équation, en utilisant la définition de l'indicateur de position MD, on obtient :

$$MD(\pi_{ag}) = \frac{E^*(\pi_{ag}) + E_*(\pi_{ag})}{2} = \sum_{i=1}^p p_i \cdot MD(\pi_i) \quad (15)$$

Cette équation nous donne le principe de calcul de l'indicateur de position du nombre flou résultat de l'agrégation en fonction des indicateurs de position des nombres flous que l'on agrège.

Nous allons procéder de même pour l'indicateur d'imprécision moyenne.

$$\Delta(\pi_{ag}) = E^*(\pi_{ag}) - E_*(\pi_{ag}) = \sum_{i=1}^p p_i \cdot (E^*(\pi_i) - E_*(\pi_i)) = \sum_{i=1}^p p_i \cdot \Delta(\pi_i) \quad (16)$$

Cette équation nous donne le principe de calcul de l'indicateur d'imprécision du nombre flou résultat de l'agrégation en fonction des indicateurs d'imprécision des nombres flous que l'on agrège.

Tous ces résultats ont été étendus dans le cas plus complexe de l'intégrale de Choquet dans [Denguir *et al.*, 06] [Denguir, 07]. Le principe reste néanmoins le même : les calculs reposent sur la linéarité par morceaux de l'intégrale de Choquet qui se comporte alors comme une somme pondérée dans tout simplexe où l'ordre des scores partiels est fixé ; les résultats ne s'appliquent alors que localement et les équations (15) et (16) sont généralisées via une double somme sur les critères et les changements d'ordre.

Nous avons tenu à mettre quelques mots sur cette extension possible de SINERGIE pour faire le lien avec la thèse de Denguir soutenue en 2007 : nous participions en effet toutes deux au Projet de Recherche du LGI2P MATRICS (Multicriteria Technics for Risk Investigation in Complex Systems). Néanmoins, la notion de score flou nous paraissait difficile à introduire dès la phase de lancement de SINERGIE et d'un intérêt limité si l'on s'en tient à l'opérateur moyenne pondérée, nous n'avons donc pas implémenté ce point de vue.

III.4 Justification des choix

ESCOTA souhaite que l'outil d'aide à l'évaluation offre une aide à la justification des choix retenus lors de la consultation. ESCOTA veut se préparer à rendre des comptes aux partenaires sociaux, politiques ou à la Direction sur la politique de gestion du patrimoine que la Direction d'Exploitation mène. Autrement dit, l'outil d'aide à la décision doit permettre à tout moment de démontrer la transparence de la consultation en proposant des éléments d'information qui soutiennent la logique décisionnelle appliquée [Montmain *et al.*, 02 ; Montmain *et al.*, 07]. L'explication consiste à identifier les critères qui ont eu un rôle prépondérant dans le classement d'une opération.

III.4.1 Point de vue des échelles continues

Supposons donc que ESCOTA se soit appuyée sur un modèle d'évaluation continue (des MP numériques classiques) pour classer les opérations en urgence comme nous l'avons vu dans les sections précédentes. Ce modèle correspond à une stratégie de sélection. Maintenant, il s'agit de faire valoir les principes de sélection des opérations ou d'expliquer le pourquoi d'une opération ajournée par rapport à cette stratégie. L'idée de base repose sur une analyse de sensibilité de l'opérateur d'agrégation.

Notons s^1 une opération qui a été désignée comme des plus urgentes (elle appartient aux opérations classées U_1). Ainsi, pour tout $k = 2, \dots, n$ (où k est le numéro d'une opération), le score agrégé de s^1 est supérieur (ou égal) à tous les autres scores agrégés des autres opérations s^k . Une explication quant à savoir pourquoi s^1 a été retenue plutôt que s^k doit servir à légitimer la décision. Nous nous sommes intéressés à la contribution partielle du score d'un critère pour un résultat d'agrégation donné afin de répondre à cette question. Notre approche pour déterminer les contributions des scores partiels est de décomposer une quelconque expression (valeur agrégée) en une somme de p termes dépendant chacun d'un unique critère—les contributions marginales.

Les critères les plus discriminants dans la décision sont déterminés automatiquement. Autrement dit, les cases (i, k) de la grille d'évaluation croisant critères et opérations candidates pour lesquelles les scores partiels associés jouent un rôle décisif dans les choix finaux peuvent être identifiées automatiquement. Sur la base d'une analyse de sensibilité de l'opérateur d'agrégation, l'explication doit fournir la traçabilité et la logique décisionnelle appliquée par ESCOTA à chacun des organismes en compétition réclamant des justifications.

Intéressons nous donc maintenant à la formalisation de ce processus de justification. Il s'agit d'automatiser l'extraction des dimensions (les critères d'évaluation) qui ont conduit à la décision. Considérons la procédure d'argumentation relative suivante qui permet de justifier le choix de l'opération s^1 plutôt que l'opération s^k . Elle repose sur la notion de contribution d'un critère à la différence d'évaluation globale.

$$\text{Soit } h(s^1) - h(s^k) = h(x_1^1, \dots, x_p^1) - h(x_1^k, \dots, x_p^k)$$

Lorsque h est $n+1$ -différentiable et $\|h^{(n+1)}(x_1, \dots, x_p)\| \leq M, \forall \mathbf{x} = (x_1, \dots, x_p)$

Alors on a :

avec $\mathbf{h} = \mathbf{x}^1 - \mathbf{x}^k, \mathbf{x}^1 = (x_1^1, \dots, x_p^1), \mathbf{x}^k = (x_1^k, \dots, x_p^k)$

$$\left\| h(\mathbf{x}^k + \mathbf{h}) - h(\mathbf{x}^k) - h'(\mathbf{x}^k, \dots, \mathbf{x}_p^k) \cdot \mathbf{h} - \dots - \frac{1}{n!} \cdot h^{(n)}(\mathbf{x}_1^k, \dots, \mathbf{x}_p^k) \cdot (\mathbf{h})^n \right\| \leq M \cdot \frac{\|\mathbf{h}\|^{n+1}}{(n+1)!} \quad (17)$$

Pour $n = 1$, la décomposition en contributions marginales des critères au point s^k est donnée par :

$$h(s^1) - h(s^k) = h(\mathbf{x}^k + \mathbf{h}) - h(\mathbf{x}^k) \cong h'(\mathbf{x}_1^k, \dots, \mathbf{x}_p^k) \cdot \mathbf{h} = {}^t \nabla h(s^k) \cdot \mathbf{h} = \sum_{i=1}^p \frac{\partial h(\mathbf{x}^k)}{\partial x_i} \cdot h_i \quad (18)$$

Les contributions marginales $\left(\frac{\partial h(\mathbf{x}^k)}{\partial x_i} \cdot h_i\right)$ peuvent être réécrites de sorte que

$$\frac{\partial h(\mathbf{x}^k)}{\partial x_{\sigma(i)}} \cdot h_{\sigma(i)} \geq \frac{\partial h(\mathbf{x}^k)}{\partial x_{\sigma(i+1)}} \cdot h_{\sigma(i+1)} \cdot$$

On peut ensuite partitionner les contributions $\frac{\partial h(\mathbf{x}^k)}{\partial x_{\sigma(i)}} \cdot h_{\sigma(i)}$ en classes relatives aux ordres de

grandeur du ratio⁷ : $\frac{\partial h(\mathbf{x}^k)}{\partial x_{\sigma(i)}} \cdot h_{\sigma(i)} / \frac{\partial h(\mathbf{x}^k)}{\partial x_{\sigma(1)}} \cdot h_{\sigma(1)}$. Plus ce ratio est proche de 1, plus la contribution

selon le critère i est forte, plus le critère i représente une dimension essentielle dans la justification de la préférence de s^1 sur s^k . On définit ainsi un découpage symbolique sur l'échelle continue

$x / \frac{\partial h(\mathbf{x}^k)}{\partial x_{\sigma(1)}} \cdot h_{\sigma(1)}$ dans lequel chacun des termes $\frac{\partial h(\mathbf{x}^k)}{\partial x_{\sigma(i)}} \cdot h_{\sigma(i)}$ peut être classé (Figure 70).

On peut alors appliquer un raisonnement aux ordres de grandeur pour expliquer avec le niveau de détail choisi—en un mot, l'essentiel, le principal, le détail et l'anecdotique—en quoi la solution s^1 est préférable à la solution s^k ; plus la contribution marginale est importante, plus le critère est une dimension discriminante de la sélection. Les symboles des relations aux ordres de grandeur $=, \cong, \approx, <$ et \ll signifient respectivement *égal à*, *voisin de*, *comparable à*, *petit devant* et *négligeable devant* et sont associés aux explications « en un mot », « à l'essentiel », « principalement », « dans le détail » et « de façon anecdotique » (Figure 70). Ainsi, à titre d'exemple, si l'on a

$\frac{1}{1+e} \leq \frac{\partial h(s^k)}{\partial x_{\sigma(i)}} \cdot h_{\sigma(i)} / \frac{\partial h(s^k)}{\partial x_{\sigma(1)}} \cdot h_{\sigma(1)} < 1$, la contribution du critère i à la préférence de s^1 sur s^k est

voisine de 1 et on dira alors que le score obtenu par s^k selon le critère i est une raison essentielle de son élimination (Figure 70).

⁷ Une relation "A r B" est équivalente à "(A/B) r 1" et peut être modélisée comme un intervalle flou sur le rapport (A/B) en utilisant un unique paramètre e [Mavrovouniotis et al., 88].

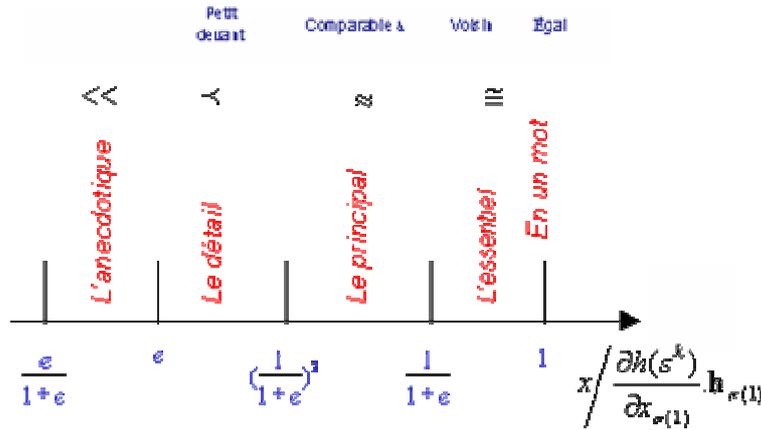


Figure 70 : Découpage en étiquettes symboliques des contributions partielles⁸

Une autre façon d'envisager le niveau de justification d'une préférence est de fixer le pourcentage $\beta\%$ d'explication de la préférence de s^i sur s^k et de chercher p_0 tel que :

$$h(s^i) - h(s^k) \triangleq \sum_{i=1}^{p_0 < p} \frac{\partial h}{\partial x_i} \cdot (x_i^i - x_i^k) = \beta\% \cdot \sum_{i=1}^p \frac{\partial h}{\partial x_i} \cdot (x_i^i - x_i^k) \quad (19)$$

Cette seconde façon de procéder n'est pas sans rappeler le principe d'une analyse par composantes principales et peut s'avérer plus intuitive pour le décideur. C'est cette option qui supporte la fonctionnalité d'explication implémentée dans SINERGIE.

On peut également souhaiter disposer d'une procédure de justification dans l'absolu, autrement dit faire valoir quelles sont les dimensions qui expliquent le bon score de s^k (le mauvais score le cas échéant). Considérons alors l'expression analytique suivante :

$$h(s^k) - h(\alpha, \dots, \alpha) = \sum_{i=1}^p \frac{\partial h(\alpha, \dots, \alpha)}{\partial x_i} \cdot (x_i^k - \alpha) \quad (20)$$

où $h(\alpha, \dots, \alpha) = \alpha$ peut être vu comme une valeur de référence ou un degré minimal de satisfaction attendu (principe de la barre scientifique aux concours des Grandes Écoles). Les contributions marginales associées à cette expression sont alors : $(\frac{\partial h(\alpha, \dots, \alpha)}{\partial x_i} \cdot (x_i^k - \alpha))$. Elles peuvent être

ordonnées de sorte à ce que : $\frac{\partial h(\alpha, \dots, \alpha)}{\partial x_{\sigma(i)}} \cdot (x_{\sigma(i)}^k - \alpha) \geq \frac{\partial h(\alpha, \dots, \alpha)}{\partial x_{\sigma(i+1)}} \cdot (x_{\sigma(i+1)}^k - \alpha)$ puis on peut

appliquer un raisonnement aux ordres de grandeur comme précédemment : plus la contribution est importante, plus le critère a été déterminant dans la bonne appréciation de s^k .

Une autre façon d'envisager le niveau de justification est de fixer le pourcentage $\beta\%$ d'explication du score de s^k et de chercher p_0 tel que :

$$h(s^k) - h(\alpha) \triangleq \sum_{i=1}^{p_0 < p} \frac{\partial h}{\partial x_i} \cdot (x_i^k - \alpha) = \beta\% \cdot \sum_{i=1}^p \frac{\partial h}{\partial x_i} \cdot (x_i^k - \alpha) \quad (21)$$

A ce stade de l'argumentation, il est donc possible de sélectionner automatiquement les critères les plus déterminants dans la sélection ; autrement dit, les cases (i, k) de la grille d'évaluation pour

⁸ Le nombre de classes est un paramètre à fixer qui dépend de la connaissance que l'on souhaite exprimer (le détail et l'anecdotique pourraient par exemple être fondus en une seule catégorie linguistique). Le paramètre ϵ est à déterminer, une valeur courante de ϵ est 0.1 et correspond à l'idée commune qu'une grandeur devient négligeable devant une autre au-delà d'un rapport 1/10.

lesquelles les scores partiels x_i^k associés jouent un rôle décisif dans les choix pris, peuvent être pointées automatiquement. La décomposition en contributions partielles de critères permet d'apporter automatiquement des éléments de rhétorique aux principes de classement des opérations en urgence.

Il est clair que le modèle formel décrit ci-dessus est extrêmement simplifié lorsque l'opérateur d'agrégation est une somme pondérée puisque $\frac{\partial h}{\partial x_i}$ n'est autre que le poids du critère i . Néanmoins, ce modèle général pourra être utilisé pour les futures versions de SINERGIE.

Il est important de noter les deux points suivants :

- Expliquer pourquoi l'on préfère s^1 à s^k consiste à déterminer les critères selon lesquels s^1 est apparue comme plus urgente que s^k ... Les critères selon lesquels s^k aurait pu être perçue comme plus urgente que s^1 n'ont pas à être évoqués dans cet exercice d'argumentation ;
- L'explication repose sur l'analyse du modèle d'agrégation. Elle lui est propre. Si l'on change de modèle, on risque de changer le classement et l'analyse de sensibilité mise en oeuvre pour la phase de justification : la rhétorique d'une sélection ne vaut que pour un modèle stratégique donné. Il est donc nécessaire que la légitimité du modèle choisi ne soit pas discutable, mais un fait établi...

Cette fonctionnalité d'aide à la légitimation souligne l'idée qu'un système d'aide à la décision doit avant tout permettre d'éclairer le décideur au cours des phases du processus décisionnel, et rend ainsi notre système conforme à la définition que propose B. Roy : l'aide à la décision ne relève que de façon très partielle de la recherche de vérité ; les théories, les méthodologies, les concepts, les modèles, les techniques sur lesquels elle s'appuie doivent avoir une ambition différente : raisonner le changement que prépare un processus de décision de façon à accroître la cohérence des objectifs avec le système de valeurs du décideur [Roy, 85].

III.4.2 Extensions

Les quelques lignes que nous venons de proposer pour accompagner la justification de la logique de classement d'ESCOTA se prêtent davantage à des opérateurs reposant sur des algèbres (+, .) que sur du (min , max) puisque tout repose sur la réécriture d'une différentiation de l'opérateur d'agrégation en une somme de p termes dépendants d'un unique critère, les contributions marginales. Cette somme ne trouve pas de sens dans une algèbre (min , max). Le principe a néanmoins été étendu dans le cas d'un opérateur non différentiable, l'intégrale de Choquet [Akharraz, 05 ; Montmain et al., 07]. Lorsque l'on se place dans une algèbre (min , max), il faut procéder cas par cas pour définir un équivalent de la notion de contribution.

[Denguir, 07] a également étendu ce principe lorsque les scores sont des nombres flous et que l'opérateur d'agrégation est une intégrale de Choquet (modèle incluant donc bon nombre de comportements décisionnels selon son paramétrage). Pour noter cette extension, nous proposons ici de l'exposer quand l'opérateur d'agrégation est une somme pondérée comme nous l'avons fait dans la sous-section III.3.3.

Soit s^k une alternative, son score global (son niveau d'urgence ou de priorité) est :

$$\tilde{u}_{ag}^k = \sum_{i=1}^p p_i \tilde{u}_i^k \quad (22)$$

On définit alors la contribution du critère i en termes de distribution :

$$\gamma_i^\pi = p_i \tilde{u}_i^k \quad \tilde{u}_{ag}^k = \sum_{i=1}^p \gamma_i^\pi \quad (23)$$

Si la lecture des résultats en termes de distributions est trop obscure pour le décideur, on a recours aux indicateurs de position et d'imprécision moyenne plus faciles à interpréter (voir section III.3.3). On utilise alors les équations (16) et (17) pour définir les contributions en termes de « valeur moyenne » et d'imprécision moyenne :

$$MD(\tilde{u}_{ag}^k) = \sum_{i=1}^p p_i \cdot MD(\tilde{u}_i^k) \Rightarrow \forall i, \gamma_i^{MD} = p_i \cdot MD(\tilde{u}_i^k) \quad (24)$$

$$\Delta(\tilde{u}_{ag}^k) = \sum_{i=1}^p p_i \cdot \Delta(\tilde{u}_i^k) \Rightarrow \forall i, \gamma_i^{\Delta} = p_i \cdot \Delta(\tilde{u}_i^k) \quad (25)$$

où γ_i^{MD} et γ_i^{Δ} sont respectivement les contributions du critère i à la « valeur moyenne » (indicateur de position) et à l'imprécision moyenne du score flou résultant de l'agrégation par la MP [Denguir, 07].

Ensuite, il suffit de reprendre les principes de raisonnement aux ordres de grandeur sur (24) et (25) pour sélectionner les critères qui ont eu le plus d'influence dans telles ou telles préférences. Le raisonnement pour les scores flous est identique à celui mené avec des scores précis comme expliqué plus haut.

A titre d'illustration, on retrouve bien sûr des explications du type « le niveau d'urgence élevé de l'opération s^k s'explique par son score partiel élevé au regard du critère d'évaluation i ». Ce type d'explication relève de l'analyse des indicateurs de position (MD). Mais la modélisation de l'imprécision ouvre la porte à des explications du type : « la proposition de s^k n'a pas été retenue car elle est apparue trop vague en particulier selon le critère i ». Ce type d'explication repose sur l'analyse des indicateurs d'imprécision moyenne (Δ).

III.4.3 Point de vue des échelles finies discrètes

Il s'agit dans cette sous-section de définir l'équivalent de la contribution marginale lorsque les échelles utilisées pour l'évaluation sont considérées comme des échelles discrètes finies. Pour cela, nous repartons d'une proposition de Jullien qui définit l'influence symbolique d'un critère [Jullien *et al*, 06]. Nous précisons ensuite les notions d'influence locale et globale. Enfin, nous expliquons comment ces définitions « qualitatives » peuvent être affectées par la représentativité de la base d'apprentissage. Nous proposons un palliatif à cet égard qui n'est pas sans évoquer un comportement non additif de l'opérateur d'agrégation symbolique.

L'influence symbolique d'un critère [Jullien et al, 06]

Lorsque les acteurs d'un processus de décision doivent exprimer leurs préférences selon des critères, il leur est souvent plus facile d'exprimer leur point de vue sur une échelle discrète plutôt que d'attribuer un score sur une échelle numérique. C'est le cas des juges du festival du film d'Annecy pour lequel [Jullien *et al.*, 06] propose une méthode permettant de comprendre le comportement des juges et de les aider dans leur débat supportant le processus de sélection des films. Quatre critères ont été identifiés pour aider à la sélection des films : *scénario*, *animation*, *esthétique*, *bande-son*. Pour chaque film, un juge donne une note comprise dans l'échelle discrète : $\{VB, B, N, G, VG\}$ ⁹. Enfin, la note globale que le juge attribue au film s'exprime dans : $\{No, Perhaps, Yes\}$ ¹⁰.

[Jullien *et al*, 2006] ne s'intéressent pas spécifiquement à la construction de l'opérateur d'agrégation en lui-même, les auteurs se réfèrent à [Grabisch, 06] pour les conditions d'existence et la construction de l'opérateur d'agrégation moyenne (cf. III.3.2.1). L'idée est de déterminer quelle est l'influence d'un critère ou d'un groupe de critère dans la décision de chaque juge.

La procédure de sélection d'un film s'énonce de la façon suivante :

⁹ Respectivement pour very bad, bad, moyen, good et very good.

¹⁰ Respectivement rejeté, à discuter, accepté.

- Si une majorité de juges a mis la note globale Yes , le film est sélectionné ;
- Si une majorité de juges a mis la note globale No , le film est rejeté ;
- Sinon, il y a délibération.

L'objectif est d'aider les juges, notamment dans les situations de délibération, à identifier :

- Quels sont les critères à l'origine de leurs désaccords ;
- Les critères sur lesquels la modification des scores pourrait permettre d'aboutir à un compromis.

En pratique, trois juges ont évalué 100 films. Pour vérifier qu'il existe bien un opérateur d'agrégation de type moyenne qui permette d'agrèger les notes en une note globale cohérente avec les préférences d'un juge donné, les conditions du théorème de [Grabisch, 06] sont vérifiées. Un opérateur d'agrégation de type moyenne est ainsi associé à chaque juge, l'analyse de l'influence de chacun des critères sur cet opérateur permet aux autres juges de comprendre les raisons pour lesquelles le « juge qui s'explique » a retenu ou rejeté une alternative. Pour faciliter les délibérations, un outil a été développé afin de mettre en évidence les critères décisifs dans la stratégie d'agrégation de chaque juge. La contribution d'un critère à un choix est donc perçue comme une explication de la logique de sélection de chaque juge. [Jullien *et al*, 06] propose donc de définir l'équivalent de la contribution marginale d'un critère comme nous l'avons vu dans les sous-sections précédentes, mais dans le cadre d'évaluation s'effectuant sur des échelles finies discrètes. Ils s'inspirent de [Marichal, 00 ; Domingo-Ferrer *et al.*, 03] et définissent comme suit l'influence d'une coalition de critères S sur la valeur du score agrégé :

$$I_M(S) := \text{median}_{T \subseteq N/S} (M(e_{T \cup S}) \ominus M(e_T)) \text{ avec}$$

S : Critères de la coalition

N : Ensemble complet des critères

(26)

$I_M(S)$: Influence de S

e_T : Vecteur d'évaluation lorsque tous les critères de T prennent la valeur maximale (VG), les autres la valeur minimale (VB)

$M(e_T)$: Évaluation globale de e_T par l'opérateur moyenne M

Avec les notations précédentes, pour un sous ensemble de critères S , cette formule calcule¹¹ la médiane des différences entre les évaluations ayant la note VG sur les critères de $T \cup S$ (excellents sur $T \cup S$ et nuls sur les autres) avec ceux ayant la note VG sur T (excellents sur T et nuls sur les autres). Elle permet de calculer les influences de chaque critère et sous-ensemble de critères. L'application de cette formule à l'application de [Jullien *et al*, 06] donne les résultats présentés sur la Figure 71. L'influence d'un critère est représentée par un disque dont la taille est proportionnelle à son influence. L'influence d'un sous-ensemble de deux critères est représentée par un trait dont l'épaisseur est proportionnelle à l'influence.

L'équivalent de la Figure 71 dans un contexte numérique consisterait à demander à chaque juge d'explicitier la distribution de poids qu'il utilise pour calculer le score global d'un film. Cette formule ne dépend pas du film, mais uniquement de la sensibilité du juge dans son appréciation générale des films.

¹¹ Encore faut-il avoir défini la soustraction symbolique de la formule de l'influence. Voir [Jullien *et al*, 06] et l'exemple ci-après.

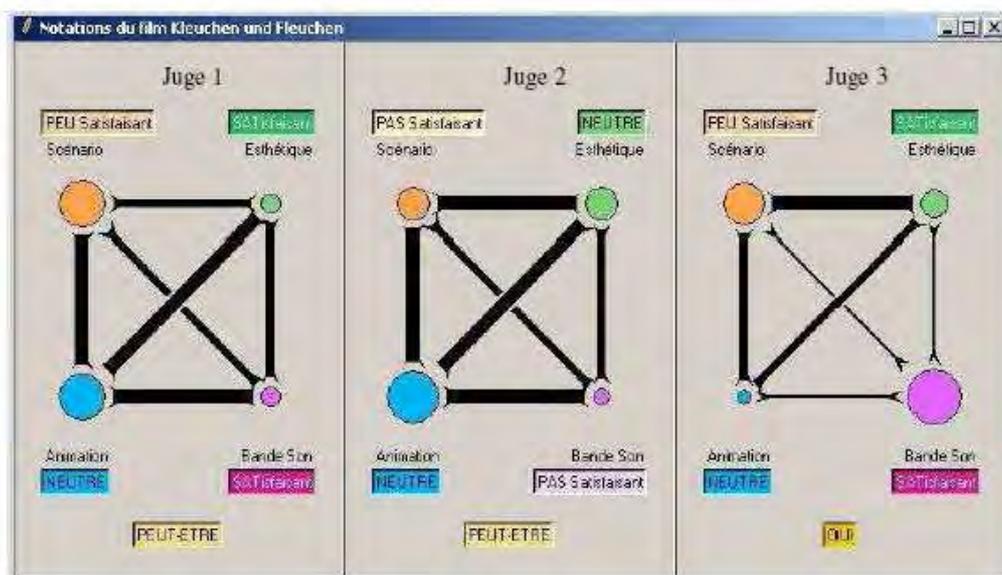


Figure 71 : importance relative des critères pour chaque juge

Notons néanmoins et d'ores et déjà, la particularité de ce résultat : bien qu'il s'agisse d'une agrégation relevant d'un opérateur de type moyenne, on estime non seulement l'importance relative des critères, mais également les interactions entre les critères, ce qui n'a bien sûr pas d'équivalent dans un modèle additif numérique. L'opérateur d'agrégation obtenu est bien compris entre le *min* et le *max*, mais comme il ne peut prendre que des valeurs discrètes, le résultat n'est pas une moyenne au sens usuel du terme, l'opérateur a un comportement « légèrement » sous ou sur additif selon le cas. On parlera de moyenne généralisée. Nous illustrerons plus bas ce point spécifique.

Il faut remarquer que la construction de l'opérateur dépend de la représentativité de la base de vecteurs d'apprentissage (comme dans tout problème d'identification paramétrique). On « apprend » les influences des critères sur les seules situations de la base d'apprentissage : une base où tous les vecteurs d'apprentissage seraient très proches biaiserait le modèle. Il faut noter aussi que si les évaluations ne comportent aucune situation extrême (l'excellence sur une partie des critères, la nullité sur les autres), la précision du modèle s'en trouve affectée (on ne couvre pas les limites du domaine de définition de l'opérateur que l'on cherche à déterminer). En pratique, ces cas particuliers ne sont pas faciles à obtenir car ils ne correspondent que rarement à une situation réelle.

Application dans SINERGIE et moyenne généralisée

Nous nous proposons donc maintenant d'appliquer l'approche de [Jullien *et al*, 06] à notre base de données d'opérations (Figure 72) que nous avons déjà utilisée au préalable pour comparer agrégation numérique et moyenne symbolique. L'expression de la médiane nécessite de définir la soustraction entre les étiquettes linguistiques mises en jeu dans le processus d'évaluation. Reprenons donc les quatre niveaux d'évaluation $\{0, U_3, U_2, U_1\}$, on définit alors (arbitrairement) le Tableau 11 suivant :

Θ	0	U_3	U_2	U_1
0	0	$-\epsilon$	$-\delta$	$-\gamma$
U_3	ϵ	0	$-\omega$	$-\beta$
U_2	δ	ω	0	$-\alpha$
U_1	γ	β	α	0

Tableau 11 : la table de soustraction des étiquettes linguistiques

Notons que la valeur des résultats de la soustraction n'a pas d'importance, seul l'ordre de ces valeurs a du sens dans le contexte discret discuté. Les seules contraintes imposées sont $\omega \leq \beta, \alpha \leq \beta, \varepsilon \leq \delta \leq \gamma, \beta \leq \gamma, \omega \leq \delta$. On pourra donc encore choisir arbitrairement :

$$0 < \omega \leq \alpha \leq \varepsilon \leq \beta \leq \delta \leq \gamma$$

La formule de la médiane appliquée à notre base de données fournit les résultats présentés sur la Figure 73 qui suit pour toute coalition de critères S telle que $|S| \leq 3$.

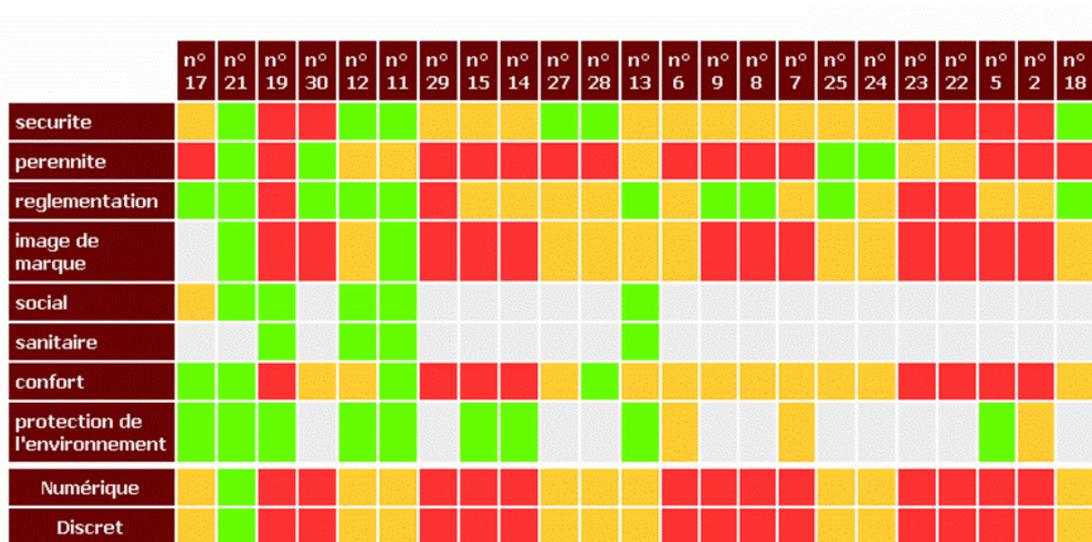


Figure 72 : base de 23 opérations U1 U2 U3

durability	ω
security	ω
comfort	ω
public image	ω
env	0
regulation	0
social	0
sanitary	0
durability, security	β
durability, comfort	β
durability, public image	β
durability, env	α
durability, regulation	α
durability, social	ω
durability, sanitary	ω
security, comfort	β
security, public image	β
security, env	α
security, regulation	α
security, social	ω
security, sanitary	ω
comfort, public image	α
comfort, env	ω
comfort, regulation	ω
comfort, social	ω
comfort, sanitary	ω
public image, env	ω
public image, regulation	ω
public image, social	ω
public image, sanitary	ω
env, regulation	0
env, social	0
env, sanitary	0
regulation, social	0
regulation, sanitary	0
social, sanitary	0

durability, security, comfort	β
durability, security, public image	β
durability, security, env	β
durability, security, regulation	β
durability, security, social	β
durability, security, sanitary	β
durability, comfort, public image	β
durability, comfort, env	β
durability, comfort, regulation	β
durability, comfort, social	β
durability, comfort, sanitary	β
durability, public image, env	β
durability, public image, regulation	β
durability, public image, social	β
durability, public image, sanitary	β
durability, env, regulation	α
durability, env, social	α
durability, env, sanitary	α
durability, regulation, social	α
durability, regulation, sanitary	α
durability, social, sanitary	α
security, comfort, public image	β
security, comfort, env	β
security, comfort, regulation	β
security, comfort, social	β
security, comfort, sanitary	β
security, public image, env	β
security, public image, regulation	β
security, public image, social	β
security, public image, sanitary	β
security, env, regulation	α
security, env, social	α
security, env, sanitary	α
security, regulation, social	α
security, regulation, sanitary	α
security, social, sanitary	α
comfort, public image, env	ϵ
comfort, public image, regulation	ϵ
comfort, public image, social	α
comfort, public image, sanitary	α
comfort, env, regulation	α
comfort, env, social	ω
comfort, env, sanitary	ω
comfort, regulation, social	ω
comfort, regulation, sanitary	ω
comfort, social, sanitary	ω
public image, env, regulation	α
public image, env, social	ω
public image, env, sanitary	ω
public image, regulation, social	ω
public image, regulation, sanitary	ω
public image, social, sanitary	ω
env, regulation, social	0
env, regulation, sanitary	0
env, social, sanitary	0
regulation, social, sanitary	0

Figure 73 : influences des sous-ensembles de critères $S / |S| \leq 3$

On peut alors calculer l'influence $I_M(S)$ pour un sous-ensemble quelconque de critères. Dans l'exemple proposé Figure 73, on constate que l'influence d'un singleton (un critère unique donc) est soit 0 soit ω . Ce résultat est contradictoire avec le découpage en quatre niveaux d'influence possibles pour les 8 critères de l'exemple obtenu précédemment en appliquant un algorithme de clustering sur les valeurs numériques fournies par Macbeth (Figure 74) (voir principe section III.3.1). En numérique, sur cet exemple nous avons trouvé que :

$P_{security} = P_{durability} > P_{comfort} = P_{public_image} > P_{regulation} = P_{environment} > P_{sanitary} = P_{social}$. Ici, on ne retrouve pas cette distinction dans le classement des influences relatives par application de la formule de la médiane, on a simplement : $security = durability = comfort = public\ image = \omega$ et $regulation = environment = sanitary = social = 0$. La formule de la médiane appliquée aux seuls singletons $\{s\} \subset N$ a donc conduit sur cet exemple à un découpage trop grossier en deux niveaux d'influence (granularité trop grossière).

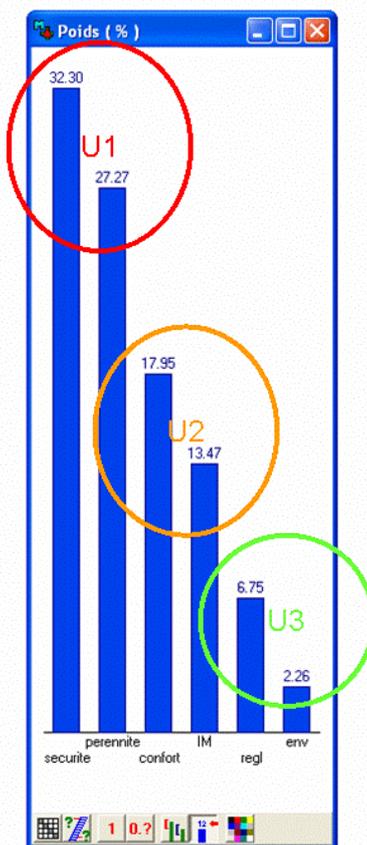


Figure 74 : les 4 niveaux de poids des 8 critères d'urgence Chaussées (Macbeth)

Étudions de plus près la cause de ce résultat. Pour cela, reprenons en détail le calcul de la médiane utilisée dans le calcul de $I_M(S)$. Le Tableau 12 suivant donne la répartition des $128 = 2^7$ valeurs de la soustraction sur laquelle s'opère le calcul de la médiane lorsque S est un singleton pour chacun des quatre critères *security*, *durability*, *comfort*, *public image*. On remarque dans un premier temps que la répartition des valeurs prises par l'opération de soustraction semble identique pour *durability* et *security* d'une part, pour *comfort* et *public image* d'autre part. Cependant, il est facile de vérifier sur le tableau que la valeur de la médiane est bien ω pour chacun des quatre critères.

	durability	security	comfort	public image
0	8	8	56	56
ω	60	60	36	36
α	48	48	24	24
ε	12	12	12	12
β	0	0	0	0
δ	0	0	0	0
γ	0	0	0	0

Tableau 12 : détail du calcul de la médiane

Si le calcul donne ω dans les 4 cas de figure, il n'en reste pas moins que les configurations pour le calcul de la médiane sont bien différentes d'un critère à l'autre comme l'illustrent les Figure 75 et

Figure 76. Pour *security*, comme pour *durability*, « il s'en faut de peu » pour que la médiane prenne la valeur $\alpha > \omega$ (60+8 contre 60+60), alors que pour *comfort* et *public image*, « il s'en faut de peu » pour que la médiane prenne la valeur 0 ... et par conséquent, le résultat eût alors été celui escompté. Le trop faible nombre d'étiquettes symboliques possibles, autrement dit l'imprécision trop importante des évaluations, met en défaut l'évaluation par la médiane. Le calcul de la médiane sur cet espace d'évaluation rudimentaire masque la distinction des deux valeurs espérées (la médiane est trop sensible à l'imprécision des évaluations).

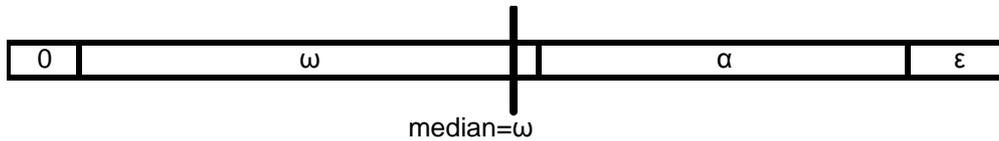


Figure 75 : répartition des valeurs de $M(e_{T \cup S}) \ominus M(e_T)$ pour Security et Durability

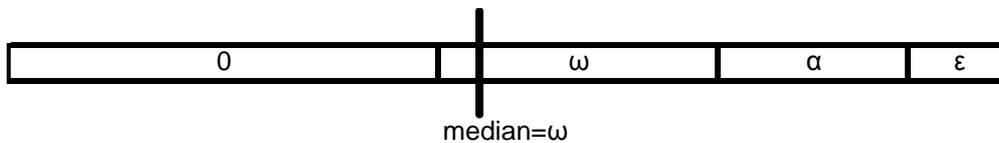


Figure 76 : répartition des valeurs de $M(e_{T \cup S}) \ominus M(e_T)$ pour Comfort et Public image

Pour remédier à ce problème de sensibilité du calcul de $I_M(S)$ au grain des échelles d'évaluation, nous allons alors considérer l'influence des coalitions de critères. Le tableau 9 donne les valeurs de $I_M(S)$ lorsque S représente toutes les coalitions de cardinal 2 pour les critères *security*, *comfort* et enfin, *regulation* (nous avons choisi un critère dans chacun des trois clusters d'IRGC (Importance Relative Globale des Critères) non nulle lors du traitement numérique de l'information).

security	ω	~	comfort	ω	>	regulation	0
security, durability	β	~	comfort, durability	β	>	regulation, durability	α
security, comfort	β	~	comfort, security	β	>	regulation, security	α
security, public image	β	>	comfort, public image	α	>	regulation, public image	ω
security, env	α	>	comfort, env	ω	>	regulation, env	0
security, regulation	α	>	comfort, regulation	ω	>	regulation, comfort	ω
security, social	ω	~	comfort, social	ω	>	regulation, social	0
security, sanitary	ω	~	comfort, sanitary	ω	>	regulation, sanitary	0

Tableau 13 : influences de coalitions de critères

Sur ce tableau, on remarque, par exemple, ligne 4, que :

$$I_M(\text{security}, \text{public image}) \succ I_M(\text{comfort}, \text{public image}) \succ I_M(\text{regulation}, \text{public image}) :$$

considérer les paires de critères (\bullet , *Public Image*) permet donc de distinguer l'influence de *security* et de *comfort* ou *regulation*. De façon plus générale, toute paire (*security*, \bullet) a au moins autant d'influence que la paire (*comfort*, \bullet). De même, toute paire (*comfort*, \bullet) a au moins autant d'influence qu'une paire (*regulation*, \bullet). On aurait pu constater également que toute paire (*regulation*, \bullet) a au moins autant d'influence qu'une paire (*sanitary*, \bullet), que les paires (*security*, \bullet) et (*durability*, \bullet) (resp. (*comfort*, \bullet) et (*public image*, \bullet) ou bien (*regulation*, \bullet) et (*environment*, \bullet) ou bien (*social*, \bullet) et (*sanitary*, \bullet)) ont des influences identiques deux à deux. Ainsi, lorsque l'on considère l'évaluation de l'influence de paires de critères, on retrouve bien les 4 clusters d'influence du numérique. **Avoir considéré l'influence des paires de critères en complément des influences des singletons permet d'affiner le modèle d'évaluation de $I_M(S)$ par la médiane, de le rendre moins sensible à la granularité des échelles d'évaluations.** Par contre, nous avons vérifié que le calcul des $I_M(S)$ pour tout $S / |S| = 3$ n'apporte plus d'élément nouveau qui permettrait une distinction encore

plus fine quant à l'influence des critères ; ce résultat concorde avec le découpage en 4 classes d'influence du calcul numérique.

La moyenne pondérée ainsi définie en discret semble être un modèle d'évaluation avec une sémantique plus riche qu'un simple modèle additif. Comme nous l'avons déjà évoqué plus haut, on parlera de moyenne généralisée. L'information générée par le calcul de l'influence des paires de critères nous montre que l'influence d'une paire ne se déduit pas des influences des critères pris isolément. Le comportement de l'opérateur moyenne est tel qu'il paraît être construit sur une mesure k-additive [Grabisch, 97] : on n'a pas la contrainte forte $I_M(\{s_1\}) + I_M(\{s_2\}) = I_M(\{s_1, s_2\})$, mais simplement $I_M(\{s_1\}) + I_M(\{s_2\}) \leq I_M(\{s_1, s_2\})$ sur cet exemple. Le calcul de l'influence des triplets de critères n'apporte rien.

Extension à la notion d'influence locale

La formule (26) permet d'estimer l'influence d'un critère sur l'évaluation par l'opérateur moyenne. Elle qualifie l'importance relative globale (ou moyenne) d'un critère (IRGC). Il s'agit là d'une influence "moyenne" du critère sur tout l'espace d'évaluation (en numérique, comme nous l'avons déjà dit cela consisterait à ce que chaque juge dévoile les valeurs numériques qu'il met à chacun des poids affectés aux critères). Cette notion est à rapprocher de la contribution moyenne d'un critère avec une moyenne pondérée en numérique. Comme nous l'avons fait dans le cadre numérique, nous souhaitons maintenant nous intéresser à l'influence d'un critère en un point donné de l'espace d'évaluation : il s'agit là de justifier un score et non plus d'explicitier une stratégie, des préférences (comme dans le paragraphe précédent). Autrement dit nous cherchons à expliquer le score d'une alternative par les critères qui ont été les plus déterminants dans l'obtention de ce score. Il s'agit donc là d'une analyse locale de l'influence des critères (IRLC). Cette notion est intéressante parce que l'on travaille avec une moyenne généralisée (sinon l'IRGC et l'IRLC seraient identiques).

Pour définir l'IRLC, nous restons sur le principe de l'équation (26). On reste donc dans un espace d'évaluation à p dimensions avec 4 niveaux d'appréciation (0 compris), par contre on introduit un profil d'évaluation en un point $P \in \{0, U_1, U_2, U_3\}^p$. Nous proposons donc la formule suivante pour l'IRLC pour un sous-ensemble quelconque de critères :

$$I_{ML}(S) := \text{median}_{T \subseteq N/S} (M(d_{T \cup S}) \ominus M(d_T)) \quad (27)$$

avec

S : sous-ensemble de critères

N : Ensemble des critères

$I_{ML}(S)$: Influence locale de S

d_T : Vecteur d'évaluation avec tous les critères inclus dans T ayant la valeur au point P , les autres ayant la valeur minimale (0)

$M(d_T)$: Evaluation globale du vecteur d_T .

Nous reprenons l'ensemble des profils P de la Figure 72. La Figure 77 donne les valeurs de $I_{ML}(S)$ pour tous les singletons et les paires de critères autour de chacun des 23 profils de l'exemple.

	17	21	19	30	12	11	29	15	14	27	28	13	6	9	8	7	25	24	23	22	5	2	18	
durability	ε	0	α	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
comfort	0	0	ω	ω	0	0	ω	ω	ω	ω	0	0	0	ω	ω	ω	ω	0	0	ω	ω	ω	ω	ω
security	ε	0	α	ω	0	ω	ω	ω	ω	ω	0	0	0	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
comfort, regulation	0	0	ω	ω	0	0	ω	ω	ω	ω	0	0	0	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
security, sanitary	ε	0	α	ω	0	ω	ω	ω	ω	ω	0	0	0	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
sanitary	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
public image, regulation	0	0	ω	ω	0	0	ω	ω	ω	ω	0	0	0	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
security, regulation	ε	0	α	ω	0	ω	ω	ω	ω	ω	0	0	0	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
security, public image	ε	ε	β	β	ω	ε	α	α	α	ω	ω	ω	α	α	α	α	ω	ω	α	α	β	β	ω	ω
public image	0	0	ω	ω	0	0	ω	ω	ω	ω	0	0	0	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
social	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
public image, sanitary	0	0	ω	ω	0	0	ω	ω	ω	ω	0	0	0	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
durability, public image	ε	ε	β	β	ω	ε	β	β	β	ω	ω	ω	β	β	β	β	ω	ω	α	α	β	β	ω	ω
comfort, sanitary	0	0	ω	ω	0	0	ω	ω	ω	ω	0	0	0	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
durability, security	δ	ε	β	β	ω	ε	β	β	β	ω	ω	ω	β	β	β	β	ω	ω	β	β	β	β	ω	ω
social, sanitary	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
durability, env	ε	0	α	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
regulation, sanitary	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
env, regulation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
security, social	ε	0	α	ω	0	ω	ω	ω	ω	ω	0	0	0	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
public image, social	0	0	ω	ω	0	0	ω	ω	ω	ω	0	0	0	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
public image, env	0	0	ω	ω	0	0	ω	ω	ω	ω	0	0	0	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
durability, sanitary	ε	0	α	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
regulation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
security, env	ε	0	α	ω	0	ω	ω	ω	ω	ω	0	0	0	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
durability, regulation	ε	0	α	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
durability, social	ε	0	α	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
durability, comfort	ε	ε	β	β	ω	ε	β	β	β	ω	ω	ω	β	β	β	β	ω	ω	α	α	β	β	ω	ω
comfort, social	0	0	ω	ω	0	0	ω	ω	ω	ω	0	0	0	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
comfort, public image	0	0	α	ω	ω	α	α	α	ω	ω	ω	α	α	α	α	α	ω	ω	α	α	α	α	ω	ω
regulation, social	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
env	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
env, social	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
comfort, env	0	0	ω	ω	0	0	ω	ω	ω	ω	0	0	0	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω	ω
env, sanitary	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
security, comfort	ε	ε	β	β	ω	ε	α	α	α	ω	ω	ω	α	α	α	α	ω	ω	β	β	β	β	ω	ω

Figure 77 : IRLC autour des 23 profils pour $S/|S| \leq 2$

Prenons le vecteur n°17 et rappelons l'ordre $0 < \omega \leq \alpha \leq \varepsilon \leq \beta \leq \delta \leq \gamma$ pour les valeurs de $I_{ML}(S)$. Les dimensions $\{durability\}$ et $\{security\}$ ont une influence ε séparément. Localement sur l'opération 17, ils restent les critères les plus forts. Ensemble, leur influence est δ , et on voit bien qu'il suffirait que $\{security\}$ soit en U_1 pour que la note globale devienne U_1 . Certaines paires, comme $\{durability, public image\}$, ont une influence non nulle bien que $I_{ML}(public image) = 0$. En effet, si l'une des deux dimensions a une influence non nulle, l'autre étant égale à 0, l'influence des deux est au moins égale la valeur non nulle, et on a $I_{ML}(durability, public image) = I_{ML}(durability)$. Prenons maintenant le vecteur n°22. Les dimensions $security$, $durability$ et $comfort$ sont des critères peu influents individuellement. En revanche, les influences des paires apportent des informations. En effet, $I_{ML}(durability, security) = \beta$ et $I_{ML}(security, comfort) = \beta$ indiquent qu'une hausse du score de la sécurité en U_2 , étant donné que $durability$ et $comfort$ ont respectivement U_1 et U_2 , entraînerait une hausse de la note globale.

Cette dernière remarque nous amène à introduire dans la section qui suit les notions de robustesse d'une évaluation

III.5 Robustesse de l'évaluation

Considérons maintenant une dernière étape dans le processus d'évaluation : l'évaluation du risque de commettre une erreur d'évaluation en ce qui concerne l'urgence d'une opération, i.e. le risque qu'une sous-estimation ou une surestimation d'un (ou de) score(s) partiels conduisent à une sous-estimation ou une surestimation du niveau d'urgence ou de priorité de l'opération, l'erreur (ou les erreurs des scores partiels se propageant via l'opération d'agrégation). Cette étude se fonde sur une analyse de robustesse de la procédure d'évaluation basée sur la MP. Les deux objectifs fixés à SINERGIE doivent répondre aux deux questions suivantes :

- Quand une erreur d'estimation est faite selon le critère i , quel est le risque que l'évaluation globale en soit affectée ?
- Quand une opération semble être sous-estimée (resp. surestimée), quel critère peut en être la cause la plus probable ?

La première question correspond à une analyse de risque d'une **erreur d'évaluation a priori** ; la seconde se rapporte à un **diagnostic** (analyse a posteriori).

Définissons la notion de voisinage d'un vecteur de degrés d'urgence $[U_{k(1)}, \dots, U_{k(p)}]$ associé à une opération OP . Les vecteurs du voisinage de $[U_{k(1)}, \dots, U_{k(p)}]$ sont tous les vecteurs $[U'_{k(1)}, \dots, U'_{k(p)}]$ tels que : $\forall i \in \{1..n\}, U'_{k(i)} = U_{k(i)}$ ou bien $U'_{k(i)}$ est la valeur juste au dessus (resp. au dessous) de $U_{k(i)}$ (lorsqu'elle est définie; en effet, il n'y a aucune valeur en dessous de 0 et aucune valeur supérieure à U_1). Le voisinage est un ensemble de vecteurs noté $N([U_{k(1)}, \dots, U_{k(p)}])$. Dans l'exemple en 2D de la Figure 78, $U_{k(1)} = U_2$ et $U_{k(2)} = U_2$. Sur l'exemple, les scores partiels possibles selon un critère i ($i = 1$ ou 2) d'un vecteur voisin peuvent être U_2, U_1 ou U_3 . Il y a 8 voisins. Dans le cas général, le nombre maximum de voisins est $3^p - 1$ (p le nombre de critères).

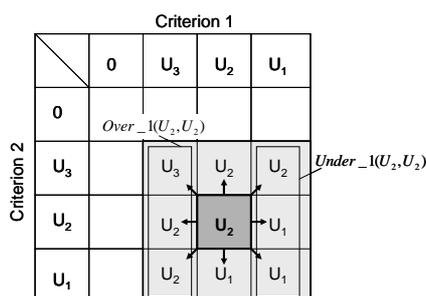


Figure 78 : voisinage du vecteur d'évaluation en urgence (U_2, U_2) en dimension 2

III.5.1 Risque d'erreur d'estimation

Le risque d'erreur d'évaluation sur une opération dû à une surestimation (resp. sous-estimation) selon un critère i permet à l'expert responsable d'un domaine de mesurer l'impact d'une erreur sur le critère i sur le degré d'urgence global de l'opération. Si l'impact selon le critère i est faible, l'impact d'une erreur d'évaluation selon ce critère est faible. Par contre, plus cet indicateur est élevé, plus le COP ou le chef de SVS devra affiner son expertise respectivement au critère i s'il ne veut pas encourir l'affectation d'un score d'urgence ou de priorité erroné. L'analyse de risque est basée sur l'algorithme qui suit. Pour simplifier, considérons, en premier lieu, le risque de sous-estimation. Une valeur $U_{k(i)}$ est sous-estimée (resp. surestimée) lorsqu'elle devrait prendre la valeur juste au dessus $U_{k(i)}$ (resp. juste en dessous $U_{k(i)}$). Cette hypothèse ne traduit rien d'autre que seules les erreurs de **un** niveau sur l'échelle d'évaluation sont envisagées.

- Soit le vecteur $U = [U_{k(1)}, \dots, U_{k(p)}]$
 - Calculer $MP(U)$.
- Pour chaque critère i :
- Trouver tous les vecteurs $U' = [U'_{k(1)}, \dots, U'_{k(p)}]$ appartenant à $N(U)$ tels que $U'_{k(i)}$ prenne la valeur juste au dessus $U_{k(i)}$ (lorsqu'elle est définie, sinon $U_{k(i)} = U_1$ et il n'y a pas de risque de sous-estimation selon le critère i dans ce cas). Notons cet ensemble : $Under_i(U)$
 - Compter le nombre de vecteurs U' dans $Under_i(U)$ tels que $MP(U')$ est supérieure à $MP(U)$. Soit n_{under_i} ce nombre.

- Le risque de sous-estimation induit par le critère i pour une opération caractérisée par U est alors : $risk_under(i) = \frac{n_{under_i}}{|Under_i(U)|}$

Dans l'exemple de la Figure 78, supposons que le critère 1 soit sous-estimé. L'ensemble $Under_1(U_2, U_2)$ est représenté sur la Figure 78. $|Under_1(U_2, U_2)| = 3$; mais seuls les vecteurs (U_1, U_2) et (U_1, U_1) mènent à une sous-estimation globale (l'opérations est évaluée en U_2 alors qu'elle aurait dû l'être en U_1). Ensuite, $n_{under_1} = 2$ et $risk_under(1) = 2/3$. Cela signifie qu'une sous-estimation selon le critère 1 pour une opération caractérisée par (U_2, U_2) conduit à une sous-estimation de l'évaluation du degré d'urgence global dans 66% des cas.

L'algorithme est identique pour la surestimation. Néanmoins, dans ce cas, quand $U_{k(i)} = 0$, le risque de surestimation selon le critère i est nul. Les résultats des estimations du risque d'erreur de sous estimation et du risque d'erreur de surestimation a priori sont reportés respectivement en Figure 79 et Figure 80 pour tous les profils d'opérations de la Figure 72.

III.5.2 Diagnostic de la source d'une erreur

Lorsque le degré d'urgence d'une opération est surestimé (resp. sous-estimé), l'analyse de diagnostic consiste à déterminer quelles sont les causes les plus probables, i.e., les critères entraînant le plus fréquemment une surestimation (resp. sous-estimation) de l'opération quand ils sont surestimés (resp. sous-estimés) eux-mêmes. La probabilité que le critère i soit la cause d'une surestimation (resp. sous-estimation) de l'évaluation en urgence globale de l'opération est calculée dans l'étape de diagnostic.

Considérons l'algorithme de sous-estimation (resp. surestimation).

Soit le vecteur $U = [U_{k(1)}, \dots, U_{k(p)}]$

- Calculer $MP(U)$;
- Calculer $N(U)$ et son cardinal $|N(U)|$;
- Calculer $MP(U')$ pour chaque $U' = [U'_{k(1)}, \dots, U'_{k(n)}]$ appartenant à $N(U)$.

Notons $Higher_N(U)$ (resp. $Lower_N(U)$), l'ensemble des vecteurs U' de $N(U)$ tels que $MP(U') > MP(U)$ (resp. $MP(U') < MP(U)$).

- Pour chaque critère i , compter le nombre n'_{under_i} (resp. n'_{over_i}) de fois où le critère i est sous-estimé (resp. surestimé) dans les vecteurs de $Higher_N(U)$ (resp. $Lower_N(U)$), i.e., $U'_{k(i)}$ a la valeur juste au dessus de $U_{k(i)}$ (resp. juste au dessous de $U_{k(i)}$) dans $Higher_N(U)$ (resp. $Lower_N(U)$) ;
- Calculer pour chaque critère i : $Diag_under(i) = \frac{n'_{under_i}}{|Higher_N(U)|}$
(resp. $Diag_over(i) = \frac{n'_{over_i}}{|Lower_N(U)|}$)

$Diag_under(i)$ donne la probabilité que la sous-estimation du critère i soit une cause possible dans la sous-estimation globale du degré d'urgence de l'opération (idem pour la surestimation).

La Figure 81 concerne les résultats du diagnostic de sous-estimation et la Figure 82 ceux de la surestimation pour tous les vecteurs de la Figure 72. Chaque taux indique la probabilité qu'un critère

soit sous-estimé (resp. surestimé) lorsque le degré d'urgence global de l'opération concernée est sous-estimé (resp. surestimé).

Considérons, par exemple, le vecteur n°17 de la Figure 79. La sécurité est évaluée en U_2 . La sous-estimation du score de la sécurité serait responsable à 32% d'une sous-estimation de l'opération en U_1 . Ceci est tout à fait logique, car compte tenu du poids du critère sécurité, son score passant de U_2 à U_1 produirait une note globale en U_1 . Regardons maintenant la Figure 81, nous voyons que si le critère *sécurité* a été sous-estimé, il participera dans 97% des cas à l'explication de la sous-estimation globale (indifféremment de la valeur des autres scores partiels). Le même taux associé au critère *confort* pour l'opération est de 77%. En termes de diagnostic, cela veut dire que l'on trouvera le critère *sécurité* dans 97% des diagnostics de la sous-estimation globale et *confort* dans 77% des cas.

Le calcul d'erreurs a priori et le diagnostic sont implémentés dans la version actuelle de SINERGIE. Le calcul d'erreurs a priori est plutôt dédié aux COP (support d'analyse) alors que le diagnostic est plutôt réservé au chef de SVS (outil de contrôle). SINERGIE propose également une variante pour le calcul de n'_{under_i} (resp. n'_{over_i}) : on peut choisir le nombre maximal e_{max} d'erreurs partielles possibles (on peut, par exemple, décider que sur une opération, on ne saurait se tromper sur plus de deux scores partiels). Plus le paramètre e_{max} est petit ($e_{max} = 1$), plus l'écart entre les probabilités des critères de poids faibles et forts devient significatif. Sur les tableaux qui suivent, nous n'avons émis aucune restriction quant aux nombres d'erreurs sur les estimations partielles (par défaut $e_{max} = p$).

	17	21	19	30	12	11	29	15	14	27	28	13	6	9	8	7	25	24	23	22	5	2	18
durability	15.0%	73.0%	0%	0%	28.0%	4.0%	0%	0%	0%	32.0%	17.0%	62.0%	0%	0%	0%	0%	39.0%	44.0%	0%	0%	0%	0%	27.0%
security	32.0%	67.0%	0%	0%	37.0%	4.0%	0%	0%	0%	62.0%	35.0%	76.0%	0%	0%	0%	0%	41.0%	46.0%	0%	0%	0%	0%	55.0%
comfort	25.0%	58.0%	0%	0%	25.0%	4.0%	0%	0%	0%	40.0%	27.0%	55.0%	0%	0%	0%	0%	28.0%	32.0%	0%	0%	0%	0%	37.0%
public image	18.0%	56.0%	0%	0%	26.0%	4.0%	0%	0%	0%	44.0%	27.0%	58.0%	0%	0%	0%	0%	29.0%	34.0%	0%	0%	0%	0%	39.0%
env	11.0%	44.0%	0%	0%	15.0%	2.0%	0%	0%	0%	26.0%	13.0%	41.0%	0%	0%	0%	0%	18.0%	21.0%	0%	0%	0%	0%	21.0%
regulation	11.0%	45.0%	0%	0%	16.0%	2.0%	0%	0%	0%	34.0%	20.0%	43.0%	0%	0%	0%	0%	20.0%	25.0%	0%	0%	0%	0%	23.0%
social	11.0%	42.0%	0%	0%	14.0%	1.0%	0%	0%	0%	26.0%	13.0%	39.0%	0%	0%	0%	0%	18.0%	21.0%	0%	0%	0%	0%	21.0%
sanitary	11.0%	42.0%	0%	0%	14.0%	1.0%	0%	0%	0%	26.0%	13.0%	39.0%	0%	0%	0%	0%	18.0%	21.0%	0%	0%	0%	0%	21.0%

Figure 79 : risque de sous-estimation globale induit par des sous-estimations locales (selon les critères)

	17	21	19	30	12	11	29	15	14	27	28	13	6	9	8	7	25	24	23	22	5	2	18
durability	8.0%	9.0%	1.0%	96.0%	17.0%	49.0%	24.0%	30.0%	30.0%	3.0%	11.0%	2.0%	48.0%	48.0%	48.0%	36.0%	39.0%	34.0%	18.0%	18.0%	2.0%	1.0%	3.0%
security	8.0%	9.0%	1.0%	72.0%	18.0%	63.0%	35.0%	47.0%	47.0%	3.0%	18.0%	2.0%	74.0%	80.0%	80.0%	56.0%	30.0%	27.0%	19.0%	19.0%	2.0%	1.0%	3.0%
comfort	8.0%	7.0%	1.0%	69.0%	13.0%	46.0%	19.0%	24.0%	24.0%	3.0%	14.0%	2.0%	51.0%	51.0%	51.0%	39.0%	20.0%	18.0%	12.0%	12.0%	2.0%	1.0%	3.0%
public image	3.0%	5.0%	1.0%	60.0%	15.0%	44.0%	24.0%	29.0%	29.0%	3.0%	14.0%	2.0%	53.0%	48.0%	48.0%	33.0%	20.0%	18.0%	12.0%	12.0%	2.0%	1.0%	3.0%
env	2.0%	3.0%	0.0%	53.0%	7.0%	30.0%	12.0%	17.0%	17.0%	1.0%	6.0%	0.0%	41.0%	34.0%	34.0%	28.0%	13.0%	11.0%	6.0%	6.0%	0.0%	0.0%	1.0%
regulation	3.0%	3.0%	1.0%	58.0%	9.0%	32.0%	19.0%	23.0%	23.0%	1.0%	6.0%	1.0%	40.0%	35.0%	35.0%	28.0%	14.0%	14.0%	7.0%	7.0%	1.0%	0.0%	1.0%
social	2.0%	3.0%	0.0%	53.0%	6.0%	29.0%	12.0%	16.0%	16.0%	1.0%	6.0%	0.0%	34.0%	34.0%	34.0%	22.0%	13.0%	11.0%	6.0%	6.0%	0.0%	0.0%	1.0%
sanitary	2.0%	3.0%	0.0%	53.0%	6.0%	29.0%	12.0%	16.0%	16.0%	1.0%	6.0%	0.0%	34.0%	34.0%	34.0%	22.0%	13.0%	11.0%	6.0%	6.0%	0.0%	0.0%	1.0%

Figure 80 : risque de surestimation globale induit par des surestimations locales (selon les critères)

	17	21	19	30	12	11	29	15	14	27	28	13	6	9	8	7	25	24	23	22	5	2	18
durability	45%	57%	0%	0%	67%	100%	0%	0%	0%	40%	42%	52%	0%	0%	0%	0%	71%	67%	0%	0%	0%	0%	41%
security	97%	53%	0%	0%	86%	100%	0%	0%	0%	79%	87%	64%	0%	0%	0%	0%	75%	71%	0%	0%	0%	0%	84%
comfort	77%	45%	0%	0%	59%	90%	0%	0%	0%	51%	66%	46%	0%	0%	0%	0%	51%	49%	0%	0%	0%	0%	56%
public image	55%	44%	0%	0%	62%	90%	0%	0%	0%	56%	66%	48%	0%	0%	0%	0%	53%	52%	0%	0%	0%	0%	60%
env	35%	35%	0%	0%	36%	45%	0%	0%	0%	33%	33%	35%	0%	0%	0%	0%	33%	33%	0%	0%	0%	0%	33%
regulation	35%	35%	0%	0%	37%	45%	0%	0%	0%	43%	51%	36%	0%	0%	0%	0%	37%	39%	0%	0%	0%	0%	35%
social	33%	33%	0%	0%	33%	33%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	0%	0%	0%	0%	33%	33%	0%	0%	0%	0%	33%
sanitary	33%	33%	0%	0%	33%	33%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	0%	0%	0%	0%	33%	33%	0%	0%	0%	0%	33%

Figure 81 : taux des causes dans le diagnostic de sous-estimation

	17	21	19	30	12	11	29	15	14	27	28	13	6	9	8	7	25	24	23	22	5	2	18
durability	100%	100%	100%	60%	82%	57%	66%	61%	61%	100%	60%	100%	46%	46%	46%	53%	94%	96%	93%	93%	100%	100%	100%
security	100%	100%	100%	46%	90%	72%	96%	95%	95%	100%	100%	100%	71%	78%	78%	84%	73%	75%	100%	100%	100%	100%	100%
comfort	100%	78%	100%	44%	66%	53%	53%	48%	48%	100%	80%	100%	50%	50%	50%	57%	50%	51%	62%	62%	100%	100%	100%
public image	45%	60%	100%	38%	74%	50%	66%	58%	58%	100%	80%	100%	51%	46%	46%	50%	50%	51%	62%	62%	100%	100%	100%
env	35%	34%	33%	33%	35%	34%	33%	35%	35%	33%	33%	40%	40%	33%	33%	42%	33%	33%	33%	33%	50%	50%	33%
regulation	40%	39%	100%	35%	43%	36%	53%	46%	46%	33%	33%	60%	39%	34%	34%	42%	35%	41%	37%	37%	50%	50%	33%
social	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%
sanitary	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%

Figure 82 : taux des causes dans le diagnostic de surestimation

III.6 Conclusion

Dans le monde de l'ingénierie, la culture des chiffres est fortement développée. Les gens manipulent communément des étiquettes symboliques, mais leur attribuent des valeurs numériques lorsque nécessaire sans prêter d'attention particulière à cette affectation. Un cas d'illustration typique correspond à la mise en place d'une procédure d'analyse multicritère. Dans le cas de la gestion de patrimoine, plus précisément dans le processus d'évaluation des opérations, nous avons proposé une méthodologie qui permet :

- 1 aux experts de continuer à pouvoir exprimer leurs jugements de valeur dans leur univers de discours habituel ;
- 2 de convertir les étiquettes en des valeurs numériques adéquates en utilisant la méthode MACBETH et des techniques de classification ;
- 3 de calculer les degré d'urgence et de priorité d'une opération par un opérateur de type MP et d'en convertir en retour le résultat numérique dans l'univers de discours des experts ;
- 4 de disposer de fonctions de justifications des évaluations. D'une part, nous avons proposé des méthodes de calcul de l'importance relative des critères afin de connaître quels critères ont joué un rôle prépondérant dans l'évaluation de la note globale. D'autre part, les analyses de robustesse du processus d'évaluation permettent d'évaluer le risque d'erreur d'évaluation a priori des opérations, mais aussi de diagnostiquer quelles dimensions peuvent le plus probablement affecter une erreur d'évaluation globale.

Nous avons ainsi passé en revue tous les supports mathématiques nécessaires aux fonctionnalités d'évaluation, de justification, d'identification et d'analyse de robustesse. Nous allons maintenant illustrer comment ces fonctionnalités de SINERGIE sont utilisées à SVS et surtout montrer comment elles contribuent à l'objectif final : la planification des opérations. En effet, nous verrons que la planification, qui n'a pas de support mathématique propre, s'appuie sur l'ensemble des étapes discutées et instrumentées dans ce chapitre : le processus de décision qui mène à la planification a été décomposé en différentes phases élémentaires—évaluation en urgence, évaluation en priorité, contrôle de ces deux opérations à travers la justification et l'analyse de robustesse. Le principe de l'aide à la planification que nous proposons tire profit de l'ensemble des connaissances élaborées par ces différentes phases de traitement. Le chapitre qui suit passe donc en revue chacune de ces fonctionnalités sous l'angle utilisateur et s'achève sur la planification des opérations. Nous avons souhaité lui donner une forme assez proche d'un guide utilisateur.

Chapitre IV: Scénarios d'utilisation et Interfaces Homme/Machine de SINERGIE

IV.1 Introduction

L'objet de ce chapitre est de montrer en quoi les spécifications fonctionnelles de SINERGIE du chapitre II et les supports mathématiques du chapitre III ont permis de constituer le support informatique attendu par ESCOTA pour assister l'exploitant dans son processus de gestion du patrimoine. Cet exposé s'appuie sur la présentation de fonctions élémentaires et de scénarios d'usage.

Un prototype pour SINERGIE a été développé pour les Chaussées, les Ouvrages d'Art et la Signalisation Horizontale. Les exemples présentés dans ce chapitre relèvent donc tous de ces domaines. Dans ce chapitre, nous justifions rapidement nos choix techniques concernant le choix du langage pour SINERGIE (section 2). La section 3 est dédiée aux fonctions de SINERGIE : elle a pour objet de montrer comment les outils mathématiques et les choix logiciels présentés dans les deux chapitres précédents supportent les fonctionnalités de l'outil d'aide à la décision pour la planification des opérations d'entretien et de réparation du patrimoine. Le plan de la section 3 reprend la logique du chapitre précédent en traitant des exemples illustrant les fonctions de consultation/surveillance sous deux angles différents : l'aspect statique (i.e., via l'intranet) et l'outil de visualisation cartographique. Nous parlerons de l'intégration des données correspondant d'une part aux insertions de données trafic et zones d'accumulations d'accidents relevant de l'administrateur—ces données sont essentielles pour donner le contexte de l'opération à réaliser, puis des données de bilans de santé, anomalies et entretiens courants correspondant aux fonctions de consultation/surveillance d'autre part—ces données sont essentielles pour évaluer l'urgence et la priorité de l'opération à réaliser. La section 4 sera dédiée à des scénarios d'utilisation montrant la logique d'utilisation de l'outil d'aide à la décision, de l'évaluation à la planification d'une opération en passant par sa justification.

Enfin, pour d'évidentes raisons de confidentialité, nous précisons que les exemples, en particulier afférents aux opérations programmées, correspondent à des données fictives.

IV.2 SINERGIE : les choix techniques

SINERGIE se compose de deux entités : le Système d'Information et le Système Interactif d'Aide à la Décision. Maintenant que nous avons les modèles de nos deux outils, il faut déterminer leur implémentation physique, leur mode d'utilisation et choisir le langage de programmation.

L'une des principales caractéristiques de SINERGIE réside dans la centralisation et le partage de l'information. Une solution a été d'installer deux serveurs situés au siège d'ESCOTA à Mandelieu :

- Le **Système d'Information** a été conçu pour être une base de données relationnelle. Cette base est stockée sur un serveur qui lui sera dédié : le serveur de bases de données.
- Le **Système Interactif d'Aide à la Décision** est une application proposant des interfaces aux utilisateurs en collaboration forte avec le Système d'Information. Étant donné que SINERGIE est destiné à être utilisé à ESCOTA aussi bien par la Direction de l'Exploitation basée à Mandelieu—commanditaire de l'étude—que dans les différents Districts, la solution d'un **intranet** est apparue la plus efficace. En effet, aucune installation n'est nécessaire sur les postes clients, l'accès à SINERGIE se faisant via une url dans le navigateur. De plus, lors de la livraison d'une nouvelle version de l'application, la mise à jour est simplifiée puisque ne s'effectuant que sur une seule machine : le serveur web.

Il existe de nombreux Système de Gestion de Bases de Données (le plus célèbre restant Oracle). Étant donné que SINERGIE est encore au stade de prototype, nous avons choisi d'utiliser MySQL, un SGDB relationnel comme la plupart des SGDB actuels sur le marché et qui peut être accédé via un langage d'interrogation ou de traitement : le Structured Query Language (SQL).

Le choix d'un langage objet est souvent dicté par la culture informatique de l'entreprise. Comme cela a été vu au paragraphe précédent, il doit supporter le SQL. Parmi les langages permettant une connexion à une base de données, nous résumons comme suit les possibilités envisageables.

Le **CGI** ou Common Gateway Interface est un programme généralement écrit dans un langage de programmation classique, par exemple le C, qui traite les informations qui lui sont envoyées par le client et génère une réponse, au format HTML, correspondant à la demande du client. Ce langage est exécuté sur le serveur. Ainsi toute demande du client produit l'exécution du programme sur le serveur qui envoie la réponse au client. L'avantage est qu'aucune ressource du client n'est sollicitée, en contrepartie ce mécanisme induit une forte utilisation de la bande passante. Ce système peut être utilisé pour interroger une base de données via SQL.

Le langage **PHP** est un langage de programmation web côté serveur (comme le CGI ci-dessus). Il a été conçu pour permettre la création d'applications dynamiques dédiées au web. PHP peut être installé sur les principaux serveurs web du marché. C'est un langage peu typé et souple et donc facile à apprendre mais, de ce fait, des failles de sécurité peuvent rapidement apparaître dans les applications. Il permet également d'interroger une base de données MySQL.

Microsoft propose également un ensemble de technologies web via **ASP.NET** pour créer des sites web dynamiques, des applications web ou des web services XML. ASP.NET fait partie de la plateforme Microsoft .NET et est le successeur de la technologie Active Server Pages (ASP).

Parmi les langages objets, **Java** est le dernier né. Il a connu un fort développement grâce à sa forte complémentarité avec Internet. L'une des particularités du langage Java est son indépendance vis-à-vis de la plateforme d'utilisation. Les **JSP** (*Java Server Pages*) sont un standard permettant de développer des applications Web interactives. Il s'agit d'un langage de script puissant exécuté du côté du serveur (au même titre que les scripts CGI, PHP, ASP, ...) et non du côté client. Ainsi, les Java Server Pages s'inscrivent dans une architecture 3-tier, ce qui signifie qu'un serveur supportant les Java Server Pages peut servir d'intermédiaire (on parle généralement de serveur applicatif) entre le navigateur du client et un serveur de données. La plupart des technologies de pages dynamiques, telles que PHP par exemple, reposent sur un code interprété, ce qui requiert beaucoup de ressources pour fournir la réponse HTTP. Les JSP étant compilées, ces dernières sont beaucoup plus rapides à l'exécution. C'est une technologie rapide pour créer des pages dynamiques. De plus, les JSP étant basées sur Java côté serveur, elles possèdent toutes les caractéristiques faisant la force de Java :

- le multithread ;
- la portabilité ;
- l'objet ;
- la sécurité.

Notre choix s'est donc porté sur le JSP, langage robuste, fiable, rapide d'exécution, indépendant de la plateforme d'utilisation. Ce choix a été appuyé par le fait que nous avons eu à travailler avec d'autres systèmes logiciels en place à ESCOTA, notamment le Système d'Aide à l'Exploitation SAE s'appuyant sur le logiciel DATAVIEWS. En effet, le développement d'un outil complémentaire à SINERGIE, l'outil de visualisation cartographique SINERGIEMAP, a nécessité l'intégration du graphisme utilisé dans DATAVIEWS, ce qui a été possible grâce à l'existence d'une API Java pour DATAVIEWS.

IV.3 Vision statistique et spatiale

Comme nous l'avons déjà évoqué, la société ESCOTA s'est dotée depuis de nombreuses années de structures et compétences pour répondre de façon satisfaisante à la problématique de la conservation et l'évaluation de son infrastructure. Le patrimoine infrastructure vit et subit des agressions de diverses origines (événements météorologiques, chocs, trafic, ... etc.). Son état de santé change au cours du temps et peut avoir une incidence sur ses performances. C'est la raison pour laquelle les gestionnaires de patrimoine programment des inspections dont la périodicité dépend de la nature des éléments de patrimoine. Le résultat de cette surveillance se traduit par la production de bilans de santé. D'autre part, l'analyse qui est faite sur un élément de patrimoine donné à un instant t, dépend non seulement de son état de santé, mais également des informations sur le contexte dans lequel il se trouve : le trafic auquel il est soumis, s'il se trouve dans une zone d'accumulations d'accidents, etc.

D'autres informations viennent compléter cette analyse comme les dernières anomalies détectées et les entretiens courants réalisés sur cet élément de patrimoine.

Au niveau de la logique de mesure, les personnels en charge de l'auscultation disposent déjà d'outils leur permettant de qualifier et quantifier les défauts, comme le logiciel OASIS pour les Ouvrages d'Art : il s'agit ici d'un outil métier centralisant les bilans de santé. Comme nous venons de l'évoquer, les utilisateurs de SINERGIE (i.e., les Districts, les experts métiers COP et le chef de service SVS) ont besoin d'un outil leur permettant de centraliser et partager l'ensemble des données nécessaires à leur analyse sur les éléments de patrimoine. Il y a donc besoin d'un outil offrant une vision globale de l'état des éléments de patrimoine avec l'accès non seulement aux bilans de santé, mais également aux autres données le caractérisant : les zones d'accumulations d'accidents, les données de trafic, les anomalies, les entretiens courants.

Nous allons maintenant décrire comment ces données ont été intégrées à SINERGIE, notamment en distinguant deux aspects :

- **1^{er} aspect** : nous disposons d'un outil « métier » gérant déjà les données à intégrer, et dans ce cas, il faut préciser la façon dont on intègre les données dans SINERGIE ;
- **2^{ème} aspect** : nous ne disposons pas d'outil et il faut mettre en place un protocole de récupération des données, comme c'est le cas notamment pour les bilans de santé des chaussées.

Ensuite, nous aborderons les modes de restitution de ces enregistrements également sous deux aspects :

- **1^{er} aspect** : grâce aux fiches de consultations directement accessibles depuis l'intranet SINERGIE ;
- **2^{ème} aspect** : grâce à l'outil de visualisation cartographique constituant une autre façon de restituer les informations en adéquation avec le besoin de vision globale.

IV.3.1 Intégration par rapport à un outil ou une méthode existante

IV.3.1.1 Le suivi des Ouvrages d'Art

L'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art du 19 Octobre 1979 [ITSEOA, 79] formalise la surveillance organisée pour les ouvrages d'art et constitue un cadre de référence pour les gestionnaires.

Dans cette instruction technique, on distingue trois phases dans la politique de gestion des ouvrages d'art :

- Inventorier
- Surveiller
- Entretien

L'inventaire de l'ensemble des ouvrages d'art consiste à définir le type d'ouvrage. ITSEOA distingue trois types d'ouvrages :

- Les ouvrages de franchissement provisoire ou définitif (pont, viaduc, ... d'une ouverture entre culées supérieure à deux mètres, les buses préfabriquées, métalliques ou autres d'un diamètre supérieur ou égal à deux mètres) ;
- Les tunnels et tranchées couvertes quelle que soit leur longueur ;
- Les ouvrages dont la stabilité est nécessaire à la sécurité d'une voie.

La reconnaissance du tracé est nécessaire non seulement pour identifier l'ouvrage avec son positionnement PR (Point Repère, autrefois on utilisait le terme PK pour Point Kilométrique), s'il s'agit d'un passage inférieur ou supérieur, mais également pour considérer la situation et la zone d'influence de l'ouvrage.

Enfin, ITSEOA [ITSEOA, 79] recommande la création et la mise à jour d'un fichier comprenant la fiche d'identité de chaque ouvrage sur laquelle figure le type de structure, l'accessibilité, les caractéristiques géométriques, l'identification des voies et franchissement.

Une fois que le gestionnaire (dans notre cas, ESCOTA) dispose de l'inventaire des ouvrages, il doit mettre en place une politique de surveillance. La surveillance définie dans l'ITSEOA79 [ITSEOA, 79] et son complément de 1995 comprennent tout d'abord les constats annuels. Il s'agit d'une visite sommaire précisant l'identification de l'ouvrage, la date de visite, les anomalies constatées ainsi que les signes d'évolution. Ensuite, les visites IQOA triennales concernent tous les ouvrages. Cette visite est faite sur le modèle de documents méthodologiques donnant lieu à une évaluation chiffrée de l'état de l'ouvrage selon la cotation 1, 2, 2E, 3 et 3U [Setra, 96]. Les inspections détaillées de périodicité 6 ou 9 ans plus complètes permettent d'établir un bilan de santé très complet de l'ouvrage. Elles concernent les ouvrages non courants (tous les 6 ans, sauf pour les plus robustes tous les 9 ans), et les ouvrages courants dont la note IQOA est supérieure ou égale à 2E.

L'outil OASIS a été développé pour répondre aux besoins de gestion des ouvrages d'art et a été mis en place à ESCOTA. Les visites annuelles sont assurées par les personnels des Districts, les inspections détaillées et visites IQOA triennales sont confiées à une entreprise spécialisée. Son objectif est de synthétiser les constats en vue d'améliorer la maintenance.

Nous nous sommes basés pour SINERGIE sur l'inventaire des ouvrages d'art contenu dans OASIS. Ainsi, SINERGIE a récupéré la liste des ouvrages avec leur identifiant OASIS. Pour éviter les redondances d'informations, mais aussi le problème de cohérence d'informations dû à la mise à jour quotidienne de la base OASIS, SINERGIE ne contient que la liste des ouvrages et leur identifiant OASIS. Pour récupérer les informations sur un ou plusieurs ouvrages, SINERGIE se connecte directement à la base OASIS et interroge cette base avec la liste des identifiants dupliqués. L'avantage de procéder de la sorte est que l'inventaire des ouvrages et les identifiants ne sont que rarement modifiés. Tous les jours, la base OASIS est mise à jour en fonction des enregistrements de visites. Ainsi, il est plus pertinent et plus efficace pour SINERGIE d'aller interroger directement la base OASIS plutôt que de mettre en place une procédure de mise à jour et duplication des données pouvant provoquer un décalage sur l'accès aux données que l'on aurait dupliquées dans SINERGIE.

IV.3.1.2 Les zones d'accumulations d'accidents et les données trafic

Ces données sont traitées en interne à ESCOTA respectivement au service EIT (Exploitation & Ingénierie Trafic) et Péage. Des bilans annuels récapitulatifs concernant ces données sont produits au format Excel.

Les fichiers de trafic fournissent le TMJA (Trafic Moyen Journalier Annuel) et le nombre total de véhicules sur l'année pour les véhicules légers et les poids lourds pour un découpage du réseau en sections de trafic. Les sections de trafic sont repérées par une autoroute, un sens, un PR de début de section et un PR de fin de section, pour une année donnée.

Les fichiers de zones d'accumulation d'accidents (ZAA) répertorient les accidents sur une durée de quatre ans.

Pour des raisons de confidentialité, nous ne montrerons pas le contenu de ces fichiers. La structure de ces fichiers est prédéfinie en interne. Nous avons intégré dans SINERGIE une procédure de décodage de ces fichiers que nous récupérons chaque année auprès du service concerné. Parmi toutes les informations contenues dans ces fichiers, notre protocole de décodage récupère les informations utiles pour SINERGIE :

Pour les données trafic :

- La section de trafic repérée par une autoroute, un sens, un PR de début de section et un PR de fin de section ;
- Le nombre total de véhicules légers et poids lourds ayant circulé sur l'année ;
- Le TMJA des véhicules légers et poids lourds pour l'année considérée.

Pour les données ZAA :

- La localisation de la ZAA, i.e., l'autoroute, le sens et le PR ;

- L'intervalle d'années de comptabilisation des accidents ;
- Le nombre d'accidents.

L'enregistrement dans SINERGIE des données contenues dans les fichiers de trafic (respectivement de ZAA) comprend les étapes suivantes :

- Le téléchargement des fichiers sur le serveur SINERGIE (cf. Figure 83) ;
- Le décodage de chaque fichier pour enregistrement des données précitées dans le Système d'Information (cf. Figure 84).



Figure 83 : charment des fichiers trafic



Figure 84 : résultat de la fonction de décodage et insertion des données trafic

IV.3.2 Intégration par création d'un protocole de récupération des données

IV.3.2.1 Le suivi périodique des chaussées

Depuis le début des années 1990, les sociétés d'autoroutes réalisent, dans le cadre du suivi de leur réseau, l'auscultation systématique et périodique des chaussées avec des appareils à grand rendement. Ces derniers présentent des avantages certains en termes de rapidité d'exécution, d'intégration dans le flot de circulation et de coût de la prestation. Depuis de nombreuses années, ESCOTA mandate la société Vectra pour effectuer ce suivi. Grâce à ses appareils le SCRIM et l'AMAC, la société Vectra assure les relevés des mesures.

L'étude des dégradations possibles (cf. Annexe 2) accentue l'idée qu'il faut suivre et connaître l'état de santé des chaussées de façon à pouvoir traiter les pathologies visibles et aussi anticiper sur des pathologies plus sérieuses et par conséquent plus coûteuses.

La surveillance des chaussées est assurée à partir de mesures d'indicateurs effectuées suivant une périodicité définie dans la convention de suivi et caractérisant des données évolutives pouvant être classées suivant deux rubriques : l'état de surface et l'état de structure. L'état de surface est caractérisé par un ensemble de mesures concernant la sécurité, le confort de l'utilisateur et l'état du revêtement (cf. Tableau 14).

<i>Mesure</i>	<i>Description</i>	<i>SURF</i>
UNI (NBO)	« Notes par bandes d'ondes : » Il caractérise le profil en long de la chaussée. Il y a 3 mesures : - PO (petites ondes) jusqu'à 3m - MO (moyennes ondes) jusqu'à 20m - GO (grandes ondes) jusqu'à 45m. Les PO et MO sont importants pour le confort et la sécurité de l'utilisateur. L'UNI permet de caractériser : - les problèmes de drainage - les problèmes de freinage des véhicules (par exemple si on est sur une bosse et qu'il y a un risque de perte d'adhérence du véhicule)	
Adhérence (CFT)	Tous les granulats de l'enrobée doivent être rugueux afin d'avoir une bonne adhérence.	
Macro rugosité (HS)	L'espace entre les granulats est très important pour faciliter l'écoulement de l'eau.	
Fissures longitudinales sans recouvrement	Sans recouvrement _____	Oui
Fissures longitudinales avec recouvrement	avec recouvrement _____	Oui
Fissures transversales franches et/ou dégradées		Oui
Faïençage total		Oui
Orniérage		Oui
Réparations totales de structure ou de surface		Oui
Ressuage		Oui
Autres dégradations (joint, nid de poule, désenrobage, remontées de fines)		Oui

Tableau 14 : mesures caractérisant l'état de surface

Les paramètres pris en compte pour caractériser l'état de la structure sont relatifs aux mesures du Tableau 15 ci-dessous :

Mesure	Description	STRU
Fissures longitudinales sur bande de roulement avec recouvrement	Sans recouvrement _____	Oui
Fissures longitudinales sur bande de roulement sans recouvrement	Sans recouvrement _____	Oui
Fissures transversales franches et/ou dégradées		Oui
Faïençage sur bande de roulement		Oui
Réparations sur bande de roulement		Oui
Orniérage		Oui

Tableau 15 : mesures caractérisant l'état de la structure de la chaussée

A partir des mesures des Tableau 14 et Tableau 15, deux indicateurs, l'indice de dégradation de surface **SURF** et de dégradation de structure **STRU**, caractérisant respectivement l'état de surface et de structure, permettent d'avoir une vision globale de l'état de la chaussée. Ils sont calculés au moyen d'une somme pondérée au pas de 100m des mesures précisées dans le Tableau 14 et le Tableau 15. Même si certaines mesures interviennent conjointement dans le calcul du SURF et du STRU, elles n'ont pas forcément la même pondération du fait de leur incidence différente au regard de la surface ou de la structure.

Enfin, un dernier indicateur est calculé : l'**index de qualité structurale IESC**.

$$I_{IESC} = 0.2R1 + 0.3R2 + 0.5R3 \text{ si } R1 < 1$$

$$I_{IESC} = 0.2R'1 + 0.3R2 + 0.5R3 \text{ si } R1 > 1 \text{ calcul de } R'1, \text{ avec :}$$

Mesure	Description
R1 ou R'1	Influence à la déflexion par rapport au trafic (déformation verticale d'un point de la chaussée) $R1 = \frac{\text{nombre de cycles réels}}{\text{nombre de cycles critiques}}$ $R'1 = \frac{\text{nombre de cycles réels}}{\text{nombre de cycles de rupture}}$
R2	Indice de dégradation de structure
R3	Probabilité du risque à la rupture associé à chaque section témoin (en %)

Tableau 16 : mesures caractérisant l'indice de qualité structurale

Le nombre de cycles réels correspond au nombre de fois où la chaussée a été mise sous contrainte. Le nombre de cycles de rupture est le nombre de cycles nécessaire pour qu'il y ait rupture de la chaussée. En fait, on prend $R1$ ou $R'1$ en fonction de l'état de dégradation de la chaussée.

Le nombre de cycles réels est fonction du trafic cumulé poids lourd NPL .

$$\text{Nombre de cycle réel} = NPL * 0.7 * \text{coefficient d'agressivité}$$

où le coefficient d'agressivité varie en fonction de la structure GH (hydraulique), GB (bitumineuse), ou traditionnelle de la chaussée.

Pour les Chaussées, le suivi annuel est assuré par le Centre d'Études Techniques de l'Équipement Méditerranée (CETE) qui récupère les données de mesures effectuées sur l'ensemble des chaussées et produit une synthèse globale annuelle. Un système d'analyse des résultats des mesures a été mis au point à l'aide du logiciel SEMI, développé par le Réseau Scientifique et Technique. Il permet de produire une synthèse générale représentant les mesures HS, CFT, UNI ainsi que les trois indices SURF, STRU et IESC. Une plage de couleurs est définie pour représenter les valeurs de ces mesures et indices.

Toutes ces données numériques sont stockées dans le logiciel SEMI au CETE d'Aix-en-Provence. SINERGIE ayant besoin de restituer une vision globale de l'état des chaussées, nous avons défini un protocole de récupération des données concernant le suivi des chaussées pour intégration dans SINERGIE (cf. Annexe 4). De plus, nous avons développé dans SINERGIE une fonction d'insertion automatique de ces fichiers comprenant une procédure d'enregistrement de ces fichiers sur le serveur suivi du décodage de ces fichiers pour insertion dans la base de données. Sur la Figure 85, nous pouvons constater que la procédure a permis d'enregistrer d'un seul coup les 90 fichiers du suivi de l'année 2006.



Figure 85 : insertion des fichiers de bilans de santé chaussées

Ainsi pour chaque autoroute, dans chaque sens de circulation nous disposons maintenant des valeurs des mesures au pas de 100m. La restitution de ces données est évoquée au IV.3.3.2.

L'avantage de disposer de ces données en base est qu'il est possible d'afficher un bilan de santé pour une année antérieure. Nous disposons ainsi de l'historique de l'évolution des chaussées consultable à tout moment. Les relevés de mesures sont réalisés annuellement sur un tiers du réseau. Ainsi, sur un cycle triennal, nous couvrons l'ensemble du réseau autoroutier.

IV.3.2.2 Les anomalies et les entretiens courants

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent dans la description des fonctions de SINERGIE, les anomalies sont des dégradations visuelles constatées par les personnels d'ESCOTA lors de leur circulation sur le réseau. Les entretiens courants des travaux de faible technicité permettent d'éviter l'apparition de pathologies.

Les Districts assurent la réalisation des entretiens courants et restent les plus aptes à détecter les anomalies sur le réseau dont ils ont une bonne connaissance technique. Centraliser les informations relatives aux anomalies et aux entretiens courants est très important pour l'analyse de risque technique faite par un COP lorsqu'il évalue une opération. En effet, savoir qu'une anomalie est

récurrente sur un élément de patrimoine peut constituer une alerte quant à l'existence d'une éventuelle pathologie à traiter avant qu'elle ne s'aggrave et nécessite des travaux plus importants.

Les Districts ont besoin d'un outil pour enregistrer ces informations de façon rapide et claire. Nous avons donc défini les formats de fiches anomalies et entretiens courants pour les éléments de patrimoine dans SINERGIE.

Nous avons établi le format suivant pour les fiches anomalies :

- La date de constat ;
- L'EP concerné ;
- La partie d'EP concernée ;
- Le type de dégradation ;
- Un commentaire ;
- Une proposition de traitement ;
- La description du traitement réalisé dans le cas où cette anomalie a été traitée.

Ce format de fiche est valable pour toutes les anomalies. La Figure 86 présente le formulaire d'enregistrement d'une anomalie détectée sur une bretelle d'échangeur.

The screenshot shows the 'Enregistrer une anomalie CHAUSSEES' form. On the left is a navigation menu with options like 'Accueil', 'Opérations', 'Éléments de Patrimoine', 'Projet D21 / DT', 'Bilan de santé', 'Anomalies', 'Entretien Courant', and 'Enregistrer'. The main form contains the following fields:

- Titre:** bretelle échangeur
- Date:** 30 / 7 / 2007
- Chaussée:** A50 - Marseille - Toulon (PR 15.362 à 67.676)
- du PR:** 60 **au PR:** 60
- Voie:** VL, VM, VR, BAU, Echangeur (checked)
- Dégradation(s):** FL, FT, Falencage (checked), Orniérage, Reparations totales
- Commentaires:** arrachements sens 1 sur 360m2 et sur 560m2 dans le sens 2. Une demande de devis est en cours pour
- Proposition de traitement:** (empty)
- Traitement effectué le:** 30 / 7 / 2007
- Description du traitement (si effectué):** (empty)

An 'Enregistrer' button is located at the bottom of the form.

Figure 86 : fiche d'insertion de l'anomalie « bretelle échangeur » pour les chaussées

Le District complète cette fiche en exprimant son analyse technique dans le champ « commentaires » comme à la Figure 86 où des précisions sont apportées sur l'étendue des dégradations. Dans le cas des Ouvrages d'Art, la fiche anomalie garde le même format que la fiche anomalie pour les chaussées (cf. Figure 87). La différence réside dans la liste des dégradations et des parties d'éléments de patrimoine concernées (les voies sont remplacées par les parties d'ouvrages et les dégradations des chaussées sont remplacées par celles relatives aux ouvrages d'art). Le contenu de la fiche anomalie s'adapte ainsi au domaine métier considéré.

Figure 87 : fiche d'insertion d'une anomalie sur un ouvrage d'art

La fiche de description d'un entretien courant comprend :

- L'EP sur lequel a été réalisé l'entretien avec la localisation PR ;
- La date de réalisation ;
- Les éléments de l'EP concerné ;
- La nature de l'entretien ;
- Un commentaire.

Enregistrer un Entretien Courant

Figure 88 : enregistrement d'un entretien de purges sur une chaussée

Dans l'exemple de la Figure 88, il s'agit d'enregistrer des purges localisées réalisées sur la voie lente à partir du PR 20 sur 200m.

IV.3.3 La consultation des données dans SINERGIE

Lorsqu'un utilisateur se connecte sur SINERGIE, il s'identifie en tant qu'utilisateur de type District, Conducteur d'OPération ou chef de service SVS. Ainsi, cela filtre automatiquement les données qu'il a le droit de consulter comme nous l'avons évoqué dans la sous-section définissant les acteurs et leurs droits d'accès à l'information dans la modélisation objet UML. Le district de Mandelieu (cf. Figure 89) dispose dans son menu principal de la liste des opérations classées par type de budgets et des anomalies en cours, des derniers bilans de santé enregistrés dans SINERGIE. Pour les bilans de santé, nous disposons dans SINERGIE de ceux concernant les Chaussées et la Signalisation Horizontale dans notre exemple.

Nous rappelons que le District a accès à tous les éléments dépendant de ses limites géographiques, le COP à tous les éléments de patrimoine du corps de métier dont il est responsable sur tous les districts et, enfin, le chef de service SVS à tous les éléments pour tout corps de métier et tout District.

Les pages de l'intranet SINERGIE ont toutes la même structure. Elles se composent d'un menu statique vertical sur la gauche listant toutes les fonctions de SINERGIE, d'une aide à la navigation sur la droite (ce sont essentiellement des liens raccourcis), et la partie centrale comprenant les informations de la page affichée en cours.

The screenshot shows the SINERGIE interface for the District of Mandelieu. At the top, the logo 'SINERGIE ESCOTA' is displayed next to the title 'ESCOTA - Gestion du patrimoine Infrastructure'. Below this, the user's session information is shown: '30 Juillet 2007 - DISTRICT de Mandelieu' and 'utilisateur man connecté'. A 'Déconnexion' button is located in the top right corner. On the left side, there is a vertical menu with the following items: 'Accueil', 'Consulter', 'Opérations', 'Éléments de Patrimoine', 'Projet D2I / DT', 'Bilan de santé', 'Anomalies', 'Entretien Courant', 'Enregistrer', 'Anomalie', and 'Entretien courant'. The main content area is divided into three sections: 'Opérations en cours' (listing 2 operations), 'Anomalies en cours (à traiter)' (listing 23 anomalies), and 'Les derniers Bilans de santé enregistrés' (listing 2 health reports for CHAUSSEES and 2 for SH).

Figure 89 : menu principal du District de Mandelieu

Le menu principal du COP Chaussées (cf. Figure 90) recense toutes les opérations Chaussées en cours sur le réseau, les derniers bilans de santé enregistrés, ainsi que les anomalies en cours et les derniers entretiens courants réalisés tout district confondu.



Figure 90 : menu principal du COP Chaussées

Le chef de service quant à lui dispose de la synthèse de la vision des autres utilisateurs de SINERGIE. Il visualise l'ensemble des opérations en cours, la liste des derniers bilans enregistrés, les anomalies et entretiens courants pour chaque domaine métier. Nous évoquerons ultérieurement la consultation des évaluations en urgence.

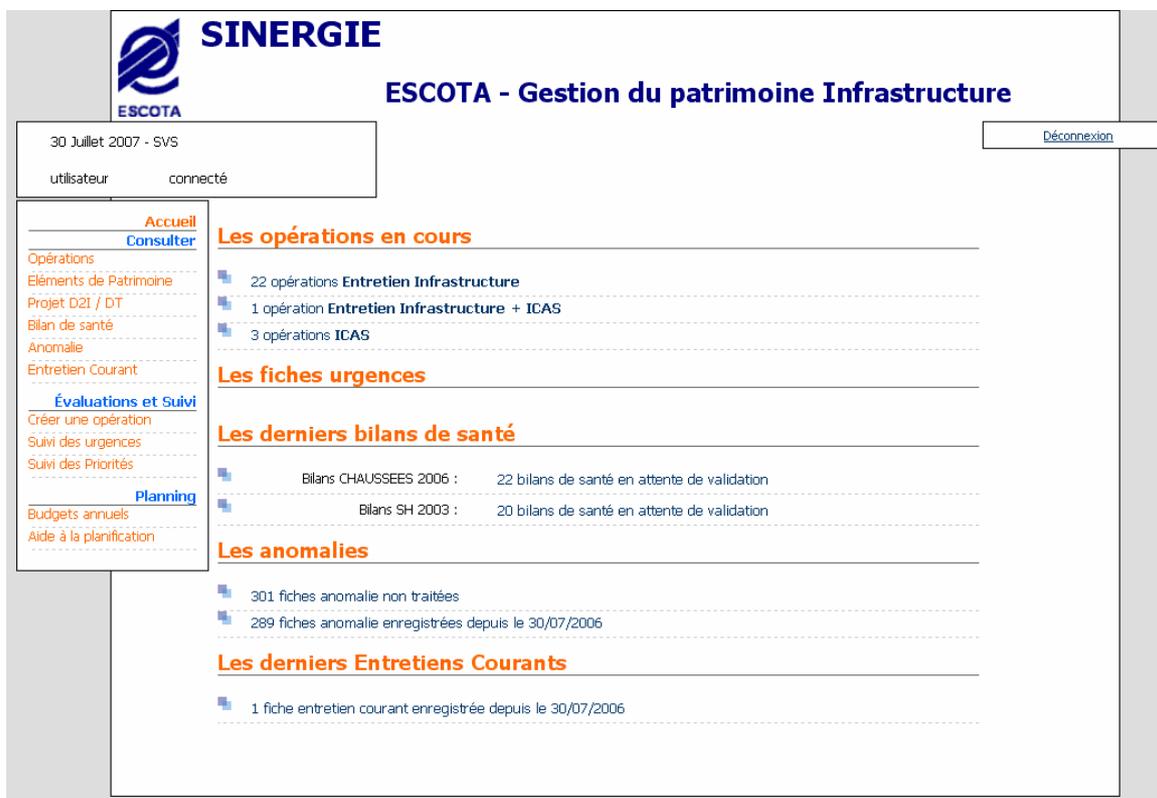


Figure 91 : menu principal du chef de service SVS

Pour la suite des exemples de consultations, nous allons nous concentrer sur les Chaussées afin de mettre en évidence la logique d'utilisation de SINERGIE.

IV.3.3.1 L'accès aux éléments de patrimoine

Dans un souci de flexibilité, nous avons défini les éléments de patrimoine Chaussées comme une autoroute dans un sens de circulation appartenant à un District. Nous n'avons pas repris le découpage en sections d'autoroute comme cela existe pour la définition des sections trafic. Pour parler d'une portion de chaussée, il suffit d'indiquer à SINERGIE un PR de début et de fin. Notre définition reste générique.

L'accès à la liste des Chaussées du District de Mandelieu par exemple, pour chacun de nos trois utilisateurs, se fait en cliquant sur « **éléments de patrimoine** » dans leur menu gauche. Le District et le chef de service SVS doivent ensuite sélectionner le domaine Chaussées (puisqu'ils ont accès aux autres domaines).



Figure 92 : sélection du domaine pour le chef de service SVS

Le District récupère ainsi la liste des Chaussées sur son district (cf. Figure 93).



Figure 93 : liste des chaussées pour le District de Mandelieu

Pour obtenir le résultat de la Figure 93, le COP et le chef de service doivent encore sélectionner le District (cf. Figure 94).



Figure 94 : sélection du District pour le Chef de service SVS

Maintenant, plaçons-nous dans les conditions du COP pour continuer cette recherche d'informations. En cliquant sur l'A8 sens 2 du district de Mandelieu (cf. Figure 93), le COP visualise les informations de la Figure 95. Dans la partie centrale, nous avons la localisation de la Chaussée avec sa composition en nombre de voies. Ensuite, une synthèse récapitule les dernières informations sur l'état de santé de cette chaussée : les anomalies en cours, les derniers entretiens courants réalisés, les opérations programmées et les derniers bilans de santé consultables.

Sur la partie droite de la Figure 95 se trouvent des liens raccourcis pour la gestion des opérations pour cette chaussée. Au-dessous sont affichés les liens vers les données trafic relatives à la zone de PR définie par la chaussée et les statistiques de zones d'accumulations d'accidents des quatre dernières années. Les données trafic visualisées en cliquant sur le lien « Fréjus – Les adrets » sont restituées Figure 96 sous forme de camemberts pour rendre la donnée plus agréable à lire.

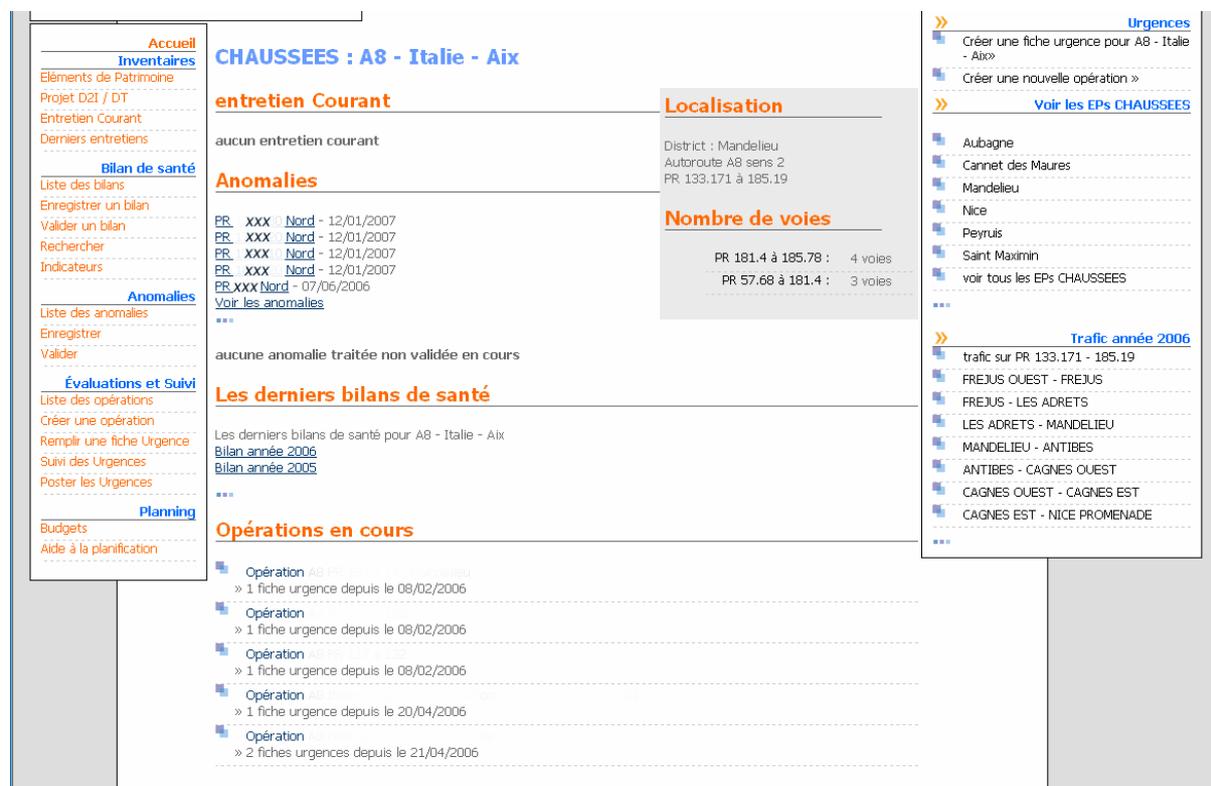


Figure 95 : fiche de la Chaussée A8 – Italie – Aix

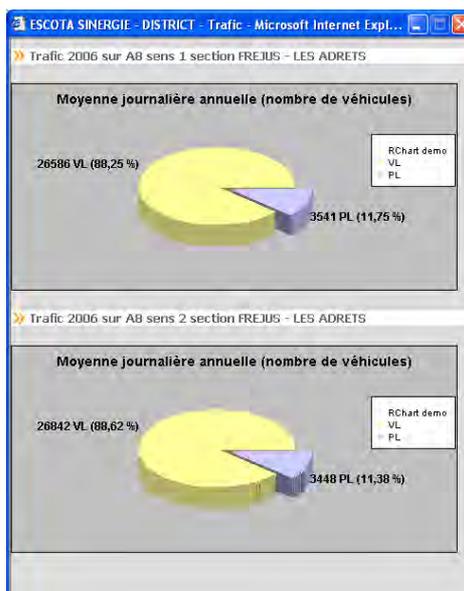


Figure 96 : exemple de données trafic

IV.3.3.2 Les bilans de santé

L'accès aux bilans de santé Chaussées se fait soit en cliquant sur le lien Bilan de Santé dans le menu gauche de la page, soit directement depuis le lien proposé dans la fiche de consultation de la chaussée dans la rubrique « **derniers bilans de santé** » de la partie centrale de la page (cf. Figure 95).

Nous avons choisi de retranscrire les données enregistrées sous la forme de camemberts afin de représenter la proportion de la chaussée dans chaque plage¹² de valeurs. Le COP lorsqu'il analyse une section de chaussée pour diagnostiquer s'il est nécessaire de faire des travaux, a besoin de visualiser les proportions des valeurs discrètes prises par chaque mesure. Il peut afficher cette synthèse pour la chaussée entière, mais également demander à recalculer les proportions des mesures sur une section plus petite. Pour cela, deux curseurs (situés en haut de la Figure 97) permettent de changer les valeurs des PR de début et de fin de la chaussée. Pour plus de lisibilité et faciliter la lecture des graphes, le découpage en plages de variation des mesures est rappelé sous chaque camembert (cf. Figure 97).

¹² Pour chaque mesure des seuils ont été déterminés au préalable sur la plage de variation de la mesure. Ils donnent une représentation discrète des mesures, i.e. sous forme de classes : $\forall i \in \{1, I-1\}, S_i \leq \text{mesure} \leq S_{i+1}$ où I est le nombre de classes.

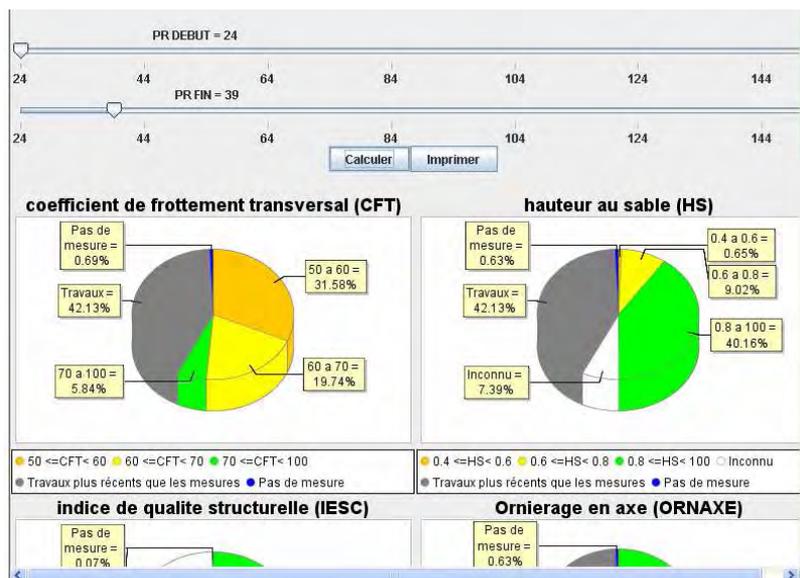


Figure 97 : représentation d'un bilan de santé sur une chaussée

Il s'agit là d'un second aspect du concept d'agrégation proposé dans SINERGIE. Il s'apparente plus à de la fusion d'information, du résumé d'information : les utilisateurs doivent toujours pouvoir conjointement accéder à une vision locale et à une vision globale du réseau. La dénomination d'agrégation pour désigner le processus qui permet de passer de points de vue locaux à une vue de synthèse est largement ancrée dans les pratiques des gestionnaires de patrimoine, d'autant plus lorsqu'il s'agit d'un patrimoine linéaire. Ainsi, avec SINERGIE, la consultation des bilans de santé des chaussées permet au COP de consulter des valeurs moyennes et lui donne également la possibilité de descendre plus dans le détail en analysant ces informations sur une zone plus restreinte. Cette agrégation *métier* a de plus nécessité une structure particulière dans le Système d'Information comme nous l'avons vu dans le chapitre 3 avec les tables spécifiques aux bilans de santé pour les chaussées.

IV.3.3.3 Les anomalies et entretiens courant

La fiche de consultation de la chaussée Figure 95, dans la partie centrale, propose les liens vers les dernières anomalies enregistrées. En cliquant sur la première, le COP obtient le contenu de cette fiche à la Figure 98 avec la description de cette anomalie, l'état de son traitement, un formulaire pour enregistrer son analyse et la possibilité d'intégrer cette anomalie à une opération programmée sur cette chaussée.

Figure 98 : fiche anomalie sur une chaussée (vue COP)

Dans cet exemple, les travaux n'ont pas été réalisés. Les travaux étant validés sur le terrain par les Districts, ils disposent d'un formulaire pour leur enregistrement intégré dans l'affichage de l'anomalie Figure 99.

Figure 99 : fiche anomalie sur une chaussée (vue District)

La Figure 95 ne liste aucun entretien courant pour cette chaussée. Pour consulter des entretiens courants, nous choisissons de cliquer sur le lien correspondant dans le menu gauche de la page (cf. Figure 98). Nous obtenons le tableau récapitulatif Figure 100 :



Figure 100 : récapitulatif des entretiens courants sur les chaussées par District
Les informations obtenues lors de la consultation d'une fiche sont représentées à la Figure 101.

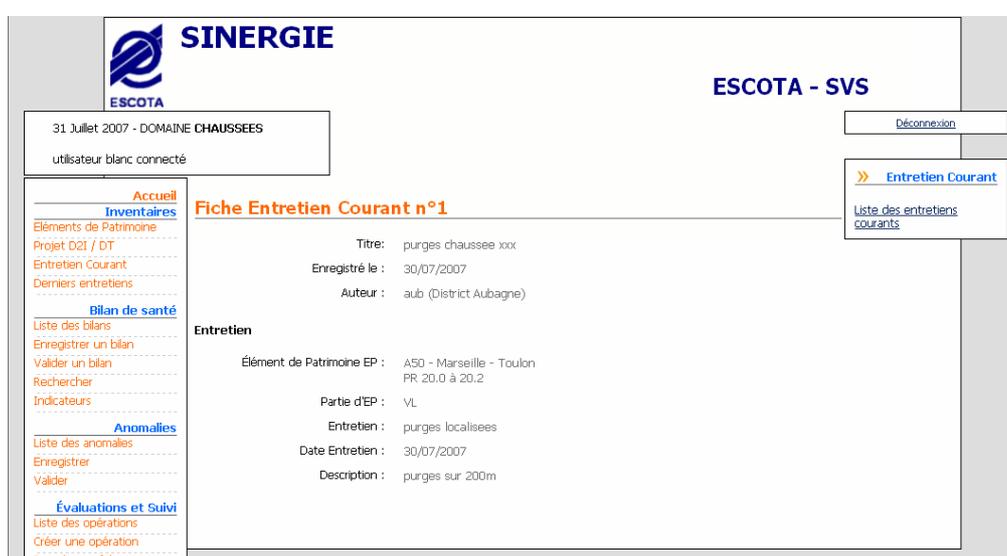


Figure 101 : une fiche entretien courant

IV.3.4 SINERGIEMAP : la vision globale cartographique

L'outil SINERGIE a permis de centraliser l'information sur l'état de santé des Chaussées et de la rendre accessible à l'ensemble des utilisateurs. En effet, nous venons de présenter l'affichage des mesures réalisées lors des auscultations des chaussées sous la forme de camemberts pour une chaussée sur une autoroute, dans un sens de circulation appartenant à un District (cf. Figure 97). Cependant, la consultation des bilans de santé des Chaussées ne permet pas d'avoir en un « seul coup d'œil » une vision globale de l'état de santé des autoroutes dans leur ensemble. Ainsi, la création d'un outil cartographique pour afficher les informations contenues dans SINERGIE s'est avérée indispensable pour les utilisateurs. Ce nouveau mode de visualisation correspond au besoin d'un outil de supervision générale chez ESCOTA.

L'idée est donc d'afficher une carte du réseau autoroutier avec la possibilité d'instruire le tracé selon le code couleur défini dans les bilans de santé des chaussées (cf. Figure 97) pour chacune des mesures contenues dans SINERGIE.

ESCOTA dispose déjà de deux outils cartographiques. Par souci d'homogénéité entre les outils utilisés dans la société, il nous est apparu judicieux de limiter notre choix à l'un d'eux. ESCOTA dispose de son propre Système d'Information Géographique, un outil puissant, permettant une représentation très fine et une localisation très précise sur l'ensemble du réseau. Toutefois, l'outil cartographique que nous devons créer ne demande pas une précision aussi fine dans le tracé, mais

doit plutôt permettre la visualisation de l'état du réseau sur un synoptique. L'autre possibilité de représentation graphique est celle offerte par le Système d'Aide à l'Exploitation (SAE). Ce dernier est utilisé pour améliorer la gestion du trafic, les systèmes de détection d'incidents et les procédures d'intervention et d'information sur le réseau lequel est représenté schématiquement sous la forme de synoptiques à l'écran (cf. Figure 102). Cet outil fonctionne en temps réel, 24h/24. Pour ne pas interférer dans son fonctionnement et étant donné que seul le graphisme de l'outil nous intéresse, nous avons récupéré tous les objets constitutifs du graphisme afin de pouvoir développer notre propre outil indépendamment baptisé **SINERGIEMAP**.

IV.3.4.1 Présentation de Dataviews

Les objets du graphisme de l'outil du SAE fonctionnent sous le logiciel Dataviews édité par la société GEFANUC. Dataviews propose des outils de développement graphique de qualité pour que les utilisateurs adaptent leurs interfaces homme machine (IHM) en utilisant leur propre système et langage de programmation. Dans notre cas, il représente un gain de temps dans la réalisation de l'outil cartographique. En effet, GEFANUC propose sur son site en téléchargement une API Java (Advanced Programming Interface) pour le développement d'une application graphique basée sur des objets Dataviews.

Les objets que nous avons récupérés sont des vues, c'est-à-dire les fonds de carte apparaissant à l'écran sur lesquels sont définis des calques d'objets. Par exemple, la Figure 102 se compose du fond de carte avec les contours de la région PACA et d'un ensemble d'objets superposés comme des calques. Les catégories de calques que nous distinguons sont les sections d'autoroute, les panneaux à messages variables, les caméras de surveillance, etc.



Figure 102 : outil Système d'Aide à l'Exploitation SAE

La plupart des objets de la figure ci-dessus sont inutiles pour notre application, aussi avons-nous modifié l'affichage dans les différentes vues afin de ne conserver que les fonds de carte et le tracé. Au lancement, notre programme affiche ainsi la carte représentée sur la Figure 103.

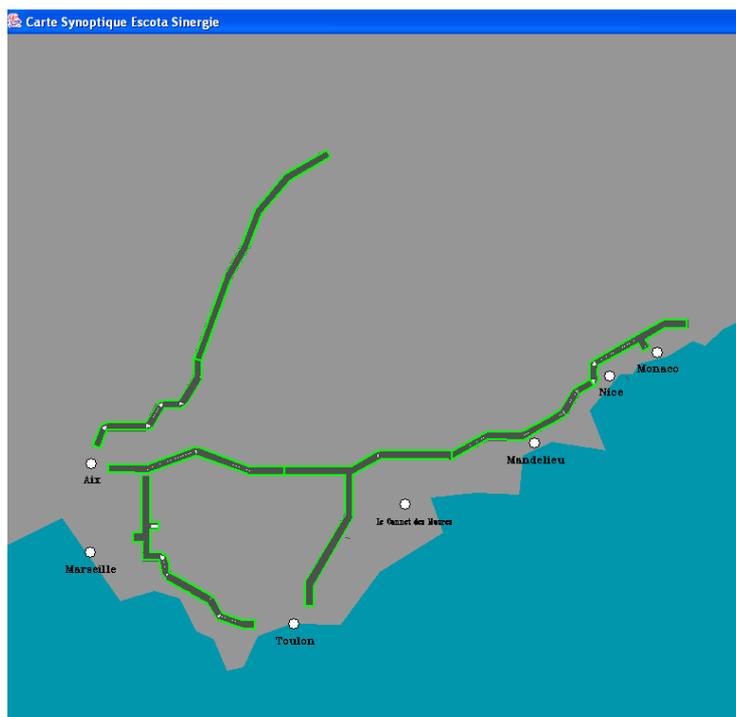


Figure 103 : synoptique du réseau ESCOTA

La figure ci-dessus représente la vue « **réseau** », mais nous avons également récupéré les vues plus détaillées correspondant à chaque District (cf. Figure 104 pour la vue concernant le District de Mandelieu).

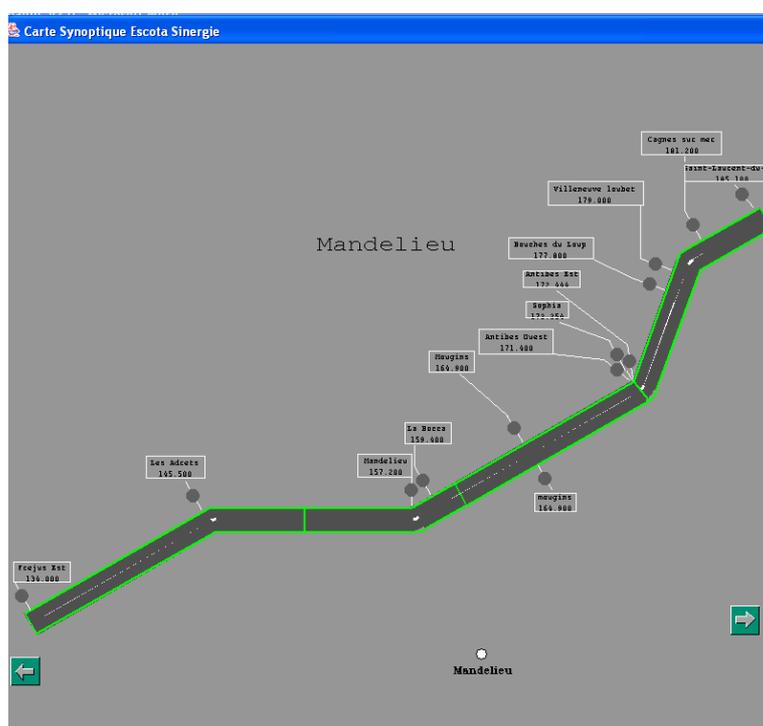


Figure 104 : zoom sur le District de Mandelieu

Ce travail a été rendu possible grâce à l'API Dataviews. Maintenant, notre objectif est de rajouter sur ces cartes les informations relatives aux bilans de santé. Pour ce faire, nous avons la possibilité de superposer nos propres calques ou accéder directement aux objets. En effet, nous avons appris comment accéder aux objets d'une vue en rendant invisibles les objets inutiles, nous pouvons

également changer leur couleur, ce que nous nous proposons de faire pour les bilans de santé des chaussées à titre d'illustration.

IV.3.4.2 L'outil pour les chaussées

Comme nous l'avons vu à la Figure 97, SINERGIE contient pour chaque mesure réalisée sur la chaussée les valeurs mesurées et le code couleur des plages de valeurs associées. Nous avons rajouté un menu sur la gauche de notre carte comprenant la liste des mesures. Lorsqu'on coche un type de mesure, l'application se connecte au Système d'Information de SINERGIE, récupère l'ensemble des mesures pour toutes les chaussées de la vue courante ainsi que le code couleur. Pour chaque section de chaussée à l'écran, nous calculons les proportions de la mesure dans chaque plage de valeurs. La carte est mise à jour à l'écran, chaque section prenant la couleur de la plage dont le pourcentage est le plus élevé.

La Figure 105 propose un exemple où nous avons coché la Hauteur au Sable, la carte a été coloriée selon le code couleur rappelé Figure 105. En cliquant sur la carte sur le District de Peyruis, nous obtenons la carte centrée sur Peyruis (cf. Figure 106). Les données de mesures de hauteur dans les figures ci-dessous sont fictives pour pouvoir produire un exemple et ont été modifiées dans le logiciel pour des raisons de confidentialité.

Nous pouvons encore aller plus dans le détail et cliquer sur la chaussée à la hauteur de Sisteron, nous obtenons la carte représentée à la Figure 107. Nous avons indiqué que la couleur est celle dont la plage de mesures est la plus représentée. La Figure 108 montre qu'en cliquant sur la chaussée sud, nous obtenons le camembert détaillant les proportions de chaque plage de valeurs sur cette section, le seuil vert étant bien le plus représenté.

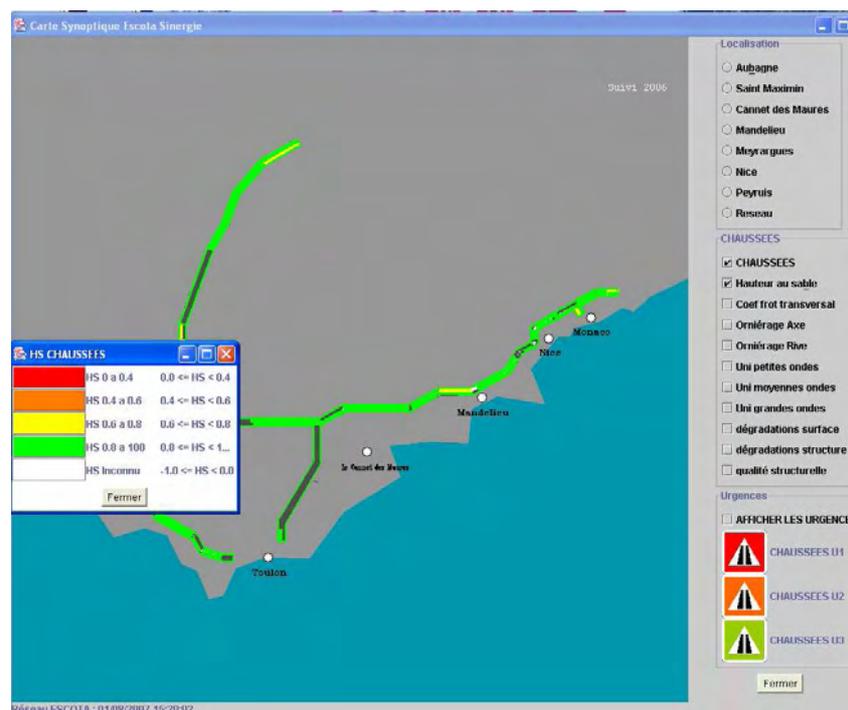


Figure 105 : hauteur au sable sur le réseau

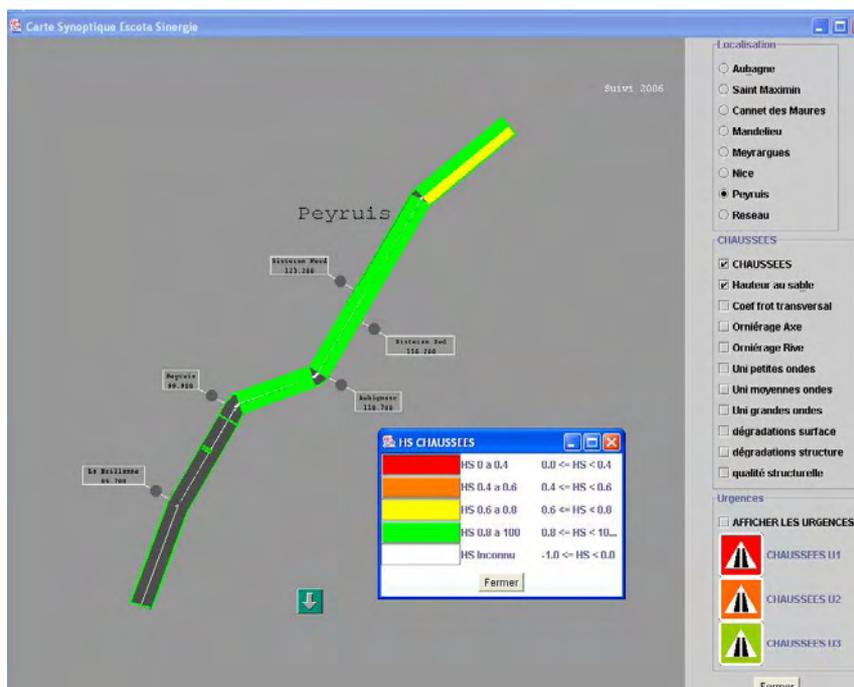


Figure 106 : hauteur au sable zoomée sur Peyruis

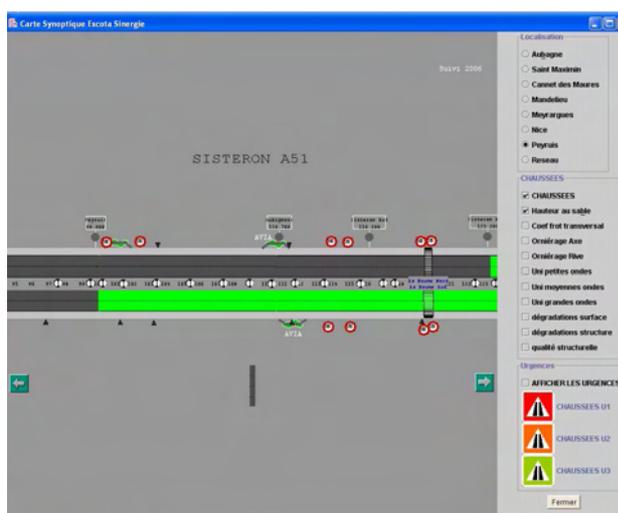


Figure 107 : hauteur au sable zoomée sur Sisteron

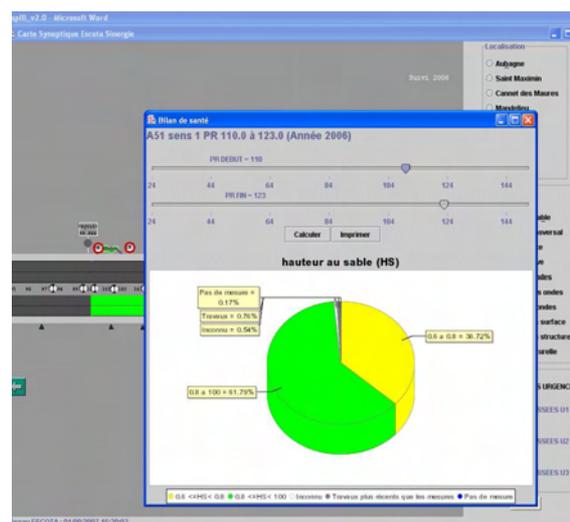


Figure 108 : détail des proportions sur la section sud de la chaussée

L'outil pour les mesures réalisées sur la Signalisation Horizontale est identique, à la différence près qu'il interroge SINERGIE sur les valeurs de mesures de Signalisation Horizontale et récupère les codes couleur des seuils correspondants.

IV.3.4.3 L'outil pour les Ouvrages d'art

Le développement de l'outil pour les ouvrages d'art a été légèrement différent. En effet, les informations que nous souhaitons afficher sont les cotations IQOA des ouvrages. Nous proposons à l'utilisateur un menu de cases à cocher pour sélectionner une valeur de cotation IQOA pour laquelle il souhaite voir afficher les ouvrages ayant cette cotation. L'utilisateur a également la possibilité de cocher plusieurs valeurs de cotation de façon à rechercher les ouvrages dont la cotation est égale à l'une des notes cochées. Les ouvrages trouvés sont représentés par un objet symbolisant un pont et localisés sur la carte.

Lors d'une recherche d'ouvrages ayant une même cotation, il se peut que plusieurs ouvrages, se trouvant dans une même zone, fassent partie du résultat. Pour plus de lisibilité sur la carte, ces ouvrages « proches » auront les mêmes coordonnées d'affichage. En cliquant sur un objet « pont » sur la carte, à partir de ses coordonnées d'affichage, nous retrouvons la liste des ouvrages associés pour les afficher.



Figure 109 : liste des ouvrages en cotation 2 sur un District

A titre d'exemple, la Figure 109 représente le résultat de la recherche des ouvrages en cotation 2 sur le District de Saint Maximin. Le clic sur un de ces objets ouvre une fenêtre avec la liste des ouvrages dans cette zone avec une note IQOA égale à 2. En cliquant sur l'un des objets résultats, la fenêtre résultat (popup à fond blanc au bas de la Figure 109) affiche deux ouvrages dans sa partie gauche. Le clic sur le premier ouvrage de cette liste affiche le résumé de sa dernière visite IQOA sur la droite de la fenêtre.

Cet outil ne se substitue en aucun cas à l'outil OASIS dont il propose une vision macroscopique des informations sur les ouvrages. En effet, nous ne récupérons que la dernière visite IQOA et les caractéristiques principales des ouvrages. Ce que nous proposons ici est une requête de sélection des ouvrages **filtrés** en fonction de leur dernière cotation IQOA. Une évolution logique de notre outil est l'ajout de requêtes filtres comme par exemple la sélection des ouvrages en fonction de leur note IQOA sur la structure, etc.

IV.3.4.4 Les problèmes techniques rencontrés

Dataviews est un logiciel propriétaire pour lequel la société GEFANUC fournit l'api nécessaire pour développer des applications en Java. Or, nous nous sommes rendus compte que cette dernière ne fonctionne que sous la version 1.3 de l'environnement JRE de SUN (i.e. Java Runtime Environment). La récupération des cotations IQOA dans OASIS nécessite une connexion à sa base de données Microsoft Access, cette connexion étant possible à partir du JRE 1.5. De plus, les postes utilisateurs à ESCOTA sont équipés de la version 1.5 du JRE de SUN.

SINERGIEMAP a été ainsi conçu pour s'exécuter dans le JRE 1.5 pour pouvoir s'exécuter sur les postes utilisateurs. Pour la connexion à la base Access de l'outil OASIS, il nous a fallu intégrer à SINERGIEMAP un programme spécifique fonctionnant sous le JRE 1.3. Ce programme fonctionne en parallèle à SINERGIEMAP. Lorsque la connexion à la base OASIS est demandée, SINERGIEMAP communique avec ce programme via le RMI de Java (Remote Method Invocation). Le RMI nous permet d'appeler les fonctions d'accès à la base OASIS et d'en récupérer les résultats.

Cette solution fonctionne bien, cependant cela nécessite l'installation supplémentaire du JRE 1.3 sur les postes utilisateurs.

Nous venons de détailler toutes les interfaces relatives à l'enregistrement et à la consultation des données contenues dans SINERGIE. Avant de passer à l'enregistrement et l'évaluation des

opérations, nous allons tout d'abord présenter comment paramétrer les moyennes pondérées dans SINERGIE pour calculer les urgences et priorités d'intervention.

IV.4 Paramétrage des évaluations dans SINERGIE

Conformément à la sous-section dédiée à « l'agrégation multicritère » du chapitre 2, l'évaluation de l'urgence d'une opération se fait en agrégeant les scores exprimés sur l'échelle symbolique $\{U_1, U_2, U_3, 0\}$ au regard de chacun des critères d'évaluation avec une moyenne pondérée. La section « Identification expérimentale des paramètres et échelles d'évaluation » du chapitre 2, et plus particulièrement la sous-section « échelles d'évaluations et cotations », précise les éléments à définir pour pouvoir effectuer ce calcul d'agrégation:

- la liste des critères ;
- les poids associés à chaque critère ;
- pour chaque critère i , les valeurs numériques $\{u_3^i, u_2^i, u_1^i\}$ des étiquettes symboliques $\{U_3, U_2, U_1\}$.

Considérons le domaine des Chaussées et calculons les poids des critères et les échelles des étiquettes symboliques selon chaque critère à l'aide du logiciel Macbeth tel que cela est décrit au chapitre II.

La première étape consiste à définir une liste de plans d'actions, dans notre cas, il s'agit d'une liste d'opérations chaussées dénommées A à J. Pour des raisons de confidentialité, nous ne donnerons pas le détail de ces opérations, mais ce sont des opérations réelles choisies de façon à couvrir le maximum de problématiques existantes sur les chaussées (représentativité des cas réels dans la base d'apprentissage). Rappelons la liste des critères d'urgence : sécurité, pérennité, confort, image de marque, protection de l'environnement, réglementation, social-organisation et sanitaire. Pour chaque critère, le COP Chaussées a classé l'ensemble des opérations A à J de la plus urgente à la moins urgente et les compare ensuite deux à deux en quantifiant leur différence d'attractivité au regard du critère considéré. L'exemple pour le critère sécurité est représenté à la Figure 110. Une fois la matrice remplie, Macbeth calcule le classement des plans d'actions sur une échelle de 0 à 100 (cf. à droite de la Figure 110). Le calcul des clusters donne pour le critère *sécurité* comme résultats dans $[0, 1]$: $u_1^{sécurité} = 0.91, u_2^{sécurité} = 0.52, u_3^{sécurité} = 0.11$.

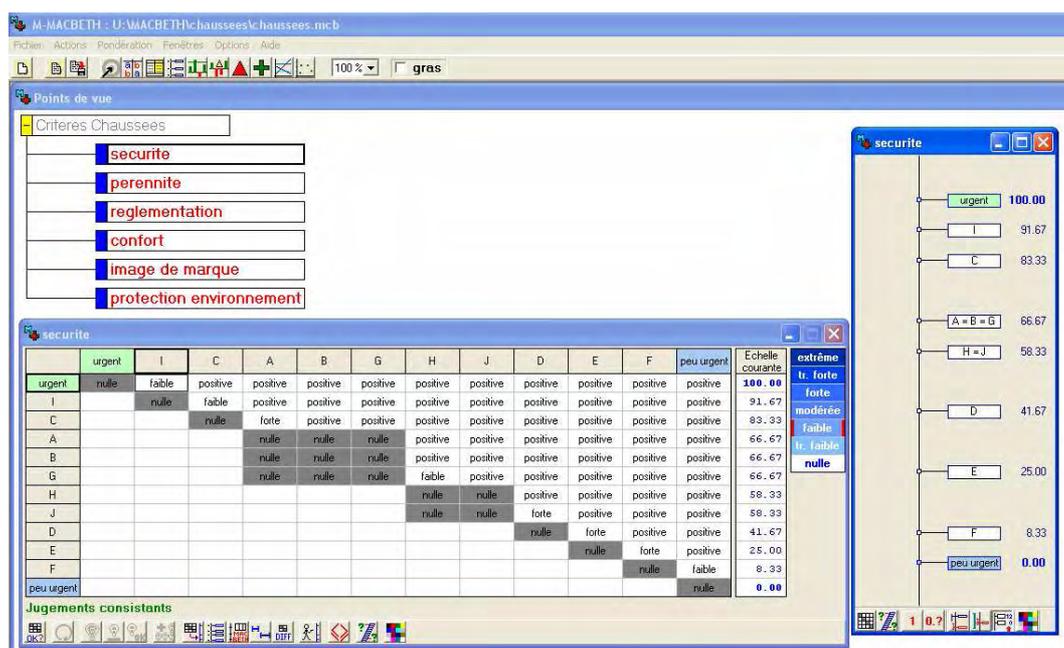


Figure 110 : comparaison des plans d'actions chaussées selon le critère sécurité avec Macbeth

Cette opération effectuée pour chaque critère i nous permet d'obtenir les valeurs numériques $\{u_3^i, u_2^i, u_1^i\}$ associées aux cotations symboliques utilisées par ESCOTA. Le calcul des poids a été décrit dans la sous-section « Macbeth » du chapitre II via la comparaison deux à deux des critères. La Figure 62 représente l'échelle des poids des critères obtenue pour le COP Chaussée sur notre base d'apprentissage.

Maintenant que nous avons calculé tous les paramètres nécessaires à l'évaluation multicritère pour le COP Chaussées, il faut les enregistrer dans le Système d'Information de SINERGIE. A ce sujet, nous rappelons que le modèle du Système d'Information est défini à la section « Modélisation du Système d'Information ». La liste des critères ainsi que les poids associées sont à renseigner dans la table « Critère ». Ensuite, les valeurs numériques $\{u_3^i, u_2^i, u_1^i\}$ pour chaque critère i peuvent être définis dans la table « label_ui ».

Nous venons de détailler la procédure de calcul et d'enregistrement des paramètres pour les évaluations du COP Chaussées. Cette opération est à effectuer pour chaque expert métier de SVS.

Quant au chef de service SVS, il doit calculer les poids et les valeurs numériques $\{p_3^i, p_2^i, p_1^i\}$ associées aux étiquettes $\{P_3, P_2, P_1\}$ pour chaque critère d'évaluation en priorité i et ce pour chaque domaine métier SVS.

IV.5 Les scénarios d'évaluation

Nous avons vu tous les scénarios de consultation des informations contenues dans SINERGIE permettant d'apprécier l'état du patrimoine. Nous allons maintenant rentrer dans le cœur du système d'aide à la décision avec les évaluations et la programmation des opérations d'entretien, d'amélioration et de mise à niveau.

IV.5.1 De la création d'une opération aux évaluations en urgence et priorité

IV.5.1.1 Création d'une opération

A la suite de l'analyse du bilan de santé de la Figure 97, mais également de celui de cette même chaussée dans l'autre sens de circulation, le COP Chaussées décide de programmer une opération de réfection de la couche de roulement. Pour créer une opération, il doit renseigner le type d'opération, l'imputation budgétaire, décrire les désordres et la technique d'entretien prévue (cf. Figure 111). Une fois l'enregistrement terminé, la fiche de cette opération prend la forme donnée en Figure 112.

Création d'une opération

Titre : A51 PR 24 a 39
 Domaine : CHAUSSEES
 Type Opération : Reparation
 Budget : Entretien Infrastructure
 Entretien Infrastructure - ICAS
 Entretien Infrastructure - ICAS - ICAS Individualisees
 ICAS
 ICAS - ICAS Individualisees
 ICAS Individualisees
 Origine Opération : Inspection detaillee
 Nature : Reparations de surface ponctuelles
 Reparations de surface generalisees
 couche de roulement definitive
 restructuration de chaussées
 Description des désordres : fissures transversales et quelques tranchées sont affaissées. L'état structurel est satisfaisant.
 Technique d'entretien ou Réparation : Restructuration, substitution BBDR par BBTM et purges ponctuelles
 Enregistrer

Figure 111 : formulaire d'enregistrement d'une opération

SINERGIE
 ESCOTA
 2 Août 2007 - DOMAINE CHAUSSEES
 utilisateur blanc connecté

ESCOTA - SVS
 Déconnexion

Opération A51 PR 24 a 39
 enregistrée le 02/08/2007 par blanc

Nature de l'opération

Type : Reparation
 Nature : Reparations de surface ponctuelles
 restructuration de chaussées
 Description des désordres : Deterioration de la couche de roulement. Presence de trous et arrachements chaussée nord. En chaussée sud, apparition de fissures transversales et quelques tranchées sont affaissées. L'état structurel est satisfaisant.
 Technique de réparation : Restructuration, substitution BBDR par BBTM et purges ponctuelles
 Budget : Entretien Infrastructure
 Origine : Inspection détaillée

Évaluations
 Récapitulatif du nombre de fiches urgences évaluées pour cette opération.

	2003	2004	2005	2006	2007
UR	0	0	0	0	0
IS	0	0	0	0	0
IS	0	0	0	0	0

Accueil
 Inventaires
 Éléments de Patrimoine
 Projet DCI / DT
 Entretien Courant
 Derniers entretiens
 Bilan de santé
 Liste des bilans
 Enregistrer un bilan
 Valider un bilan
 Rechercher
 Indicateurs
 Anomalies
 Liste des anomalies
 Enregistrer
 Valider
 Évaluations et Suivi
 Liste des opérations
 Créer une opération
 Remplir une fiche Urgence
 Suivi des Urgences
 Poster les Urgences
 Planning
 Budgets
 Aide à la planification

Opérations CHAUSSEES
 Entretien Infrastructure (17)
 Aide
 Pour les fiches urgences
 fiche
 fiche modifiable
 fiche
 fiche postée

modifier la fiche opération
 créer une fiche urgence

Figure 112 : la fiche opération enregistrée

IV.5.1.2 L'évaluation en urgence

L'étape suivante est l'enregistrement des chaussées rattachées à cette opération. Le COP Chaussées prévoit, au vu des dégradations, des travaux de réfection dans les deux sens de circulation. Cette opération ne concerne qu'une seule autoroute, mais dans les deux sens de circulation. De plus, les dégradations étant plus avancées dans un sens que dans l'autre, voyons donc comment il évalue les urgences d'intervention. Un lien dans la partie évaluation de la Figure 112 permet justement l'ajout d'une fiche urgence pour cette opération.

La création de la première fiche est conditionnée par la chaussée dans le sens 1 avec les PR de début et de fin d'évaluation (cf. Figure 113).



Figure 113 : sélection de la chaussée pour la fiche d'urgence

L'évaluation du COP se fait par le biais de la fiche représentée en Figure 114. Pour chacun des critères, le COP évalue l'urgence selon chaque critère et attribue une note exprimée dans l'échelle symbolique $\{U_1, U_2, U_3, 0\}$. Lors de son analyse de risque technique selon chaque critère, il dispose d'informations sur la chaussée qu'il évalue dans la partie droite de la Figure 114 : ce sont les informations de consultation (cf. IV.3.3). Dans ce cas, il s'agit des derniers bilans de santé, des statistiques trafics et des zones d'accumulations d'accidents. Ces éléments lui permettent notamment de justifier les scores qu'il attribue selon chaque critère dans le champ commentaire (élément d'information qui pourra être restitué par SINERGIE lors d'une justification).

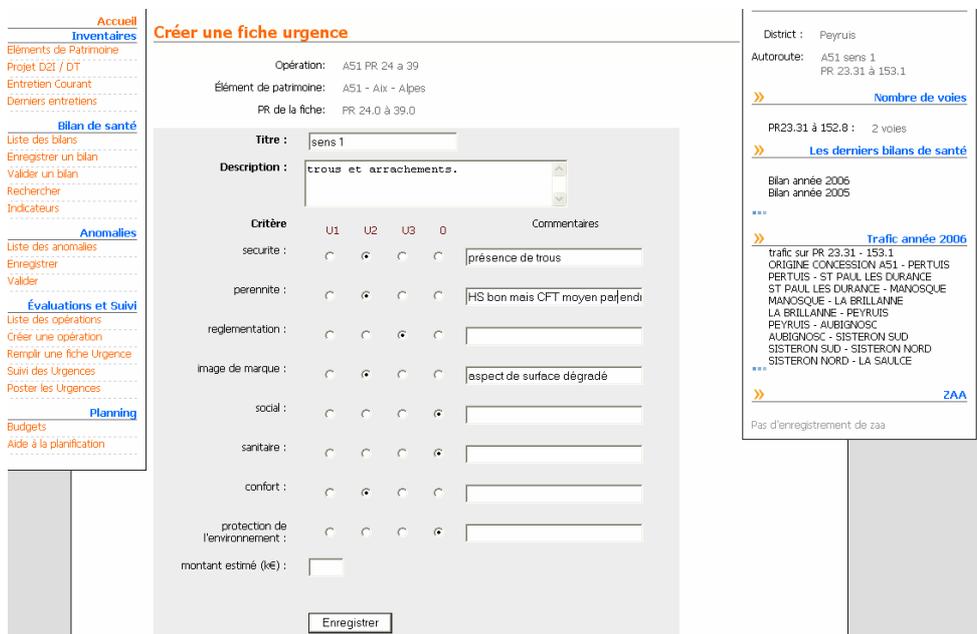


Figure 114 : évaluation multicritère de la fiche

Afin de calculer l'évaluation globale de cette fiche avec l'opérateur MP, nous avons appliqué la méthode décrite dans la sous-section des « cotations symboliques et agrégation » du chapitre II pour convertir les étiquettes symboliques $\{U_3, U_2, U_1\}$ selon chaque critère i en valeurs numériques $\{u_3^i, u_2^i, u_1^i\}$. Les poids des critères de la MP pour les opérations Chaussées, enregistrés dans SINERGIE grâce aux calculs de la section précédente, permettent donc le calcul numérique de la MP

(cf. formule 8). Nous avons ensuite reconverti cette valeur dans l'univers de discours symbolique $\{U_1, U_2, U_3\}$. Ainsi, le résultat de l'évaluation de la fiche ci-dessus se trouve à la Figure 115. La Chaussée dans le sens 1 est évaluée en U_2 .



Figure 115 : résultat de l'évaluation en urgence

Le même processus est appliqué pour l'évaluation de la chaussée dans le sens 2. Les dégradations dans le sens 2 sont plus avancées et notamment dues aux affaissements de tranchées auxquels viennent s'ajouter des fissures transversales (cf. Figure 116). Cette fiche est évaluée en urgence U_1 .

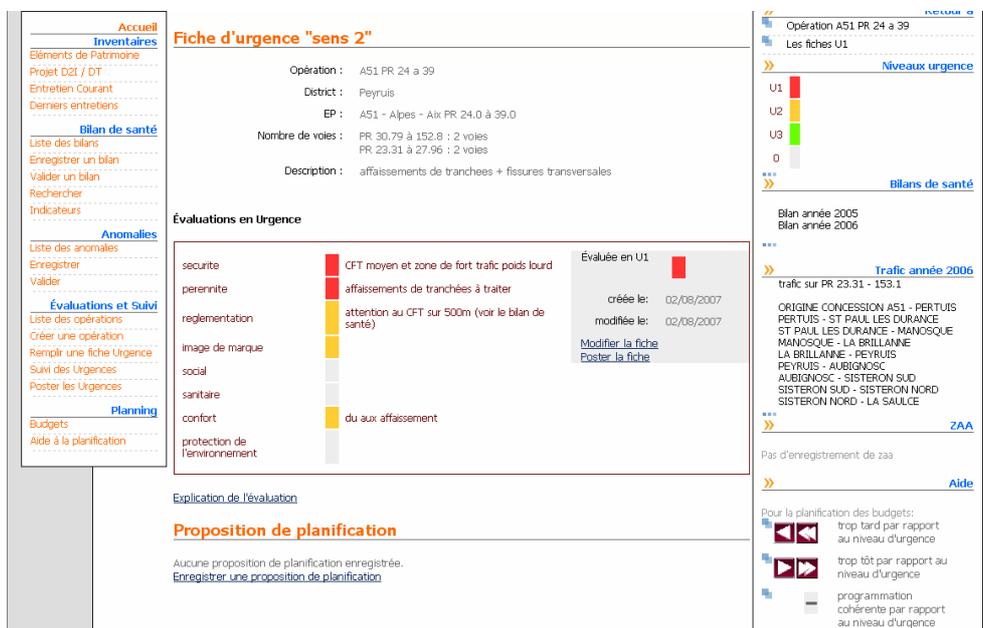


Figure 116 : consultation de la fiche d'urgence dans le sens 2

Afin d'avoir une vision globale de l'ensemble des opérations en cours avec les niveaux d'urgence associés, nous proposons le tableau de bord récapitulatif Figure 117 accessible via le lien « suivi des urgences » dans la rubrique « évaluations et suivi » du menu de SINERGIE. Le COP peut ainsi suivre le nombre de fiches dans chaque niveau d'urgence pour chaque opération. Il dispose de cette vision sur un intervalle de cinq ans afin de suivre l'évolution du nombre de fiches d'une année sur l'autre. Par exemple, pour la première opération du tableau Figure 117, en 2006 le COP avait évalué une

fiche en urgence U_2 . En 2007, il y a toujours une fiche en U_2 , mais elle aurait très bien pu passer en U_1 par exemple suite à un événement (bilan de santé plus alarmant, une évolution de la réglementation, etc.) qui doit être renseigné dans les commentaires de la fiche lors de cette réévaluation.

Un code couleur pour les titres des opérations (dont la légende se trouve dans la rubrique d'aide de la Figure 117) différencie l'état des évaluations : les opérations dont les fiches sont en cours d'évaluation (en orange), celles dont toutes les fiches sont « postées » (en gris), i.e., soumises à évaluation par le chef de service, celles pour lesquelles aucune fiche n'a encore été enregistrée.

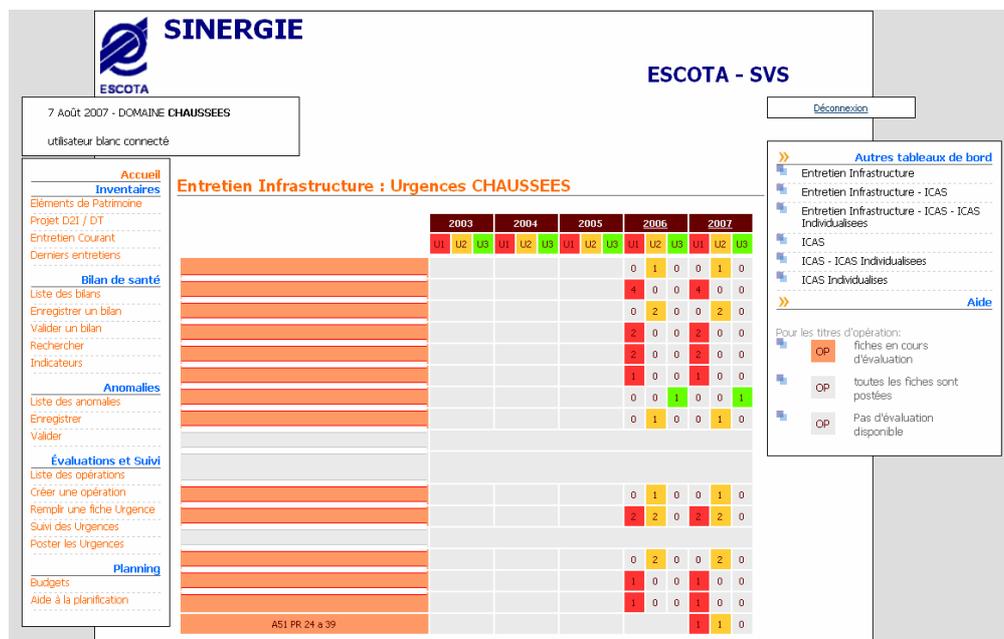


Figure 117 : tableau de suivi des urgences pour le COP Chaussées

Une fois que le COP a terminé ses évaluations en urgence pour une opération, et qu'il a enregistré ses propositions de planification (voir bas de la Figure 116), il doit « poster » les fiches pour les soumettre au chef de service, lequel doit ensuite les évaluer en priorité. Les fiches qu'il peut poster sont accessibles via le menu principal dans la rubrique « évaluations et suivi » en cliquant sur « Poster les urgences ». La Figure 118 représente le tableau listant pour chaque opération les fiches accompagnées du bouton « Poster » lorsque le COP peut les soumettre au chef de service.

Poursuivons avec notre exemple de la Figure 115, le chef de service clique sur la case des urgences U_1 pour la dernière opération de la Figure 119. La Figure 120 correspond à l'affichage de la liste des fiches évaluées en U_1 (ici une seule), chaque fiche étant représentée dans une colonne. Dans notre exemple, il n'y a qu'une seule fiche concernant la chaussée dans le sens 2.

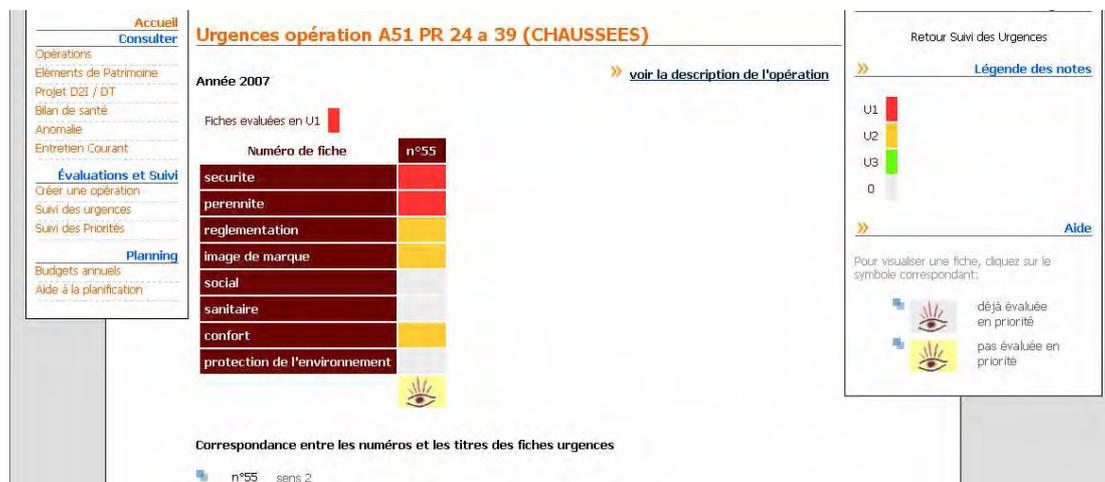


Figure 120 : récapitulatif des évaluations en U_1 pour l'opération

En cliquant sur le symbole sous la fiche n°55, le chef de service récupère la fiche d'évaluation du COP représentée sur la Figure 121 : la description de la fiche suivi des scores et commentaires attribués selon chaque critère d'urgence du COP. Dans la partie droite se trouvent également les bilans de santé et données trafic et zaa dont disposaient le COP lors de son évaluation.

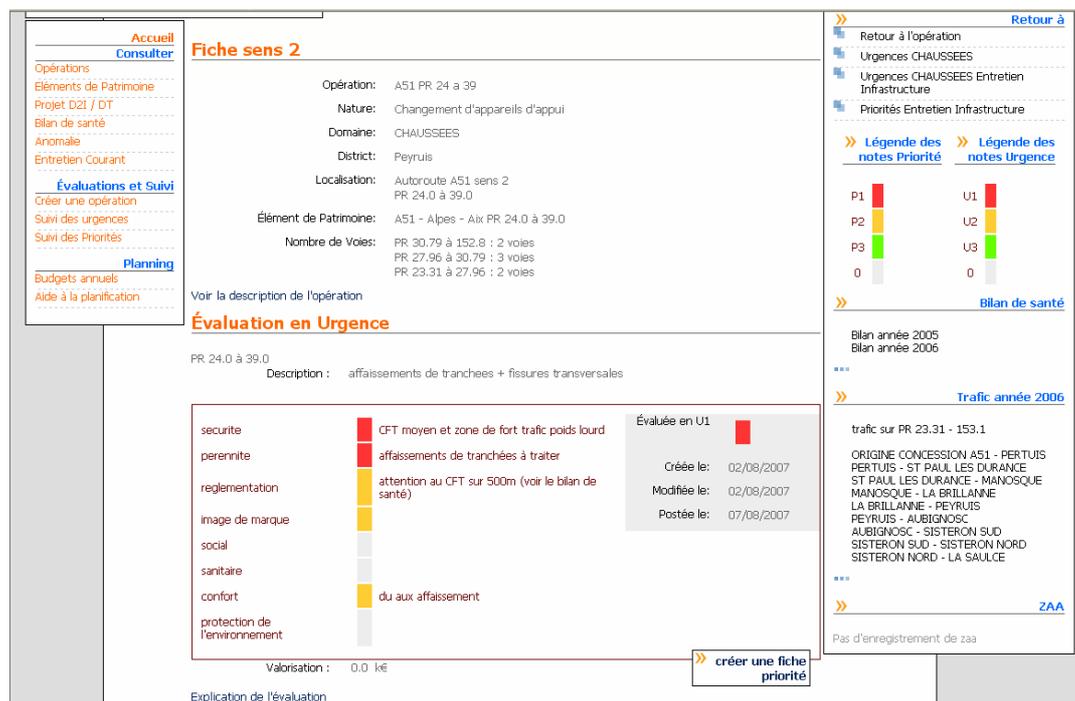


Figure 121 : fiche urgence vue par le chef de service

Après avoir visualisé ces informations, le chef de service peut maintenant créer une fiche d'évaluation en priorité (cf. Figure 122). Le principe est le même que celui décrit à la Figure 114 pour le COP. Le chef de service, selon la Figure 122, attribue, à chaque critère de priorité, un score en mesurant le risque à faire ou ne pas faire l'opération. Les critères du chef de service sont différents de ceux du COP car son analyse relève davantage de la stratégie de l'entreprise : nous sommes dans la logique de décision évoquée dans le chapitre I. L'univers de discours du chef de service est également symbolique et s'exprime sur l'échelle cardinale $\{P_1, P_2, P_3\}$. Comme nous l'avons vu pour les

évaluations en urgence au paragraphe « cotations symboliques et agrégation », nous avons besoin de calculer les valeurs numériques $\{p_3^i, p_2^i, p_1^i\}$ associées aux étiquettes $\{P_3, P_2, P_1\}$ pour chaque critère i . Grâce aux valeurs des poids des critères calculés à l'aide de Macbeth, il reste ensuite à convertir le résultat de la MP dans l'univers de discours $\{P_1, P_2, P_3\}$.

Le résultat de l'évaluation est proposé Figure 123.

PR 24.0 à 39.0

Critère	P1	P2	P3	0	Commentaires
confort :	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
engagements :	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	
financier :	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	travaux a realiser au plus vite avant
image de marque :	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
perennite :	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	effaisements de tranchées
politique :	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
reglementation :	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	les seuils des mesures sont confo
responsabilite :	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
securite :	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	CFT moyen attention aux évolutor
social :	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	

Figure 122 : fiche d'évaluation en priorité

Évaluation en Priorité

PR 24.0 à 39.0

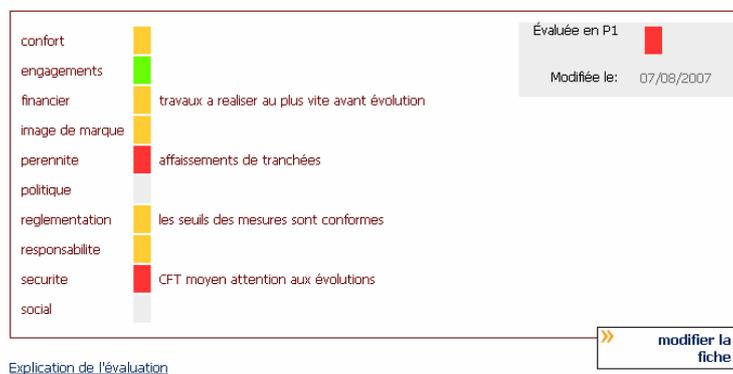


Figure 123 : résultat de l'évaluation en priorité

Pour l'ensemble de ses évaluations en priorité, le chef de service dispose comme chaque COP d'un tableau récapitulatif de ses évaluations en priorité pour chaque corps de métier, accessible via le menu « évaluations et suivi » de la Figure 124.



Figure 124 : récapitulatif des évaluations en priorité

IV.5.2 Les outils d'analyse des évaluations

L'aide à la décision proposée par SINERGIE comporte également un volet relatif à la légitimation des décisions prises et donc de la politique de gestion. Nous proposons deux niveaux d'analyse des évaluations (cf. formule (20) et la section robustesse de l'évaluation du chapitre III). Tout d'abord, la justification permet de faire remonter les critères les plus discriminants dans l'obtention du score global d'une opération et assure ainsi la traçabilité de la logique décisionnelle des gestionnaires. Dans un second temps, l'analyse de robustesse permet d'évaluer les risques d'erreur d'évaluation.

IV.5.2.1 La justification

Après une évaluation en urgence, le COP peut produire un argumentaire justifiant son évaluation. Pour cela, dans chaque fiche de consultation (cf. Figure 115), il dispose du lien « Explication de l'évaluation » sous le récapitulatif des scores. Nous avons choisi d'implémenter l'explication comme proposé par les équations (19) et (20) (parallèle avec l'ACP) dans la sous-section relative au « point de vue des échelles continues » dans le chapitre III. Il s'agit donc de restituer le sous-ensemble de critères qui à eux seuls expliquent à hauteur de $\beta\%$ le score attribué. La Figure 125 produit un camembert explicitant la participation de chaque critère dans le calcul de la note globale avec $\beta=75\%$. Les critères « sécurité » et « pérennité », évalués en U_2 , expliquent à eux deux plus de 65% du score de l'opération. Cette représentation graphique est accompagnée d'un argumentaire correspondant aux commentaires associés aux critères les plus « importants » (i.e., qui ont le plus contribué) dans le calcul du score global : cette analyse en contributions marginales de l'évaluation globale constitue un argument pour l'expertise technique faite par le COP lors de l'évaluation.

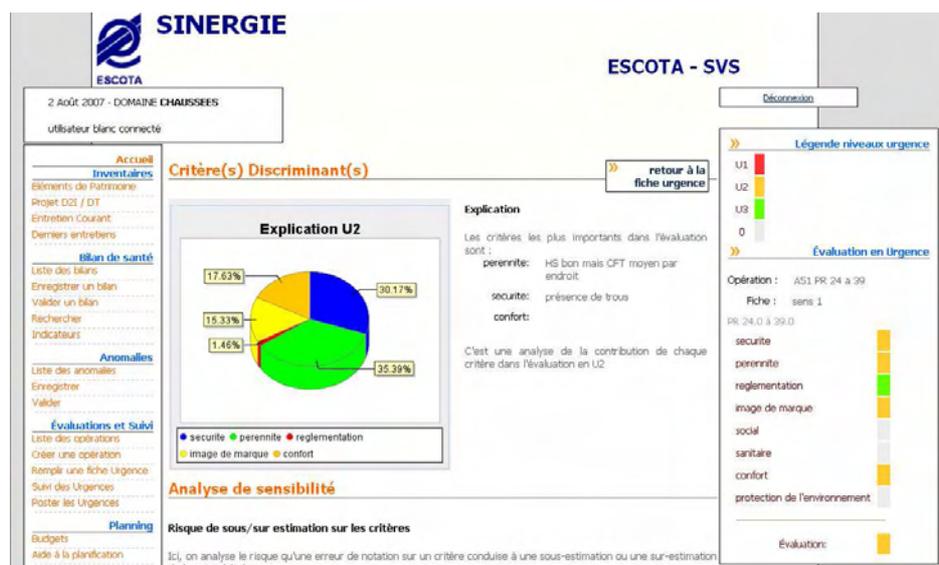


Figure 125 : les critères qui ont le plus contribué dans la valeur de la note globale

IV.5.2.2 La robustesse de l'évaluation

Considérons toujours l'évaluation de la Figure 115. Le COP souhaite maintenant analyser les risques d'erreur dans le processus d'évaluation et en estimer l'impact potentiel sur les évaluations globales. A cet effet, nous avons implémenté les deux types d'analyses présentés dans la section dédiée à la robustesse de l'évaluation dans le chapitre III.

Considérons tout d'abord la sensibilité de l'évaluation à une erreur d'évaluation a priori, i.e. sur un critère d'évaluation. Les graphiques de la Figure 126 et de la Figure 127 proposent deux analyses : la première présente le risque de sous-estimation globale lors d'une erreur de sous-estimation sur un critère donné, la seconde restitue le risque de surestimation globale lors d'une erreur de surestimation sur un critère. Les graphiques se lisent comme suit. Dans le cadran haut, une erreur de sous-estimation sur la sécurité a une incidence sur la sous-estimation globale de l'opération dans 75% des cas. Résultat sans surprise, vu le poids du critère « sécurité », il suffit de changer son score de U_2 en U_1 pour que la note globale passe de U_2 à U_1 . Nous remarquons qu'une erreur de sous-estimation sur le confort (resp. sur l'image de marque) conduira dans 54% des cas (resp. 55%) à une sous-estimation globale (attention à la lecture des pourcentages : cette figure ne représente pas une distribution ! Chaque barre doit être « lue » comme ci avant, i.e. individuellement). L'analyse est identique dans le cas de la surestimation. Est-il possible qu'une erreur sur un unique critère dévalue la note globale en U_3 ? Dans le cadran bas, nous voyons que même si le COP venait à se tromper sur un critère, le score global resterait inchangé.

Cette première analyse nous permet de détecter quels sont les critères dont la modification risque d'influencer la note globale. C'est une fonctionnalité particulièrement utile aux COP lorsqu'ils hésitent sur l'attribution d'un score partiel : l'analyse de risque a priori les informe sur les conséquences que pourrait avoir leur erreur. Si l'on reprend le graphique du risque de sous-estimation, il ne faut pas penser que parce que le critère « sécurité » a une influence à 75% sur le score global que le COP s'est nécessairement trompé. En effet, grâce aux commentaires renseignés lors de l'évaluation, le COP justifie sa notation. Ainsi, dans le cas du critère « sécurité », il fait référence au dernier bilan de santé dans lequel les indicateurs d'adhérence sont bons, ce qui implique que la note U_1 n'est en aucun cas justifiée. En revanche, dans le cas où les indicateurs montrent des zones à problèmes, cette fonctionnalité de calcul du risque a priori alerte le COP sur la nécessité de rester vigilant sur toute évolution des dégradations aggravant les indicateurs d'adhérence.

Risque de sous/sur estimation sur les critères

ci, on analyse le risque qu'une erreur de notation sur un critère conduise à une sous-estime la note globale.

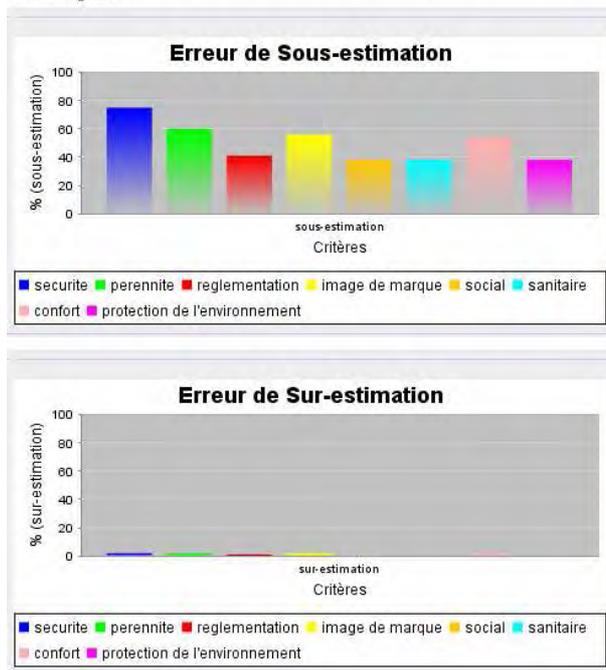


Figure 126 : impact d'une erreur d'évaluation locale sur la note globale

Diagnostic de sous/sur estimation globale

Dans le cas où l'évaluation globale semble sous/sur-estimée, cette fonction analyse qu cause.

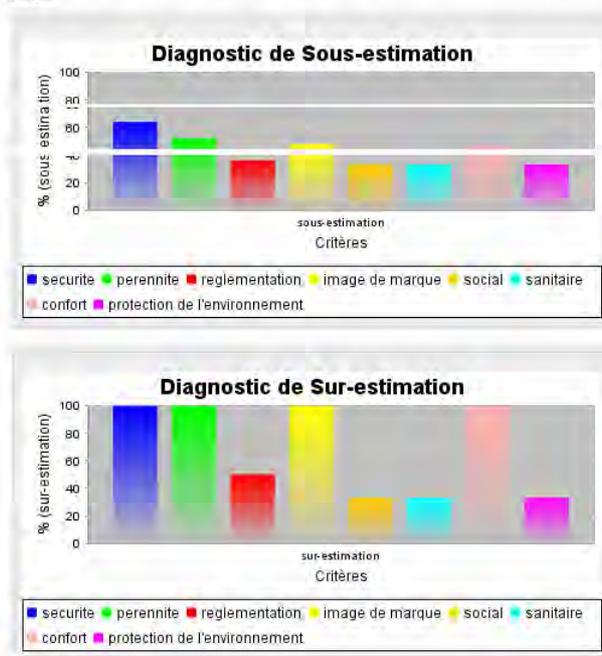


Figure 127 : analyse du risque d'erreur d'évaluation global

Contrairement à la première analyse que nous venons de faire, le diagnostic d'erreur d'évaluation ou calcul du risque a posteriori, cherche à déterminer, dans le cas d'une sous-estimation (resp. surestimation) globale, quelles dimensions peuvent en être les causes les plus probables. Conservons notre exemple de la Figure 115. Conformément à l'algorithme de diagnostic de la section « analyse de

robustesse » du chapitre III, la Figure 127 représente deux graphiques des causes pouvant expliquer une erreur respectivement de sous-estimation et de surestimation globale (encore une fois, ils ne doivent pas être lus comme des distributions). Le graphique du haut se lit de la façon suivante : s'il y a eu sous-estimation du score global (i.e. le score global devrait être U_1 et non U_2), alors dans 65% des cas (resp. 55%), la sous-estimation de la note sur la sécurité (resp. pérennité) sera au moins en partie responsable de l'erreur d'affectation sur le score global (le critère appartient à l'ensemble diagnostic). Pour qu'il y ait surestimation (i.e. la note globale serait alors U_3), il faudrait que les scores de tous les critères soient au plus en U_3 . C'est la raison pour laquelle les résultats du cadran bas de la Figure 127 montrent que l'influence des critères dont le score est U_2 à la Figure 115 (i.e. sécurité, pérennité, image de marque et confort) est maximale. Ainsi, cela signifie que pour qu'il y ait surestimation, le COP s'est alors trompé sur au moins quatre critères ! Nous pouvons raisonnablement considérer cette situation comme improbable à la lecture de la fiche (notamment des commentaires du COP). On peut en effet imaginer que l'on mette une borne supérieure sur le nombre d'erreurs d'évaluation commises par le COP sur une opération (les résultats précédents ne tenaient pas compte de ce paramètre).

A cet effet, nous proposons donc d'affiner le niveau d'analyse dans le diagnostic en paramétrant le nombre d'erreur maximal que l'on peut commettre sur une évaluation. Si nous prenons par exemple le nombre d'erreur maximal égal à 2 pour la sous-estimation (resp. surestimation), cela revient à comptabiliser dans *Higher_N(U)* (resp. *Lower_N(U)*) l'ensemble des vecteurs U' de $N(U)$ tels que $WAM(U') > WAM(U)$ (resp. $WAM(U') < WAM(U)$) dont le nombre de critères sous-estimés (resp. surestimés) est au maximum égal à 2. Les résultats de l'utilisation de ce nouvel algorithme paramétré sont reportés à la Figure 128. Nous constatons qu'en imposant au plus 2 erreurs possibles, il n'y a plus de cas de surestimation possible, ce qui est plus réaliste relativement à la remarque du paragraphe précédent. Le diagnostic de sous-estimation est plus proche de la façon dont raisonnent les experts car en cas de sous-estimation globale, la sécurité fait partie de 60% des diagnostics possibles. En effet, le fait d'augmenter la note de la sécurité provoque obligatoirement celle de la note globale (à cause du poids du critère sécurité). De plus, nous voyons que les influences des critères confort et image de marque sont plus modérés, autour de 30%. En effet, l'augmentation d'une seule de ces deux notes ne suffit pas à provoquer la hausse de la note globale, alors que l'augmentation des deux permet le basculement en U_1 .

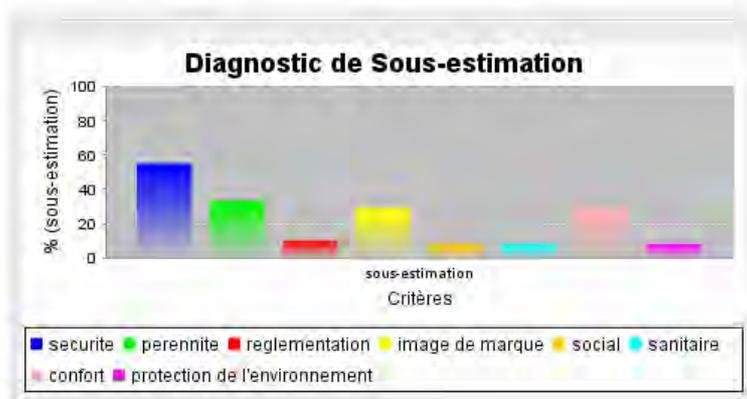


Figure 128 : analyse du risque d'erreur d'évaluation global (au maximum 2 erreurs)

Ces analyses de robustesse complètent la fonction de justification car elles permettent de confirmer les évaluations ou encore de mettre en évidence les critères selon lesquels il faut rester vigilant. Le risque a priori (erreur d'estimation) et a posteriori (diagnostic) peuvent être vues comme deux variables de contrôle du processus décisionnel : selon leur valeur, on peut envisager de faire boucler le processus d'information pour valider ou invalider une conclusion.

IV.5.3 L'aide à la planification et le suivi global

Pour l'ensemble des opérations dont il est responsable, le COP connaît les budgets annuels dont il dispose et propose une programmation pluriannuelle en fonction des urgences à traiter. Nous proposons un module d'aide dans SINERGIE lui permettant d'enregistrer ses propositions de

programmation pour chaque fiche évaluée en urgence accessible depuis la rubrique « Proposer une planification » depuis chaque fiche.

Reprenons l'exemple de la Figure 115. Le COP prévoit une programmation sur deux ans en dépensant 120k€ la première année et 80k€ sur la deuxième. Le formulaire de la Figure 129 permet d'enregistrer cette proposition sur les deux années choisies par le COP, i.e. 2009 et 2010. Ensuite, cette programmation apparaît au bas de la fiche d'urgence associée dans la rubrique « Proposition de planification » (cf. Figure 130).

Proposition de planification

Entrez pour chaque année la valorisation estimée pour les travaux concernant la fiche sens à 39).
 Les travaux sont prévus sur 2 ans.

année 2009 :

Entretien Infrastructure: k€ HT

année 2010 :

Entretien Infrastructure: k€ HT

Figure 129: enregistrement de la proposition de planification

Fiche d'urgence "sens 1"

Opération : A51 PR 24 à 39
 District : Peyrus
 EP : A51 - Aix - Alpes PR 24.0 à 39.0
 Nombre de voies : PR 23.31 à 152.8 : 2 voies
 Description : trous et arrachements.

Évaluations en urgence

securite	présence de trous	Évaluée en U2
perennite	HS bon mais CFT moyen par endroit	
reglementation		
image de marque	aspect de surface dégradé	
social		
sanitaire		
confort		
protection de l'environnement		

Explication de l'évaluation

Proposition de planification

Les montants sont exprimés en k€

	2007	2008	2009	2010	2011	Total(Budget)	Prog?	Action
Et			120.0	80.0		200.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="button" value="Action"/>
Total			120.0	80.0		200.0		

Modifier la proposition de planification

Figure 130 : la fiche d'évaluation avec la programmation financière

Il s'agit maintenant de proposer un test de cohérence entre le niveau d'urgence de la fiche et la programmation financière. La fiche ci-dessus est évaluée en U_2 en août 2007 ($n = 2007$) pour des premiers travaux en $n'=2009$, est-ce cohérent avec les règles de programmation à SVS ? Le test consiste à vérifier que le niveau d'urgence accordé à une opération est bien en phase avec les règles de programmation d'usage chez ESCOTA.

Toujours dans le but de formaliser dans sa globalité le processus de décision concernant la gestion du patrimoine, nous avons posé avec l'aide des COP les règles de programmation ci-dessous. L'année de programmation des travaux associés à une fiche, n'_{COP} , dépend du mois de l'année de l'évaluation de la fiche en urgence et du degré d'urgence de cette fiche.

Soit n l'année d'évaluation de la fiche, m le mois d'évaluation de la fiche, n' l'année de début de programmation proposée par le COP et U le score global de la fiche urgence. L'année de programmation n'_{COP} vérifie :

- Si $U=U_1$ alors (si $m < Juin$ alors $n'_{COP}=n+1$ ou $n+2$ sinon $n'_{COP}=n+2$ ou $n+3$)
- Si $U=U_2$ alors (si $m < Juin$ alors $n'_{COP}=n+2$ ou $n+3$ sinon $n'_{COP}=n+3$ ou $n+4$)
- Si $U=U_3$ alors (si $m < Juin$ alors $n'_{COP}=n+3$ ou $n+4$ sinon $n'_{COP}=n+4$ ou $n+5$)

Si $n'_{COP} \neq n'$ alors l'opération doit être décalée.

L'application de ces règles à une proposition de programmation permet de savoir si cette dernière est cohérente (i.e. vérifie les règles ci-dessus). Dans l'exemple ci-dessus, la fiche est évaluée en $U=U_2$ avec $n=2007$ et $m > Juin$. Donc l'année de début de programmation n'_{COP} doit être 2010 ou 2011. Or, l'année de début de programmation proposée à la Figure 130 est $n'=2009$. Notre test de cohérence propose donc de décaler cette programmation à une date ultérieure en affichant le symbole adéquat dont la légende se trouve dans la rubrique d'aide (cf. bloc inférieur droit de la Figure 130). Le symbole double flèche propose ainsi de décaler les propositions budgétaires. Pour ce faire, il suffit de décocher la case et choisir le nombre d'années de décalage dans le menu déroulant à droite (cf. Figure 131). Cette fois-ci, le résultat obtenu à la Figure 132 est cohérent avec les règles de programmation.

Proposition de planification

Les montants sont exprimés en k€

	2007	2008	2009	2010	2011	Total(Budget)	Prog?	<input checked="" type="checkbox"/>	Act
EI			120.0	80.0		200.0		<input type="checkbox"/>	
Total			120.0	80.0		200.0			

Modifier la proposition de planification

-2
 -1
 1
 2
 Init

Figure 131 : décalage des montants budgétaires

Proposition de planification

Les montants sont exprimés en k€

	2007	2008	2009	2010	2011	Total(Budget)	Prog?	<input checked="" type="checkbox"/>	Action
EI			120.0	80.0		200.0	=	<input checked="" type="checkbox"/>	
Total			120.0	80.0		200.0			

Modifier la proposition de planification

Figure 132 : programmation cohérente avec les règles de programmation

Dans le menu principal de SINERGIE, rubrique « Planning », le lien « aide à la planification » propose au COP un tableau récapitulatif des opérations avec ses propositions de programmation (cf. Figure 133). Sur l'exemple, seules deux lignes ont été complètement renseignées par le COP, i.e. les opérations correspondantes ont été évaluées en urgence, budgétées et programmées.

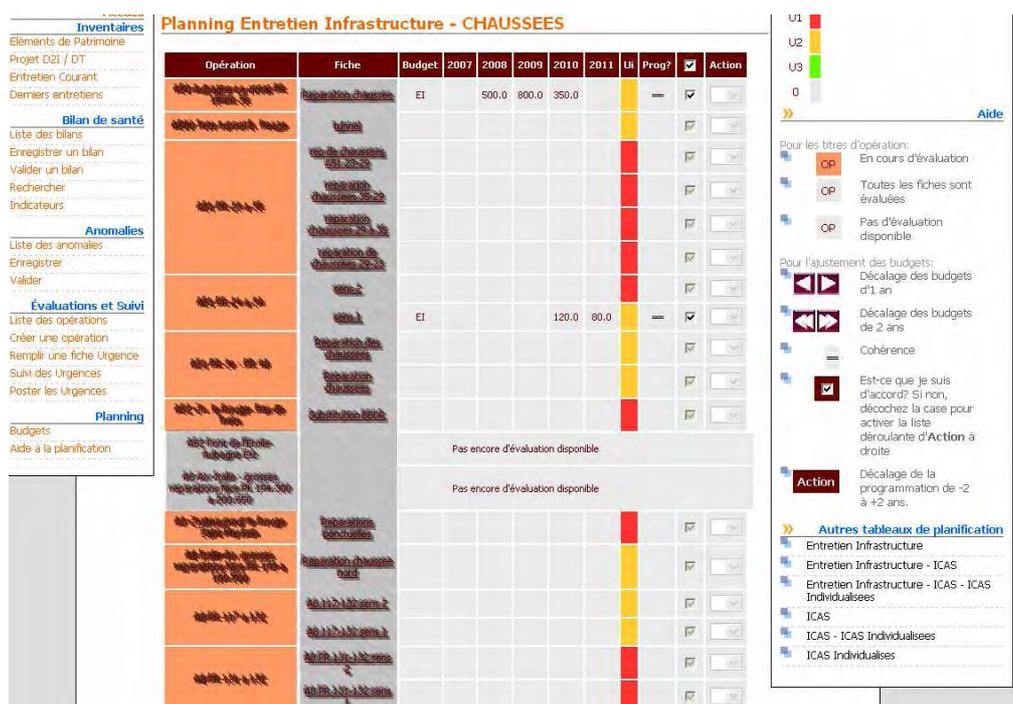


Figure 133 : tableau récapitulatif des programmations budgétaires pour les chaussées

Le même tableau est disponible pour le chef de service et ce pour chaque corps de métier. Ci-dessous, la Figure 134 présente le tableau récapitulatif des programmations du COP chaussées dont dispose le chef de service depuis son poste. Le chef de service peut alors se livrer à une nouvelle vérification de la pertinence et de la cohérence de la proposition du COP. A ce stade, il peut confronter l'évaluation en urgence de son COP et son évaluation en priorité à des fins de validation de la programmation proposée, il peut également vérifier que l'année proposée par le COP correspond bien aux règles de programmation d'usage à ESCOTA (si ce n'est pas le cas, il ira voir les commentaires du COP qui répondront logiquement à ses interrogations). SINERGIE propose donc deux tests de cohérence systématiques à ce niveau pour aider le chef de service à valider la programmation proposée. Si le début des travaux envisagés ne satisfait pas l'un des deux tests que nous décrivons ci-après, le chef de service pourra alors décaler les propositions budgétaires du COP. Les tests sont relatifs d'une part à la confrontation des degrés d'urgence et de priorité affectés à une opération, d'autre part à un système de règles propres au chef de service équivalent à celui que nous avons énoncé pour un COP.

Illustrons ces propos. Prenons comme exemple la dernière opération de la Figure 134. La première analyse est liée à la confrontation des niveaux d'urgence et de priorité. Le COP a classé l'opération U_2 , l'analyse du chef de service l'a conduit à la classer P_1 . Pour le chef de service, cette opération apparaît donc comme une opération à réaliser au plus tôt au regard de son analyse en termes de risques stratégiques, alors que l'opération est seulement de second ordre pour le COP sur le plan des risques techniques. SINERGIE propose d'effectuer les tests automatiquement.

SINERGIE évalue quelle devrait être l'année de début de programmation du point de vue du chef de service SVS par rapport à l'année de programmation n'_{COP} calculée selon les règles de programmation du COP précédentes et le niveau de priorité (le test consiste à vérifier que n'_{COP} est bien l'année n' proposée par le COP) : au vu du résultat (le signe de $n' - n'_{COP}$), SINERGIE propose de décaler dans un sens ou dans l'autre la date de début de l'opération si nécessaire dans la colonne « Prog ? » du chef de service (Figure 134). L'autre test de cohérence proposé au chef de service s'exprime de la façon suivante : s'il y a cohérence entre les niveaux d'urgence U_i et de priorité P_j (i.e. $i=j$), alors l'année de programmation doit être n'_{COP} . Si par contre $i \neq j$, SINERGIE propose de réviser l'année de programmation dans un sens ou dans l'autre, cette recommandation se lit dans la colonne $P_j \neq U_i$ de la Figure 134. Les sigles utilisés pour la recommandation de décalage, dans un test comme dans l'autre, sont les flèches à gauche ou à droite pour un faible recalage (un an), les

doubles flèches pour un décalage plus conséquent et le signe « - » pour signifier que tout semble cohérent.

Les tests auxquels procède donc SINERGIE systématiquement lorsqu'un COP soumet une opération évaluée en urgence, budgétisée et planifiée sont résumés dans le cadre suivant :

Les règles de programmation liant le degré P_j à une date de début des travaux sont identiques à celles du COP (voir les trois règles de l'encadré ci-dessus, en remplaçant U_i par P_j).

Ainsi, si n'_{COP} est l'année de programmation établie selon les règles de programmation du COP, n' l'année de programmation proposée par le COP, P_j le score global de la fiche en priorité et U_i le score en urgence associé, alors l'année de début de programmation proposée par le chef de service n'' doit vérifier :

- $n'' = n'_{COP} - i + j$

Si $n'' \neq n'$ alors SINERGIE propose alors de réviser la date de programmation en fonction du sens de $n'' - n'$.

Cette double vérification constitue une aide pour la programmation selon deux points de vue : tout d'abord un test de cohérence entre le niveau d'urgence et de priorité. Si les niveaux i et j sont identiques, alors le chef de service peut conserver l'année n' de début de programmation proposée par le COP même si $n' \neq n'_{COP}$. Le second test de cohérence analyse l'écart entre l'année n' proposée par le COP et l'année n'' calculée en fonction du niveau de priorité et de l'année n'_{COP} vérifiant les règles de programmation. Nous pouvons très bien avoir une situation où il y a cohérence entre les urgences et priorité, mais incohérence quant à l'année de début de programmation par rapport aux règles de planification en usage, ou une situation où il y a incohérence entre urgence et priorité, mais cohérence sur l'année de début de programmation. L'appréciation de ces deux aspects revient au chef de service qui va décider au final de décaler ou non les programmations sur la base des recommandations proposées par SINERGIE à la suite des tests systématiques (suggestions de SINERGIE colonnes « $P_j \neq U_i$ » et « Prog ? » de la Figure 134).

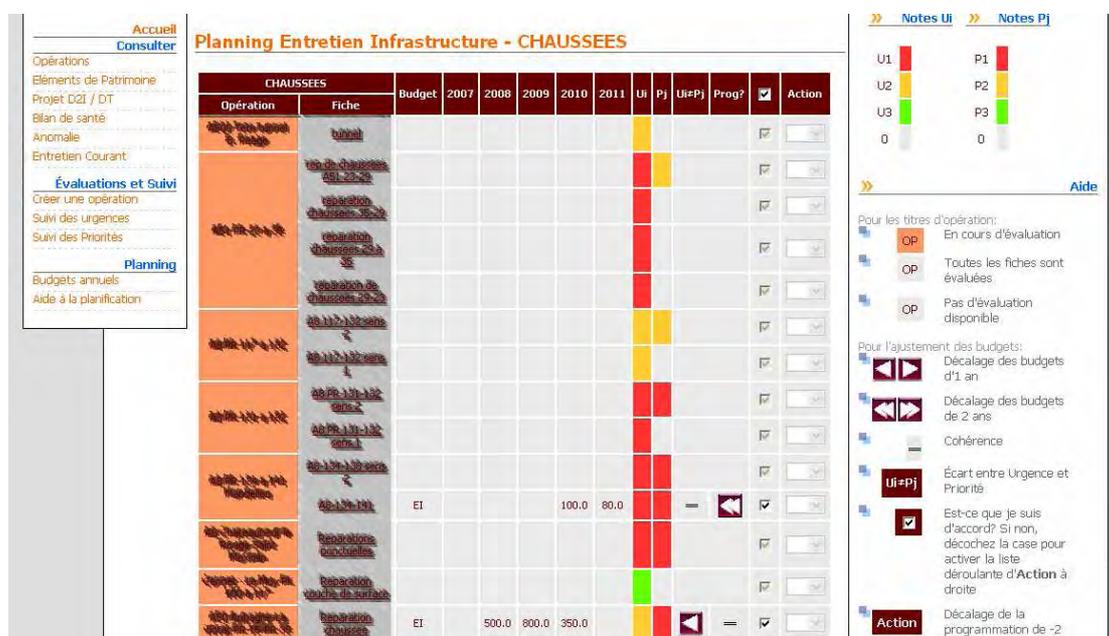


Figure 134 : tableau récapitulatif des programmations budgétaires chaussées du chef de service

Du point de vue de l'utilisation logicielle, les flèches ou double flèches indiquent les décisions à prendre concernant le décalage de la programmation dans un sens ou dans l'autre. La colonne Action de la table de la Figure 134 permet au chef de service de procéder ou non à ce décalage. En

parallèle, SINERGIE gère la répercussion de ces glissements dans la planification des opérations sur les bilans budgétaires annuels affectés.

IV.6 Conclusion

Dès l'initiation du projet SINERGIE, il y a eu une volonté d'associer tous les utilisateurs au projet de développement de l'outil. En effet, il ne s'agit pas de créer un outil informatique et de le proposer une fois terminé à ses utilisateurs sans que leurs besoins et idées aient été pris en compte. Le travail étant réalisé au sein du service SVS, les échanges avec le chef de service et les COP ont été facilités. Chacun a participé à son niveau à la conception et au paramétrage de l'outil. Les Districts sont localisés à des points stratégiques sur le réseau, nous avons donc effectué un travail de présentation du projet en nous déplaçant dans chaque District. Ce travail de communication a été très important d'une part pour les associer au développement du projet et les tenir informés de son avancement, prendre en compte leurs exigences et leurs remarques. D'autre part, ces visites sur le terrain se sont révélées indispensables pour comprendre leur travail, leurs contraintes, dans un environnement où les temps de réaction sont très rapides.

Dans cette conclusion sur l'outil, nous allons évoquer comment a été perçu le logiciel SINERGIE globalement par les utilisateurs. Nous parlerons ensuite des problèmes que nous avons rencontrés pour la récupération des données. Avant d'évoquer le travail des évaluations en urgences et priorités, nous insisterons sur la phase de paramétrage de la Moyenne Pondérée. Enfin, nous terminerons par les bénéfices de l'outil de visualisation cartographique SINERGIEMAP.

Les utilisateurs (i.e. les Districts, les COP et le chef de service SVS) ont tous été unanimes dans le besoin de centralisation des données, la disponibilité et l'accès par tous (problématique centrale que nous avons déjà évoquée dans la problématique de la gestion de patrimoines dans le BTP). L'objectif commun est la volonté d'avoir une image globale de l'état de l'infrastructure. Les Districts ont accueilli favorablement l'outil SINERGIE. Ils ont tous vu l'avantage d'un système centralisant les informations. Non seulement, cela permet d'éliminer la gestion papier de l'information avec tous ses inconvénients (classement, perte, retard, accessibilité...etc.), mais ils ont vu dans cette nouvelle gestion de l'information une occasion de formaliser la remontée de l'information notamment dans le cas des anomalies et des entretiens courants. Ils ont besoin d'outils leur permettant de gagner du temps, aussi se sont-ils montrés très exigeants sur la convivialité des interfaces, le formatage des fiches avec notamment l'utilisation de cases à cocher. L'archivage de l'information est fondamental pour eux, ils ont ainsi la possibilité d'interroger SINERGIE par le biais de fonctions de recherche d'information sous la forme de requêtes multicritères (exemple : liste des travaux réalisés entre 2 PR sur une période donnée).

Pour les COP, l'enregistrement des opérations et des évaluations en urgence représente globalement un travail supplémentaire. Toutefois, ils ont vu l'intérêt de disposer d'une image globale de l'état du patrimoine et ont été force de proposition dans l'ajout de fonctions de recherche d'informations dans SINERGIE. Pour l'exploitation des données de bilans de santé, SINERGIE a apporté un gain de temps substantiel. Pour les chaussées, nous avons vu que notre outil de consultation des mesures issues des auscultations des chaussées permet au COP concerné d'en avoir une vision globale. Le COP a exprimé le besoin d'aller plus dans le détail dans l'analyse de ses données. SINERGIE a apporté une réponse à cette exigence avec l'utilisation de curseurs permettant d'afficher les données pour une zone restreinte. Dans le cas des ouvrages d'art, il est vrai que nous disposons en interne de l'outil OASIS stockant toutes les cotations IQOA. Ce logiciel, très efficace et performant, ne permet pas de faire des requêtes spécifiques. L'outil cartographique SINERGIEMAP a été conçu pour répondre à cette demande et afficher graphiquement la liste des ouvrages dans une cotation choisie. Par exemple, SINERGIEMAP peut rechercher les ouvrages en cotation 2 sur l'ensemble du réseau.

Pour l'instant, les chaussées, les ouvrages d'art et la signalisation horizontale sont opérationnels. L'objectif de SINERGIE est de mettre à disposition du chef de service une vision globale de l'état du patrimoine pour chaque corps de métier. L'enregistrement des propositions de planification dans les fiches d'évaluation des COP produit une estimation des besoins financiers en termes d'entretien sur une période de cinq ans. Pour argumenter ces demandes, les fonctions de justification permettent de s'appuyer sur les informations contenues dans le Système d'Information pour justifier les choix retenus en termes de bilan de santé, anomalies, etc.

La phase de récupération des données a été difficile. En effet, il a fallu tout d'abord déterminer leur localisation, voir comment les récupérer, puis définir un format d'intégration dans SINERGIE. Nous

avons évoqué la formalisation des données transmises par les Districts. Pour l'enregistrement des anomalies et des entretiens courants, ils ont participé à la structuration de la fiche : définition des champs à renseigner, méthode de renseignement (cases à cocher, menus déroulant, zone de commentaires, etc.). Ce travail a été réalisé avec un réel souci d'efficacité. Une fois le format des fiches validé, le serveur SINERGIE n'étant pas opérationnel, nous avons travaillé avec des modèles de feuilles excel. Le problème de cette méthodologie est qu'il fallait bien entendu retranscrire le contenu des fiches dans SINERGIE, mais en plus, les Districts n'avaient pas encore de retour sur leur PC du traitement des informations transmises. Leur réelle volonté de participation demandait en retour une visualisation des informations et de leur impact en termes d'études ou de création d'opérations dans SINERGIE...

Les données des bilans de santé Chaussées étaient jusqu'à présent transmises à ESCOTA sous forme papier. Nous avons du mettre en place en partenariat avec le CETE un protocole de récupération des données d'auscultation défini en Annexe 4. Ce travail de formalisation des données, coûteux en temps, a demandé la définition des données qu'on souhaitait récupérer, puis en fonction de leur capacité d'extraction d'information, définir le format des fichiers à nous fournir.

La phase de paramétrage a été centrale. Le processus de calcul des valeurs numériques des poids des critères et des valeurs des étiquettes U_i pour chaque critère s'est divisé en trois étapes. La première étape est une phase de préparation pour laquelle nous avons besoin de choisir avec le COP un ensemble d'opérations en essayant de couvrir l'ensemble des problématiques relatives à son corps de métier. Nous avons ainsi préparé les matrices Macbeth pour les évaluations. La deuxième étape était la séance d'interview où nous avons guidé le COP dans le remplissage des matrices. La dernière phase était la validation des échelles produites par Macbeth. Les COP ont apprécié l'efficacité de l'outil Macbeth et la pertinence des résultats obtenus qu'ils ont validée. Ils ont apprécié la collaboration avec l'informaticien dans cette phase de renseignement de l'outil puisque cela leur a permis de s'affranchir de toute contrainte liée à la pratique du logiciel Macbeth.

La moyenne pondérée est un opérateur simple avec lequel pour l'instant les résultats des évaluations en urgence ou priorité ont donné satisfaction et reflètent correctement a priori le comportement des décideurs chez ESCOTA. L'attribution de scores agrégés par la suite n'a posé aucun problème, l'analyse multicritère et le principe d'agrégation faisaient déjà partie de la culture en matière de gestion du patrimoine.

Enfin, là où d'autres sociétés ont l'habitude de travailler avec des listings sous forme de tableaux pour analyser leurs informations, les personnels d'ESCOTA ont tous été demandeurs d'une visualisation globale de l'information sous forme de carte (SINERGIEMAP). L'utilisation de cartes représente un gain de temps, permet d'aller à l'essentiel en un coup d'œil (supervision). La lecture de l'information doit être simple avec un code couleur et des symboles définis dans une légende. Enfin, l'information révélée par cette carte est un point de départ : si un élément interpelle l'utilisateur, il a ensuite la possibilité d'approfondir son analyse en basculant sur les fonctions avancées de SINERGIE. SINERGIE et l'outil de cartographie SINERGIEMAP sont utilisés de façon complémentaire.

Conclusion

Cette thèse avait pour objet de doter l'exploitant d'ESCOTA d'un outil informatique pour l'accompagner dans son activité de gestion du patrimoine. Sur la base d'une analyse des besoins concernant cette activité en Génie Civil, de considérations concernant la prise de conscience par les responsables de patrimoines, de la nécessité d'introduire la notion de risque dans leur gestion, nous avons défini les fonctionnalités de l'outil informatique SINERGIE dont l'objet est d'assister l'exploitant sur toute la chaîne de traitement de l'information de la gestion du patrimoine, du recueil de symptômes à la planification des opérations afférentes. La spécification et la conception de l'outil d'aide à la décision SINERGIE ont été proposées au chapitre II. Le SIAD SINERGIE s'appuie fondamentalement sur un modèle de type Système de Traitement de l'Information et sur l'analyse multicritère. Nous avons donc ensuite consacré notre réflexion théorique aux modèles formels qui supportent les fonctionnalités d'aide à la décision de SINERGIE. Nous avons porté une attention particulière à la notion d'agrégation multicritère avec des échelles d'évaluation discrètes finies, à la granularité des évaluations par les experts, à l'identification des paramètres, aux notions de robustesse et de légitimation de la décision. Ces résultats théoriques ont fait l'objet du chapitre III. Le chapitre IV a tenté d'illustrer sous la forme de scénarios l'ensemble des possibilités qu'offre SINERGIE, installé dès à présent chez ESCOTA, et qui nous l'espérons devrait permettre de modifier positivement à terme les usages en matière de gestion du patrimoine.

Dans cette conclusion, nous avons voulu reprendre le lien qu'entretient SINERGIE avec tous les grands concepts que nous avons évoqués au long de cette thèse.

SINERGIE et les approches de la décision

La Recherche Opérationnelle (ROP) est née aux États Unis dans le cadre des recherches de stratégie militaire. Elle a pris son essor après la seconde Guerre mondiale dans le domaine de l'économie et de la gestion. Elle se fonde sur le principe de formalisation des choix et le calcul d'optimisation. Pour choisir dans l'incertain, trancher entre diverses formules, il faut un critère de choix qui corresponde à une attitude face au risque. La décision reste dans cette perspective un processus de planification où le principe directeur est la raison (la déduction).

S'il va de soi que toute stratégie repose nécessairement sur un ensemble d'informations sur la situation décisionnelle (« les ressources nécessaires au décideur »), l'obtention, la disponibilité, la gestion, l'organisation, le partage, l'échange, le traitement, la fiabilité, la pertinence, la complétude, l'interprétation de cette information sont autant de dimensions qui, dans nombre de « situations complexes » remettent largement en cause les modèles théoriques de la ROP. Le schéma causal de la décision qui y est imposé, formulation d'un désir et conception d'un projet y répondant, prise d'information, délibération, décision proprement dite et exécution, rencontre les limites de toute linéarité : l'impossibilité de considérer des causalités enchevêtrées. L'exécution, par exemple, ne va-t-elle pas changer la conception même du projet, le but recherché ? D'une manière générale, chacune des phases modifie l'objectif initial. La délibération conduit à rechercher de nouvelles informations, etc.

L'étude du processus de la décision doit donc inclure un véritable processus de traitement de l'information lorsque la situation n'est pas complètement « mathématisable », ce qui est généralement le cas lorsque la décision relève d'une organisation ou d'un quelconque collectif. H.A. Simon, qui a élaboré la théorie économique de la rationalité limitée présentée en 1947 dans Administration et processus de décision, précise à cet effet que la difficulté consiste à traiter l'information entre autre parce qu'elle est trop abondante. Pour cela, il met en avant les outils informatiques, qu'il appelle des « prothèses de l'homme » au sens où ils aident ce dernier à poser plus rationnellement les problèmes, filtrer les informations et simuler et planifier l'action qui devra suivre. Il édicte alors quelques principes pour la conception de ces outils et précise que l'essentiel est de comprendre la manière dont les décisions sont prises dans l'organisation, soulever les questions auxquelles l'information va répondre, adopter une approche arborescente et modulaire des problèmes. Dans le cadre de la décision organisationnelle, le vocable « système de traitement de l'information » (S.T.I) permet de désigner commodément la lignée des modèles issus de la pensée de H.A.Simon.

Prise au pied de la lettre, cette approche des systèmes d'information comme prothèses de l'homme conduit aujourd'hui à la naissance d'une « informatique décisionnelle », dont le mot d'ordre principal est : "fournir à tout utilisateur reconnu et autorisé, les informations nécessaires à son travail". Ce slogan fait naître une nouvelle informatique, intégrante, orientée vers les utilisateurs et les centres de décision des organisations. Tout utilisateur de l'entreprise ayant à prendre des décisions doit pouvoir accéder en temps réel aux données de l'entreprise, doit pouvoir traiter ces données, extraire l'information pertinente de ces données pour prendre les "meilleures" décisions. De l'entrepôt de données qui définit un support aux systèmes d'information décisionnels, aux outils de fouille de données permettant d'extraire de nouvelles connaissances, de nombreux moyens informatiques sont aujourd'hui mis en œuvre pour aider à la prise de décision.

Un objectif majeur de ces dix dernières années a été le passage de l'information à la connaissance. Dans les approches mathématiques, objectifs et contraintes ont généralement été modélisés par le biais de modèles logico-mathématiques et la recherche de la décision optimale est une « simple » question de « problem solving » où l'aspect cognitif du processus n'a que bien peu de place. La modélisation mathématique des objectifs et autres contraintes rend l'objectivité du modèle implicite, puisque sa formulation formelle a été établie. Dans une approche plus cognitive de la décision, celle-ci repose sur une hypothèse d'équivocité : pour une situation décisionnelle donnée, plusieurs interprétations de cette même situation sont possibles selon le point de vue, la fonction, les intérêts de l'acteur en jeu... La délibération se trouve ainsi être une étape majeure de la décision. L'information interprétée devient connaissance. Les techniques de gestion de connaissances apportent alors de nouvelles perspectives d'évolution aux modèles S.T.I. La dualité action / décision et le recours aux connaissances se rejoignent dans le concept de connaissances utiles à l'action ou connaissances actionnables. Le couplage de systèmes de gestion des connaissances et de systèmes d'aide à la décision ouvre la voie des « elucidative systems » ou systèmes automatiques d'argumentation où l'acceptabilité (la légitimité) de la décision devient l'enjeu prioritaire.

Plus récemment, pour nuancer ces approches qualifiées d'encore « trop mécanistes », J.G. March insiste sur les conditions pratiques de la prise de décision et de l'élaboration de systèmes d'information [March, 88 ; 91]. Il montre qu'en particulier les problèmes, les solutions et les actions se présentent rarement de façon séquentielle comme H.A. Simon le laisse entendre. Les décisions se développent d'elles-mêmes au fur et à mesure que les actions prennent sens pour les acteurs de la situation. Les managers ne sont pas des décideurs tout puissants mais jouent un rôle pour aider leurs collaborateurs à donner du sens à leur expérience. L'information prend la forme d'histoires pour interpréter l'action. Enfin, L. Suchman s'est opposée à H. Simon sur le modèle de la planification (ou de la programmation de l'information) où l'action est supposée être résolue par le plan et ne servirait éventuellement qu'à le raffiner. Elle montre au contraire que l'action est située, c'est-à-dire inscrite dans le contexte de circonstances concrètes et particulières. Le plan n'est alors qu'une ressource pour l'action : il est un construit social fortement dépendant de l'histoire et de l'expérience des individus qui l'élaborent. Le but du plan est de préparer à l'action pour mobiliser au mieux son savoir incorporé.

Ces réflexions nous laissent penser que si les modèles de la décision donnés par la ROP relèvent de mathématiques compliquées et ont eu d'incontestables résultats en particulier en gestion ou en économie, il n'en reste pas moins que le niveau de formalisation du problème qu'ils exigent n'est généralement pas celui de la modélisation de processus décisionnels d'une organisation engagée dans une dynamique d'action en environnement ouvert, où incertitude, imprécision et incomplétude des données décisionnelles s'amalgament dans l'évaluation des risques... En d'autres termes, la complexité des mathématiques n'est pas toujours la solution utile ou suffisante pour résoudre une situation décisionnelle complexe, l'apport des Sciences Humaines ouvre d'autres horizons sur la décision. SINERGIE, bien que nous ayons présenté la gestion du patrimoine comme un processus de décision en organisation, ne s'inscrit pas dans la mouvance March-Suchman. L'interprétation des situations décisionnelles caractéristiques dans le cadre de la programmation d'interventions sur le patrimoine d'ESCOTA est contrôlée par des normes, des règles et la structure hiérarchique de l'organisation. La décomposition formelle que nous avons proposée du processus de planification des opérations se rapproche davantage du modèle de Simon. D'abord, les phases du processus que nous avons identifiées s'enchaînent selon des séquences qui peuvent certes boucler, mais dont l'ordre est préétabli (la priorité sera toujours affectée après l'urgence, même si le chef de SVS demande à ce que le niveau d'urgence soit révisé a posteriori). Ensuite, le traitement de l'information—son partage, sa distribution, son élaboration et sa restitution sous une forme élaborée et utile à l'action—constitue le cœur de SINERGIE. La décision dans SINERGIE suit donc un plan, certes non élémentaire, mais

néanmoins établi a priori, parler de programmation de l'information n'est pas trahir la philosophie de l'aide à la décision proposée par notre logiciel.

SINERGIE et la gestion des connaissances

La gestion des connaissances est considérée aujourd'hui comme un enjeu majeur de toute organisation, enjeu économique, et plus encore, condition de sa viabilité dans un environnement évolutif complexe, en somme, condition de sa survie. Les nouvelles technologies de l'information et de la communication y sont naturellement associées et accréditent l'idée d'un déploiement rapide sur le terrain. Cependant, ce domaine que l'on rattacherait par sa dénomination aux sciences de la gestion, relève bien plus des sciences cognitives et des sciences sociales. Du coup, les problématiques qui sont abordées ne sauraient être réduites à de simples considérations de gestion de ressources—stock, flux d'échanges, péremption—et surtout si l'on s'intéresse à l'impact attendu de ce processus sur l'organisation : passer de l'expertise individuelle à l'intelligence collective. La conception même des outils censés susciter ce changement majeur doit être fondée sur des concepts non triviaux et exige de véritables expérimentations en grandeur réelle. La notion de mémoire collective semble être l'un des enjeux majeurs de ces outils. Les technologies de l'information facilitent aujourd'hui la communication ou l'échange de données, indépendamment des localisations géographiques des serveurs et des acteurs. La vague Internet, qui en constitue la partie la plus visible avec son arsenal de technologies conviviales, a remis au premier plan des objectifs ambitieux pour les organisations comme la promotion de l'innovation, l'appropriation par la collectivité des expériences et des savoirs individuels, ou encore l'argumentation et la décision collectives.

Cependant, ces performances technologiques ne suffisent pas à l'émergence d'un réel mode de travail collectif, où l'ensemble des processus cognitifs—apprentissage, délibération, argumentation, décision—attribués à un groupe d'acteurs atteindrait et dépasserait un niveau de performance dans l'action non atteint isolément par chacun des individus. Curieusement, il semble que l'objectif d'une meilleure performance collective nécessite de mieux reconnaître l'existence et l'intérêt des actions et interactions individuelles, alors que domine généralement une « norme organisationnelle » composée de principes stratégiques, procédures et consignes prédéterminés. A l'opposé, l'innovation que l'on tend parfois à considérer comme issue du génie individuel repose sur la performance collective tout autant que sur des construits individuels.

Pour atteindre le niveau de performance collective pouvant être qualifié d'intelligence collective, il semble raisonnable d'instrumenter ce « sujet-collectif » qu'est une organisation constituée en vue de l'action (une équipe de projet par exemple) afin de le doter de capacités analogues à celles—naturelles—d'un individu cognitif. On peut en effet parler d'une entité collective donnée—une entreprise, par exemple—comme étant susceptible d'apprendre, d'avoir une mémoire, de faire des expériences, des choix, de prendre des décisions, d'agir, etc.—c'est-à-dire, comme étant en quelque sorte dotée d'une cognition individuelle [Andreewski, 98].

En tout premier lieu, il s'agit de doter le collectif d'une « mémoire commune », et ce, quels que soient les métiers concernés, les spécialités, les fonctions et la nature des connaissances nécessaires à l'exécution des tâches. C'est sur la base de cette mémoire partagée que pourront s'édifier des processus collectifs d'apprentissage, de conception, de décision. Comme le remarque très généralement Pierre Lévy [Lévy, 91], « le savoir de la communauté pensante n'est plus un savoir commun, car il est désormais impossible qu'un seul humain, ou même un groupe, maîtrise toutes les connaissances, toutes les compétences, c'est un savoir collectif par excellence ».

SINERGIE s'inscrit pleinement dans cette vision de la gestion des connaissances. SINERGIE ne propose pas seulement d'accompagner le processus de capitalisation des savoirs et savoir-faire, dont l'objectif principal est de consigner les connaissances stratégiques, et qui porte donc l'effort sur la sélection et la structuration des connaissances, mais s'attache également à instrumenter le partage dynamique des connaissances utiles aux décisions de l'entreprise concernant la gestion du patrimoine. SINERGIE doit être à terme la mémoire dynamique de l'entreprise en ce qui concerne la gestion du patrimoine. Le principe fondateur de SINERGIE, sous l'angle de la gestion des connaissances, est que l'intervention en situation complexe d'un collectif organisé nécessite une rationalité cognitive fondée sur l'adéquation entre les informations possédées et les représentations adoptées par chaque acteur. Nous avons conçu les modèles—les représentations—et interfaces homme / machine de SINERGIE selon ce principe directeur, profitant par ailleurs d'expérimentations sur le terrain grâce à notre localisation en entreprise.

SINERGIE et la Gestion de Patrimoine

Le vieillissement des infrastructures, et leur maintien à un niveau de service satisfaisant, est une préoccupation constante pour les maîtres d'ouvrages autoroutiers qui doivent garantir la sécurité des usagers et le bon fonctionnement de leur réseau dans le temps. Face à la quantité d'informations à gérer, aux conséquences internes à l'entreprise, mais aussi externes, du fait de l'impact que peuvent avoir certaines de ses décisions sur la société au sens large qui vit à proximité du réseau autoroutier, il est indispensable pour le gestionnaire de mettre au point une stratégie d'aide à la décision durable, de se doter des outils pour sa mise en oeuvre, de disposer enfin, en tout temps, d'une légitimation de ses choix d'investissement.

La réflexion qui a été menée par l'ensemble des acteurs des bâtiments et travaux publics ces dernières années a mis en évidence une démarche selon trois logiques complémentaires—la mesure, l'évaluation et la décision—qui représente parfaitement le contexte multi acteurs et multicritères de la gestion de patrimoine à ESCOTA. Nous avons vu dans le premier chapitre que de nombreux outils ont été développés afin de répondre aux besoins des gestionnaires, mais sans réussir à représenter la complexité du processus. De nombreux outils métiers sont disponibles, ils répondent à des tâches bien spécifiques, souvent techniques (calcul d'évolution de structures, lois de vieillissement, etc.), mais aucune aide à la décision supportant le processus de gestion dans sa globalité ne semble avoir été proposée.

La décomposition formelle du processus décisionnel de la gestion du patrimoine de la société ESCOTA a mis en évidence un fonctionnement qui s'inscrit parfaitement dans cette démarche à trois logiques. Cette façon de procéder a été mise en oeuvre depuis de nombreuses années à divers niveaux de responsabilité, internes à l'entreprise. Pour avoir à disposition un état des lieux de son patrimoine et garder la mémoire de l'historique des décisions et de leurs conséquences sur l'évolution du patrimoine (travaux effectués ou reportés), ESCOTA a souhaité se doter de l'outil informatique SINERGIE que nous avons spécifié, conçu et réalisé pour améliorer la maintenance et la gestion du patrimoine. SINERGIE se compose d'un Système d'Information et d'un Système Interactif d'Aide à la Décision pour donner une vision globale de l'état du patrimoine et accompagner les acteurs de l'exploitation dans la planification des opérations d'entretien, d'amélioration et de mise à niveau des divers éléments de patrimoine. La décision revêt à la fois un caractère multi acteurs (Districts, Experts Métiers ou Conducteurs d'Opérations, chef de service Structures Viabilité Sécurité) et multicritère. Les évaluations sont fonctions des domaines et des niveaux de responsabilité de chacun, de même que les critères d'analyse associés à ces domaines et niveaux. L'aide à la décision proposée par le logiciel comporte également un volet relatif à la légitimation de la politique de gestion. La décomposition de l'évaluation des opérations en termes de diagnostic, d'urgence et de priorité s'inscrit totalement dans la triple logique mesure, évaluation et décision. Il s'agit d'une phase essentielle du traitement de l'information qui facilite et prépare in fine une planification argumentée.

L'analyse que nous avons réalisée du processus de gestion de patrimoine a permis cette décomposition en fonctions élémentaires, instrumentées sur le plan informatique par SINERGIE. Même si, in fine, on peut dire que SINERGIE doit permettre une planification optimisée des interventions sur le patrimoine, c'est la formalisation préliminaire du processus en étapes cotations, évaluations en urgence et priorité, justification de la logique de décision, contrôle des erreurs d'estimation et enfin programmation des opérations, qui a permis d'instrumenter la chaîne de traitement de l'information utile au gestionnaire dans sa globalité. La planification des opérations n'aurait pas pu se poser d'emblée comme un problème d'optimisation formulée dans une représentation purement logico-mathématique. La part faite au traitement de l'information dans SINERGIE constitue le cœur de l'aide à la décision, conformément aux principes de H.A. Simon.

Néanmoins, à cette proposition logicielle qui se veut instrumenter la chaîne complète de traitement de l'information, de la mesure du symptôme à la programmation d'une opération, nous souhaitons formuler deux critiques que nous considérerons comme des perspectives potentielles d'évolution du logiciel :

- D'abord, nous pensons que SINERGIE s'affiche aujourd'hui comme un outil d'aide à la décision pour gestionnaires. Il est découplé des outils métiers qui pourraient pourtant fournir des éléments techniques qui viendraient appuyer les diagnostics d'experts. Les résultats de codes de calculs et autres simulations sur le vieillissement d'infrastructures, l'évolution de dégradations pourraient constituer des arguments techniques tangibles utilisés dans le système d'argumentation de SINERGIE. L'intégration de ces outils nous semble donc constituer une voie à explorer ;

- D'autre part, si nous avons insisté sur le fait que l'évaluation en urgence des opérations relevait d'une analyse des risques techniques par un COP et que l'évaluation en priorité par le chef de service SVS s'appuyait, elle, sur une analyse des risques stratégiques, il n'en reste pas moins que l'estimation, ne serait-ce que qualitative de ces risques, demeure un processus cognitif propre aux COP et au chef de service SVS et donc fonction de leur seule expérience. SINERGIE ne propose rien aujourd'hui en tant qu'aide à la caractérisation et à la quantification des risques encourus. Le couplage avec des méthodes d'analyse des risques est la seconde évolution logicielle que nous envisageons pour SINERGIE.

SINERGIE et le management du risque

Si l'on s'en réfère au schéma de la Figure 2 de l'introduction générale de ce manuscrit, une première analyse—sémiotique—permet d'envisager quatre types d'attitude face au risque : la routine et son contraire, la crise ; la maîtrise et la démaîtrise. La maîtrise s'oppose à la crise, et l'on peut considérer que la maîtrise prolonge la routine, alors que la démaîtrise découle de la crise. Chacune de ces attitudes peut être décrite par un couple (latitude de décision - latitude d'action). Ainsi, la routine et la maîtrise correspondent à une latitude d'action et de décision importante, tandis que la crise et la démaîtrise se caractérisent par une forte restriction, pouvant aller jusqu'à l'inhibition [Montmain et al., 08].

On peut qualifier plus précisément la latitude décisionnelle en distinguant différents types de décisions :

- **décision préparée** : le temps permet d'élaborer des scénarios d'action qu'il suffit de mettre en œuvre lorsque la situation le permet ou l'exige ;
- **décision dynamique** : les scénarios doivent être construits en situation afin de tenir compte des événements non souhaités, et des perspectives d'évolution ;
- **décision forcée** : l'occurrence de conséquences préjudiciables détermine les réponses à apporter ;
- **décision inhibée** : la méconnaissance de la situation et le niveau d'incertitude empêchent de déterminer une seule décision adéquate.

On peut repérer des changements d'échelle d'une situation à une autre :

- **échelle temporelle** : maîtrise et crise traitent d'un temps limité, alors que routine et démaîtrise peuvent porter à long terme ;
- **échelle de valeur** : routine et maîtrise portent des valeurs positives, ce qui n'est pas le cas de crise et démaîtrise ;
- **échelle spatiale** : maîtrise et crise conduisent à une action limitée dans l'espace.

L'attitude face au risque et la latitude décisionnelle, en se combinant, déterminent la conduite de l'action. La bonne fin de cette action ne dépend alors plus que des ressources disponibles. La combinaison de changements d'échelle (local/global, court terme/long terme, positif/négatif) et d'attitude permet de caractériser quatre situations de référence [Montmain *et al.*, 08] :

- situation courante, où prédomine la routine ;
- situation dynamique (ou de maîtrise) nécessitant un degré plus élevé de maîtrise ;
- situation d'urgence, vécue comme une crise en préparation ;
- situation d'exception, où l'on redoute la démaîtrise.

Dans les situations courantes (de routine), l'accent est mis sur l'anticipation des risques et la réduction des dangers. Le pilotage de l'activité est de type procédural, la décision se concrétise par la formalisation a priori de plans d'action (plans d'alerte, d'évacuation, de secours).

Dans les situations de maîtrise, suscitées par la détection d'événement non souhaités, l'action et la décision impliquent des stratégies élaborées pour faire face à des événements redoutés et/ou des conséquences non calculables. La représentation de telles situations et la planification de l'action sont difficiles en raison de l'émergence de phénomènes non entièrement prévisibles car partiellement modélisables (boucles, effets non linéaires, combinatoires, seuils, etc.), et en raison des incertitudes

(manque d'information, impossibilité d'appréhender directement les phénomènes déterminants, non observables ou non mesurables). Dans ce type de situations, c'est l'organisation courante qui a à faire face en élevant son niveau de maîtrise pour éviter des conséquences redoutées.

Les situations d'urgence sont déterminées par l'occurrence ou l'imminence (l'occurrence ne peut plus être évitée) d'événements redoutés (c'est-à-dire ayant un impact avéré sur l'activité, cet impact pouvant être indirect comme par exemple la sortie du domaine autorisé par la législation). La décision bénéficie d'une moindre latitude que dans les situations précédentes dans la mesure où l'activité subit déjà l'impact d'événements dommageables. Elle vise à réduire les conséquences des événements redoutés sur l'activité, les hommes, l'environnement, le système social. Les moyens mis en œuvre pour traiter les situations sont spécialisés dans cette tâche (urgentistes, groupes d'intervention, sécurité civile, etc.).

La décision et l'action peuvent se trouver inhibées dans les situations d'exception, où le management de l'activité doit faire face à l'imprévu : événements ou conditions non connus, ou non retenus comme crédibles pour l'activité considérée. Même en cas de phénoménologie connue, l'imprévu peut provenir de l'inadéquation d'un plan d'action ou du fait que le plan d'action se révèle inopérant, ou encore du fait que les défenses prévues n'ont pas fonctionné ; dans ce cas, c'est la surprise qui est le facteur de crise. Enfin, la situation d'exception peut être l'aboutissement de la dégradation d'une situation d'urgence, lorsque les moyens d'intervention sont saturés (insuffisance ou incompétence), et que les perturbations deviennent récurrentes. La décision en situation d'exception n'est plus redevable d'une organisation préalable, et la part du plan d'action dans la conduite des opérations devient faible. Dans ces conditions, émergent deux modes de management : adaptation de plans d'actions et introduction de nouveaux acteurs, ce qui peut être considéré comme relevant de l'auto organisation. Quel que soit l'événement ou le processus qui conduit à la situation d'exception, celle-ci se caractérise par une déstabilisation du système, un dérèglement, et l'accroissement de l'incertitude.

Dans cette ébauche de cartographie des situations de management du risque, SINERGIE est un outil d'aide à la décision qui se veut opérationnel dans les situations dites de routine ou de maîtrise. La prise de décision dans SINERGIE repose sur une phase d'élaboration et d'interprétation de l'information qui correspond à un apprentissage avec une dynamique donnée. SINERGIE est dans une logique d'anticipation : les décisions se concrétisent par la formalisation a priori de plans d'action ou impliquent des stratégies élaborées a priori pour faire face à des événements redoutés.

Dans notre travail, nous avons assimilé le management des risques à la gestion de l'incertain, or les incertitudes affectant le processus de décision en gestion du patrimoine ne sont pas clairement explicitées dans la version actuelle de SINERGIE. Les seules incertitudes auxquelles nous avons porté une attention plus particulière sont celles qui affectent la fiabilité ou la précision des évaluations en urgence et priorité. Nous avons d'ailleurs envisagé plusieurs façons de modéliser le problème. Nous considérons ce point comme une perspective d'évolution, sur le plan formel cette fois-ci, de SINERGIE.

SINERGIE et son support technique

A travers la composition de ce manuscrit, nous avons voulu montrer l'équilibre que nous nous sommes efforcés de donner à notre travail de recherche pendant trois ans dans le cadre d'une convention CIFRE. Nous en avons distingué les trois composantes majeures :

- 1 la composante « répondre aux préoccupations de l'entreprise ESCOTA », restituée d'une part en replaçant le projet d'ESCOTA dans la problématique générale de la gestion de patrimoines dans le BTP (Chapitre I) et d'autre part en proposant un guide utilisateur illustrant les différents scénarios que les utilisateurs de SINERGIE seront amenés à réaliser régulièrement (Chapitre IV) ;
- 2 La composante informatique—le logiciel SINERGIE est aujourd'hui opérationnel et peut être déployé rapidement à tous les Districts et domaines d'expertise de l'entreprise—a été traitée sous l'angle de la spécification fonctionnelle et de la structure des données (Chapitre II), l'interfaçage avec les outils métiers internes et les bases de données externes étant un facteur de complexité qu'on ne saurait négliger tant il peut s'avérer chronophage ;
- 3 La composante mathématique a fait l'objet du Chapitre III où sont proposés tous les éléments mathématiques nécessaires à la réalisation des fonctionnalités de SINERGIE. La combinaison de techniques d'agrégation multicritère et d'évaluation sur des échelles discrètes finies nous a permis de mettre en évidence certains résultats intéressants concernant la

robustesse d'une décision confrontée à des erreurs d'évaluation locales, la notion de moyenne généralisée, de formaliser de différentes façons une interface numérique / symbolique.

Nous restons convaincus que le bon déroulement de cette thèse en entreprise passait par le contrôle de ce juste équilibre.

Si l'on revient en quelques lignes sur le chapitre III, nous sommes partis du constat suivant. La notion d'agrégation est une notion communément introduite dans le Génie Civil où nombre de méthodes reposent sur la combinaison, la fusion d'indicateurs selon des opérateurs prédéfinis. De plus, nous avons fait remarquer que dans le monde de l'ingénierie, la culture des chiffres est fortement développée. Les ingénieurs et techniciens manipulent communément des étiquettes symboliques, et leur attribuent des valeurs numériques, lorsque c'est nécessaire, sans prêter une attention particulière à cette affectation. Nous avons proposé au chapitre III une méthodologie qui permet :

- aux experts de continuer à pouvoir exprimer leurs jugements de valeur dans leur univers de discours habituel ;
- de convertir les étiquettes en des valeurs numériques adéquates en utilisant la méthode MACBETH et des techniques de classification ;
- de calculer le degré d'urgence (respectivement de priorité) d'une opération par un opérateur de type MP et d'en convertir en retour le résultat numérique dans l'univers de discours des experts en garantissant la cohérence entre les échelles « symboliques » et l'opération d'agrégation (i.e. la MP). Cette méthode est implémentée dans SINERGIE.

Nous avons comparé les résultats de cette approche avec une version symbolique de l'agrégation proposée par Grabisch [Grabisch, 06] et appliquée par Jullien [Jullien et al., 06]. Si cette comparaison n'a pas apporté de résultats significatifs quant à d'éventuelles améliorations de la procédure d'évaluation dans SINERGIE, elle nous a néanmoins permis de toucher du doigt la notion de « moyenne généralisée » dans le cas symbolique. Dans la version symbolique de l'agrégation basée sur un opérateur de type moyenne, on estime non seulement l'importance relative des critères, mais également les interactions entre les critères, ce qui n'a bien sûr pas d'équivalent dans un modèle additif numérique. L'opérateur d'agrégation obtenu est bien compris entre le *min* et le *max*, mais comme il ne peut prendre que des valeurs discrètes, le résultat n'est pas une moyenne au sens usuel du terme, l'opérateur a un comportement « légèrement » sous ou sur additif selon le cas. On parlera de moyenne généralisée dont le comportement a pu être illustré sur une base test d'opérations sur les chaussées (Chapitre III).

Par ailleurs, nous avons porté un intérêt tout particulier à l'analyse de sensibilité d'un opérateur d'agrégation. Comme dans les thèses de [Akharraz, 04], [Planté, 06] et [Denguir, 07], nous avons utilisé l'analyse de sensibilité dans les procédures de justification, où chaque formule examinée est décomposée en une somme de contributions des critères impliqués dans le processus d'évaluation. Nous en avons également donné une version qualitative à l'instar de Jullien [Jullien *et al.*, 06], mais, à partir de cette analyse de sensibilité, nous avons surtout déployé deux tests sur la fiabilité et la robustesse d'une décision en fonction des erreurs d'évaluation potentiellement commises par les experts.

Le prototype est opérationnel pour les Chaussées comme il a été exposé dans le chapitre IV, mais également pour les Ouvrages d'Art et la Signalisation Horizontale. Dans l'avenir, il sera étendu aux autres domaines d'intervention du service SVS notamment les bassins, la signalisation verticale, les glissières... De plus, Vinci a encore organisé cette année le « Prix du Concours pour l'Innovation VINCI 2007 » afin d'encourager et valoriser la créativité de chacun de ses collaborateurs. Dix régions ont été définies, sept en France et trois à l'international. Nous avons candidaté dans la région « Activités internationales et centralisées », une des régions internationales, pour laquelle SINERGIE fait partie de la sélection finale du 18 Octobre 2007.

En résumé, au delà des fonctions d'évaluation et de légitimation qui sont le cœur du système d'aide à la décision, il est à noter que la représentation des données doit être considérée comme un résultat essentiel pour une utilisation efficace de l'outil. L'interface homme / machine est également d'une importance capitale dans l'usage du logiciel et est à l'origine de l'outil de visualisation SINERGIEMAP. A tous les échelons de décision, il est nécessaire que le logiciel puisse permettre divers niveaux d'analyse à travers des représentations graphiques adaptées.

Concernant les évolutions, sur un plan technique cette fois-ci, nous avons souligné, au chapitre III, l'existence de nombreux opérateurs d'agrégation permettant de modéliser le comportement d'un

décideur, notamment l'intégrale de Choquet dont l'un des atouts majeurs est de modéliser les interactions entre les critères d'évaluation. Nous n'avons pas eu le temps de l'intégrer dans SINERGIE, d'une part parce qu'il est vrai que la MP (Moyenne Pondérée) a facilité la collaboration et l'implication des EM (Experts Métiers) de par sa sémantique simple dans un problème d'aide à la décision multicritère, et que d'autre part, les résultats de notre méthode d'évaluation en urgence (resp. en priorité) ont donné satisfaction, du moins dans cette première phase de mise en œuvre. Il sera intéressant de s'intéresser à l'apport substantiel que pourrait apporter un opérateur plus riche comme l'intégrale de Choquet pour modéliser des comportements plus complexes dans les stratégies d'évaluation des experts. Mais, l'objectif de cette première version de SINERGIE aurait été vraisemblablement pénalisé par l'introduction d'outils mathématiques plus complexes, avec des sémantiques non intuitives. La possibilité d'utiliser des opérateurs d'agrégation sur des échelles discrètes a également été discutée au chapitre III, mais mériterait encore de nombreux approfondissements, en particulier en ce qui concerne la notion d'influence des critères dans une perspective symbolique de l'agrégation.

D'un point de vue conceptuel, nous avons insisté dans le chapitre II sur la généralité des modèles respectifs du Système d'Information et du Système Interactif d'Aide à la Décision. Au delà de la gestion de patrimoine autoroutier de la société ESCOTA, le principe de l'outil SINERGIE peut être étendu à d'autres types de patrimoine du génie civil (barrages, réseaux électriques, etc.). Nous avons proposé un modèle pour le cœur du système pouvant se décliner pour tout type d'infrastructure, qu'elle soit ponctuelle ou linéaire.

Notre réponse technique aux besoins de la société ESCOTA pourrait être étendue à d'autres patrimoines. Ces systèmes devraient connaître un fort développement dans les années à venir dans un contexte concurrentiel où la masse d'information ne cesse de croître et où la justification des stratégies de développement durable devient un enjeu majeur.

Annexes

Annexe 1 Lexique

AMDE	: Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets
APRR	: Autoroutes Paris Rhin Rhône
ASFA	: Association des Sociétés Françaises d'Autoroutes
BDR	: Banque de Données Routières
BRGM	: Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CETE	: Centre d'Études Techniques de l'Équipement
COFIROUTE	: Compagnie industrielle et Financière des autoROUTES
D2I	: Direction de l'Ingénierie et de l'Infrastructure
DGR	: Direction Générale des Routes
DT	: Direction Technique
EIT	: Exploitation & Ingénierie Trafic
GOC	: Groupe Opérationnel Chaussées
HS	: Hauteur au Sable (ou Macro texture)
HSc	: Hauteur au Sable calculée
IQRA	: Image de la Qualité des Ouvrages d'Art
IQRN	: Image de la Qualité du Réseau National
LCPC	: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
ORN	: Orniérage
SANEF	: Société des Autoroutes du Nord et de l'Est de la France
SAPN	: Société des Autoroutes Paris Normandie
SCA	: Sociétés concessionnaires d'Autoroute
SVS	: Structure Viabilité Sécurité

Annexe 2 Quelques éléments sur les chaussées

Adhérence

L'adhérence d'une chaussée correspond à sa capacité à mobiliser des forces de frottement entre le pneumatique d'un véhicule et la surface de la chaussée sous l'effet des sollicitations engendrées par la conduite.

Elle permet de conserver à tout moment la trajectoire désirée notamment en virage, de réduire les distances de freinage et d'arrêt d'urgence, et de faciliter les manœuvres d'évitement ou de récupération de trajectoire.

Sur chaussée sèche et propre, le niveau d'adhérence est en général satisfaisant pour des conditions normales de conduite. Mais sur chaussée mouillée ou humide, la présence d'eau entre la surface de la chaussée et le pneumatique réduit ce niveau d'adhérence.

L'adhérence est directement liée à la texture du revêtement. La texture de surface d'une chaussée mouillée ou humide doit permettre l'évacuation de l'eau sous le pneumatique : c'est le rôle de la **macro texture**. Elle doit aussi rétablir les conditions de contact aussi proches que possible de celles rencontrées sur chaussée sèche : c'est le rôle de la **micro texture**.

On distingue deux types de mesures :

- **La hauteur au sable (HS)** : mesure directe de la macro texture
- Les mesures de coefficient de frottement : ils permettent d'apprécier la micro et la macro texture par des mesures de coefficient de frottement « pneu » / revêtement avec le **Coefficient de Frottement Transversal (CFT)** et le **Coefficient de Frottement Longitudinal (CFL)**.

Les causes - conséquences des désordres sur les chaussées

Les chaussées se composent d'une :

- Assise qui permet de répartir les charges des poids lourds sur le sol support ;
- Bande de Roulement Bdr dont le but est d'imperméabiliser l'assise et la protéger du trafic. Elle se compose d'un enduit superficiel ou d'un enrobé.

Les chaussées se dégradent à cause du trafic, des conditions climatiques et des malfaçons. Le trafic et les conditions climatiques (variations de températures) accélèrent le vieillissement de la chaussée.

L'analyse des chaussées se fait en termes de dégradation de structure et dégradation de surface. Les dégradations de surface sont des déformations, principalement de l'orniérage et des fissures. Elles influent sur la sécurité de l'utilisateur. Les problèmes sur la couche de surface sont dus à l'usure par le trafic, le vieillissement et les conditions météo. La fréquence des reprises de la couche de surface est conditionnée par le trafic. Plus il est important, plus le vieillissement est accéléré et plus fréquentes seront les interventions.

Les dégradations de structure sont des tassements ou des décollements de couches. Elles sont dues à un problème d'assainissement (mauvais drainage), un problème lié au terrain (composition géologique, stabilité), à des malfaçons ou à la dégénérescence d'un problème de surface, et se matérialisent en surface par des fissures ou du faïençage.

Il faut traiter les dégradations de surface avant qu'elles ne deviennent dégradations de structure. En effet, des fissures en surface évoluent vers un problème structurel à cause des infiltrations d'eau. Les dégradations de structure influent sur la pérennité de la chaussée. Il faut alors faire une reprise structurelle.

On connaît les causes des désordres en surface. Pour des désordres structurels, des études complémentaires permettent de trouver des causes géotechniques, des problèmes liés à l'eau, des défauts de construction. Cette analyse des causes permet de faire un diagnostic.

Avec cette analyse sur les décisions à prendre sur les chaussées, nous avons mis en évidence l'importance de disposer des informations sur la nature et la composition de la chaussée, son état de santé et son environnement.

L'objectif de l'entretien des chaussées est :

- Sur l'**aspect structure** de maintenir leur capacité de répartition des charges supportées ;
- Sur l'**aspect sécurité confort** de garantir la circulation des usagers sur une route sûre et confortable.

Les trois grands types de dégradations observées sur les chaussées sont:

Dégradations	Causes
Déformations	Trafic, usure, fatigue
Fissures	Météo, conditions géotechniques, trafic aggravant les déformations
Arrachements	Un mauvais drainage, perméabilité due aux fissures

Tableau 17 : les types de dégradations des chaussées

Faisons une liste de dégradations observées sur les chaussées et classons-les dans l'une des trois catégories du Tableau 17. Il y a une relation de causes à effet dans l'évolution des déformations vers des fissures puis les arrachements (cf. Tableau 18). Si l'on arrive au stade des fissures, l'évacuation des eaux de pluie ne se faisant plus correctement, l'infiltration de cette eau non seulement participe à l'ouverture des fissures mais induit des problèmes de drainage. Ces infiltrations provoquent des risques d'imperméabilisation de la chaussée. Ensuite, l'ouverture des fissures évolue progressivement vers des arrachements.

Dégradations	Conséquences	Causes	Type de dégradation
Affaissement des rives	Tassement de la chaussée Fatigue Évolution vers faïençage Vérification du drainage	Malfaçons	Déformations
Flache (tassement en pleine chaussée)	Évolution vers faïençage et nid de poule Vérification du drainage	Malfaçons Défaut de portance	Déformations
Orniérage	Évolution vers faïençage	Problème de portance Mauvaise stabilité de l'enrobé	Déformations
Fissures longitudinales	Cassures de la couche de surface Évolution vers faïençage Imperméabiliser la couche de surface	Mauvaise portance Malfaçons Problème structurel (trafic)	Fissures
Fissures transversales	Évolution vers faïençage, flaches et départ de matériaux	Malfaçons Variations de température	Fissures
Faïençage	Maillage de fissures Évolution vers des ouvertures de fissures nécessitant une imperméabilisation	Fatigue de la couche de roulement : structure insuffisante due au trafic ou à une mauvaise portance	Fissures
Nid de poule	Trou de la surface de la chaussée pouvant augmenter en taille et en nombre : ruine totale de la surface Stade final d'une flache ou d'un faïençage	Malfaçons (mauvaise qualité des matériaux lors de leur mise en œuvre)	Arrachements
Pelade	Arrachements par plaques de la couche de surface Évolution vers un arrachement progressif de la totalité de la couche de surface	Bande de roulement trop fine par rapport au trafic Ressuage Malfaçons	Arrachements
Ressuage	Présence de liant à la surface de la chaussée Aggravation par forte chaleur et arrachement de la bande de roulement à cause du trafic	Malfaçons Incidence des conditions météo sur le sol (composition) Mauvaise prise en compte des données géotechniques	remontées

Tableau 18 : les dégradations sur les chaussées

Groupe Opérationnel Chaussées

Le Groupe Opérationnel Chaussées GOC fait partie de l'Association Française des Sociétés d'Autoroutes ASFA. Il rassemble les experts des chaussées des sociétés d'autoroutes APPR, ASF, COFIROUTE, ESCOTA, SANEF, SAPN et SFTRF. Ce groupe se réunit plusieurs fois par an et mène des réflexions sur des travaux de recherche et le développement de méthodes visant à améliorer le suivi des chaussées autoroutières.

Annexe 3 Mise au point d'un indicateur de surface IQRA pour les chaussées

La Direction Générale des Routes (DGR) demande à l'ensemble des sociétés concessionnaires d'autoroutes SCA de lui communiquer annuellement des indicateurs sur l'état de leur patrimoine.

La méthode proposée par l'ensemble des SCA à la DGR propose de prendre en compte les mesures de macro texture, de CFT, d'uni longitudinal courtes et d'Orniérage. Ces mesures sont croisées deux à deux pour définir un « indicateur adhérence » et « un indicateur uni ». Ces 2 indicateurs seront ensuite croisés pour définir un indicateur global dénommé « Indicateur de Surface ».

Le croisement des mesures repose sur un principe de calcul de matrices similaire à la matrice d'adhérence IQRN.

Les index unitaires

La méthode ne s'applique qu'aux sections courantes d'autoroutes et exclut notamment les bifurcations, les échangeurs, les aires, les plateformes de péage, Les mesures unitaires prises en compte sont les suivantes :

- **Macro texture (HS)** : HSc (Hauteur au Sable calculée) pour les mesures antérieures à 2006 ou PTE (profondeur de texture équivalente) pour les mesures postérieures, mesurées à l'aide du rugolaser.
- **CFT** : Coefficient de Frottement Transversal ;
- **Uni longitudinal ondes courtes (UNI OC)** : seules les ondes courtes sont retenues car c'est la longueur d'ondes qui a le plus d'incidence sur l'aspect confort ;
- **Orniérage (ORN)** : profondeur d'ornière en mm.

Le pas de calcul des index sera de 200m (le pas d'acquisition varie de 10 à 20m selon les indicateurs mesurés). Dans le cas où l'on dispose de mesures à un pas inférieur, il sera réalisé une moyenne arithmétique de façon à obtenir une valeur à 200m. Dans le cas où l'on dispose d'une mesure à un pas supérieur, la valeur sera dupliquée pour chaque pas de 200m.

Classification des index unitaires

Chacun des index est comparé à des seuils de façon à les répartir par classes.

Seuils des index unitaires					
HS					
Note	4	3	2	1	0
Seuils	> 0,80	0,61 à 0,80	0,41 à 0,60	0,31 à 0,40	≤ 0,30
CFT					
Note	4	3	2	1	0
Seuils	> 0,60	0,51 à 0,60	0,41 à 0,50	0,31 à 0,40	≤ 0,30
Orniérage					
Note	4	3	2	1	0
Seuils	< 5	5 à 9,9	10 à 14,9	15 à 19,9	≥ 20
Uni OC					
Note	4	3	2	1	0
Seuils	> 7	6,1 à 7	5,1 à 6	4,1 à 5	≤ 4

Tableau 19 : seuils des index unitaires

Indicateur d'Adhérence

La matrice proposée pour le calcul de l'indicateur d'adhérence est la suivante :

Indicateur adhérence		CFT				
		4	3	2	1	0
HS	4	4	3	2	1	0
	3	3	3	2	1	0
	2	2	2	2	1	0
	1	1	1	1	1	0
	0	0	0	0	0	0

Tableau 20 : matrice de calcul de l'indicateur d'adhérence pour IQRA Surface

Indicateur Uni

La matrice proposée pour le calcul de l'indicateur uni est la suivante :

Indicateur uni		Uni longitudinal (ondes courtes)				
		4	3	2	1	0
Orniérage	4	4	3	2	1	0
	3	3	3	2	1	0
	2	2	2	2	1	0
	1	1	1	1	1	0
	0	0	0	0	0	0

Tableau 21 : matrice de calcul de l'indicateur d'Uni pour IQRA Surface

Indicateur Surface

La matrice proposée pour le calcul de l'indicateur Surface est la suivante :

Indicateur surface		Adhérence				
		4	3	2	1	0
Uni	4	4	3	2	1	0
	3	3	3	2	1	0
	2	2	2	2	1	0
	1	1	1	1	1	0
	0	0	0	0	0	0

Tableau 22 : matrice de calcul de l'indicateur de Surface IQRA Surface

Remarque : pour des raisons de confidentialité, les matrices représentées aux tableaux 20, 21 et 22 ci-dessus ne contiennent pas les valeurs réellement utilisées, mais permettent de voir la démarche.

Méthodologie de calcul

D'une façon générale, les indicateurs retenus sont relevés régulièrement par l'ensemble des SCA, avec une périodicité de l'ordre de 3 à 5 ans. Toutefois, les 4 indicateurs ne sont pas systématiquement relevés la même année. Le calcul des indicateurs sera donc réalisé avec la

dernière valeur connue pour les indicateurs. Étant donné la périodicité d'auscultation pratiquée sur le réseau autoroutier, l'écart ne devrait jamais être supérieur à 5ans.

Sans le cas où plusieurs indicateurs ne sont pas disponibles, ce qui peut être le cas pour des couches de roulement récentes de moins de 4 ans, on considèrera alors que les index unitaires manquants sont classés en 4 par défaut. Par ailleurs, les mesures invalides (vitesse inférieure au seuil minimal défaut d'un capteur, ... etc.) ne sont pas prises en compte.

Résultats

Pour l'ensemble d'un réseau, on calcule un indicateur surface au pas de 200m, le résultat final étant la répartition par type de note de 0 à 4. A titre d'exemple, la présentation pourrait être ainsi :

<i>Note</i>	<i>Nombre de sections</i>	<i>Répartition</i>
4	9 825	45,1%
3	9 560	43,9%
2	1 250	5,7%
1	956	4,4%
0	210	1,0%
Total	21 801	

Tableau 23 : exemple de résultat de calcul de l'indice IQRA Surface

Annexe 4 Format de fichiers pour la récupération des données dans le cadre du suivi annuel des chaussées

Les données de bilans de santé

Les données issues des bilans de santé fournis par le CETE exploitées dans le cadre de SINERGIE sont :

- La hauteur au sable HS ;
- Le CFT ;
- L'UNI (petites, moyennes et grandes ondes) ;
- Les indices de dégradations de surface (SURF), de structure (STRU) et de qualité structurale (IESC) ;
- Orniérage.

Sont à rajouter les données :

- FT franches et dégradées ;
- FL hors bandes et sur bandes ;
- Faïençage ;
- Réparations ;
- Ressuage ;
- Autres.

Ces données sont stockées dans la base de données VISAGE et l'outil SEMI utilisés par le Centre d'Études Techniques de l'Équipement Méditerranée d'Aix-en-Provence.

Ces données doivent être transmises à SVS pour une intégration dans SINERGIE, dans le but d'avoir une vision globale du patrimoine.

Voici une proposition de structure des fichiers CSV pour l'extraction des données :

Chaque fichier correspond à une autoroute pour un district donné dans un sens de circulation. On aura un fichier pour chacune mesure selon le format ci-dessous :

PR-début, PR-fin, mesure, date

Exemple pour une mesure CFT:

<i>PR+Ab début</i>	<i>PR+Ab fin</i>	<i>CFT</i>	<i>DATE</i>
133+0	133+100	Invalide Calcul	06/10/2003
133+100	133+171	64	06/10/2003
133+171	133+200	64	06/10/2003
133+200	133+300	62	06/10/2003

Tableau 24 : exemple de mesures CFT

Le nom du fichier devra respecter la structure suivante :

Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_mesure.csv

Exemple : A8_133-185_2005_sens1_CFT.csv

Données « Inconnus calcul » et « absence de mesures »

Il est très important d'avoir toutes les lignes de mesure dans les fichiers pour tous les pas de 100 mètres. En effet, il est souhaitable que l'outil SEMI n'invalide pas des mesures.

Voici un exemple ou on passe du PR 142+980 a 160 dans un fichier Excel :

<i>PR+Ab début</i>	<i>PR+Ab fin</i>	<i>IESC</i>	<i>DATE</i>
142+958	142+980	5.647589	03/03/2006
160+0	160+335.301	Inconnu Calcul	03/03/2006

Tableau 25 : exemple de mesures du CETE (A8 Mandelieu sens 1)

Cette absence de lignes entre le 142+980 et 160+0 est due au logiciel utilisé par le CETE qui supprime automatiquement ces lignes de mesures. Il est indispensable de laisser ces lignes de mesures avec « Inconnu calcul » comme valeur de mesure afin que nous puissions les identifier comme zones de travaux récents dans SINERGIE.

Le revêtement des chaussées

Le CETE dispose également des informations sur l'âge et le type de revêtement des chaussées. Nous proposons une extraction de ces informations sous la forme de fichiers CSV. Chaque fichier devra correspondre à une autoroute dans un sens de circulation pour un district donné. Chaque fichier devra avoir la structure suivante :

PR-debut, PR-fin, nature, épaisseur, date

Exemple :

<i>PR+Ab déb</i>	<i>PR+Ab fin</i>	<i>CR-NAT</i>	<i>CR-EP</i>	<i>CR-DATE</i>
133+0	133+171	BD PERMFLEX	4	1992
133+171	134+0	BBDR	4	2001
134+0	134+540	BD PERMFLEX	4	1992
134+540	138+70	BBDR	4	1991

Tableau 26 : exemple fichier Couche de roulement

Remarque : l'épaisseur pourra être exprimée en cm.

De même que précédemment, le nom du fichier devra respecter la structure suivante :

Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_CR.csv

Exemple : A8_133-185_2005_1_CR.csv

Les anomalies, visites annuelles et points singuliers

Le CETE réalise des visites annuelles sur le réseau au cours desquelles sont effectués des relevés des points singuliers qui donnent lieu à des réparations ponctuelles.

Les types de dégradations exploitées par le logiciel SEMI sont les suivantes. Nous avons associé à chacune un sigle:

Dégradation	sigle
<i>Fissures longitudinales hors bandes de roulement</i>	FLHB
<i>Fissures longitudinales sur bandes de roulement</i>	FLSB
<i>Fissures transversales franches</i>	FTF
<i>Fissures transversales dégradées</i>	FTD
<i>Ressuage</i>	RES
<i>Désenrobage et pelade</i>	DESPEL
<i>Nid de poule et remontées de fines</i>	NR
<i>Réparations sur bandes de roulement</i>	REPB
<i>Réparations totales</i>	REP
<i>Longueur de joints longitudinaux</i>	JL
<i>Orniérage en rive</i>	ORNRIVE
<i>Orniérage en axe</i>	ORNAXE
<i>Faiencage sur bandes de roulement</i>	FAISB
<i>Faiencage total</i>	FAI
<i>Déflexion en rive</i>	DFLRIVE
<i>Déflexion en axe</i>	DFLAXE

Tableau 27 : types de dégradations

Nous proposons le format de fichier suivant pour ces données :

PR-debut, PR-fin, voie, type de dégradation, description, proposition de traitement, date

Comme dans les paragraphes précédents, chaque fichier correspondra à une autoroute dans un sens de circulation pour un district. Le nom du fichier sera de la forme :

Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_PS.csv

Les anomalies sont des dégradations visuelles constatées par les districts ou les personnels du cete au cours de la circulation sur le réseau ESCOTA.

Bornage

Pour les mesures effectuées, le CETE a une table de définition des intervalles de PR avec la distance entre chaque PR consécutifs.

Depuis l'outil SEMI, il est demandé d'extraire ces définitions sous la forme de fichier csv dont voici un exemple ci-dessous pour l'A500 sens 1:

Absc absolue	PR+Absc	Evénement	Marque	
0.00	0+0	ER	0+0	
0.00	0+0	PR		0
1062.00	1+0	PR		1
2075.00	2+0	PR		2
2475.00	2+400	PM	2+400	
2855.00	2+780	PM	2+780	
2895.00	2+820	PR		3

Un fichier devra être fourni par autoroute, sens et district. Pour le tableau ci-dessous le fichier devra s'appeler :

A500_0-3_2003_sens1_BOR.csv

Tableau récapitulatif des fichiers de bilans de santé chaussées

Types données	Structure ligne fichier	Nom du fichier
HS	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_HS.csv
CFT	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_CFT.csv
UNI-NMO	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_NMO.csv
UNI-NPO	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_NPO.csv
UNI-NGO	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_NGO.csv
CR	PR-debut, PR-fin, nature, épaisseur, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_CR.csv
BOR	Route, Absc absolue, PR+Absc, Evenement, Marque	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_BOR.csv
SURF	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_SURF.csv
STRU	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_STRU.csv
IESC	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_IESC.csv
ORNAXE	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_ORNAXE.csv
ORNRIVE	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_ORNRIVE.csv

Tableau 28 : récapitulatif des fichiers de bilan de santé chaussées

Les données relatives aux relevés de dégradations à fournir sont :

FLHB	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_FLHB.csv
FLSB	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_FL.SBcsv
FTF	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_FTF.csv
FTD	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_FTD.csv
RES	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_RES.csv
DESPEL	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_DESPEL.csv
NR	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_NR.csv
REPB	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_REPB.csv
REP	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_REP.csv
FAISB	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_FAISB.csv
FAI	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_FAI.csv
DFLRIVE	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_DFLRIVE.csv
DFLAXE	PR-debut, PR-fin, mesure, date	Autoroute_PRdebut-PR-fin_annee_sens_DFLAXE.csv

Tableau 29 : récapitulatif des fichiers de relevés de dégradations pour les chaussées

Annexe 5 Indicateurs pour l'aide à la décision et théorie des possibilités

L'introduction des notations de cette annexe a pour objet d'expliquer le choix des indicateurs basés sur les valeurs moyennes inférieures et supérieures E^* et E_* pour les indicateurs d'aide à la décision du chapitre III.

La théorie des possibilités est introduite par Zadeh en 1978 [Zadeh, 78] pour donner une sémantique en terme d'incertitude à la notion d'ensembles flous qu'il avait par ailleurs introduite dès les années 60 [Zadeh, 65] [Dubois *et al.*, 88].

Soit un ensemble fini de référence Ω , A et B deux sous-ensembles de Ω . On introduit une mesure de possibilité Π , qui est une fonction définie sur l'ensemble $P(\Omega)$ des parties de Ω et qui prend ses valeurs dans $[0, 1]$, telle que: $\Pi(\emptyset) = 0$ et $\Pi(A \cup B) = \max(\Pi(A), \Pi(B))$.

$\Pi(A)$ quantifie dans quelle mesure un événement $A \subseteq \Omega$ est possible : une valeur de 1 signifie que l'événement est complètement possible, et 0 signifie que l'événement est impossible. De plus, on a $\max(\Pi(A), \Pi(\bar{A})) = 1$, où \bar{A} est le complémentaire de A . Cette équation traduit le fait que, de deux événements opposés, l'un au moins est possible; la possibilité de l'un n'implique pas l'impossibilité de l'autre.

Une mesure de possibilité Π peut être caractérisée par une distribution de possibilité π , qui est une fonction $\pi: \Omega \rightarrow [0, 1]$ telle que : $\Pi(A) = \sup_{\omega \in A} \pi(\omega) \quad \forall A \subseteq \Omega$.

Elle est dite normalisée si $\exists \omega \in \Omega, \pi(\omega) = 1$.

On associe à une distribution de possibilité une mesure duale dite mesure de nécessité : $N(A) = \inf_{\omega \in A} (1 - \pi(\omega)) \quad \forall A \subseteq \Omega$ telle que $\Pi(A) = 1 - N(\bar{A})$.

Une autre façon de voir les choses est de considérer qu'une distribution de possibilité définit une famille de probabilités $\wp(\pi)$ telle que [Dubois *et al.*, 86] :

$$\wp(\pi) = \{P/\forall A \quad N(A) \leq P(A)\} = \{P/\forall A \quad P(A) \leq \Pi(A)\} \quad (28)$$

Cela permet de représenter une connaissance incomplète des probabilités et de définir des bornes inférieures et supérieures de ces probabilités imprécises. On peut en effet définir une fonction de répartition supérieure (F^*) et une fonction de répartition inférieure (F_*) telles que $\forall u, F_*(u) \leq F(u) \leq F^*(u)$ (Figure 69) avec :

$$\forall u \in \mathbb{R} \quad F^*(u) = \Pi(]-\infty, u]) \quad \text{and} \quad F_*(u) = N(]-\infty, u])$$

La différence entre les bornes $F_*(u)$ et $F^*(u)$ rend compte de l'imprécision de l'information. On peut ensuite définir la valeur moyenne inférieure $E_*(\pi) = \int_{-\infty}^{+\infty} x dF_*(x)$ et la valeur moyenne supérieure

$E^*(\pi) = \int_{-\infty}^{+\infty} x dF^*(x)$ prises par les distributions de probabilités de la famille $\wp(\pi)$. L'intervalle $[E_*(\pi), E^*(\pi)]$ est la valeur moyenne de π .

Une propriété fondamentale utilisées dans le chapitre III est l'invariance des valeurs $E_*(\pi)$ et $E^*(\pi)$ par transformation linéaires sur π (Figure 135) [Dubois *et al.*, 87].

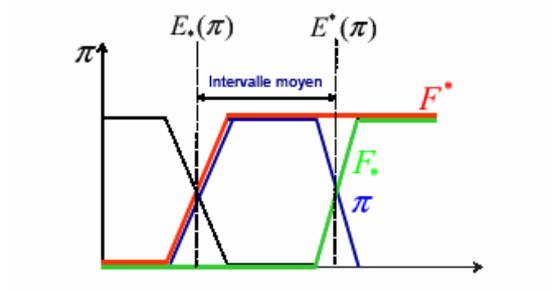


Figure 135 : Exemple de F^* , F_* , E^* , et E_*

Références bibliographiques

- [Akharraz, 04] Akharraz A. (2004). Acceptabilité de la décision et risque décisionnel : Un système explicatif de fusion d'information par l'intégrale de Choquet. *Thèse de doctorat, Université de Savoie, Nîmes.*
- [Akharraz et al., 02] Akharraz A., Montmain, J., Mauris, G. (2002). Decision acceptability in project management: argumentation and risk control. *IAR Intelligent Control and Diagnosis*, Grenoble, France.
- [Akharraz et al., 04] Akharraz A., Montmain J., Denguir A., Mauris G. (2004). Information System and Decisional Risk Control for a Cybernetic Modeling of Project Management, *5th international conference on computer science (MCO 04)*, Metz, juillet 2004, pp. 407-414.
- [Andreewski, 1998] Andreewski, E. (1998). Langage et construction de la cognition collective. *Grand Atelier MCX au Futuroscope, Poitiers, France.*
- [ANR, 06] Agence Nationale de la Recherche. (2006). Appel à Projets de Recherche et d'Innovation 2006, *Programme Génie Civil et Urbain*, 1^{er} mars 2006, 7 pages.
- [Bana e Costa et al., 94] Bana e Costa, C.A., Vansnick, J.C. (1994). Macbeth - an interactive path towards the construction of cardinal value functions. *International transactions in Operational Research*, 1, pp 489-500.
- [Cholewa, 85] Cholewa W. (1985). Aggregation of fuzzy opinions an axiomatic approach. *Fuzzy sets and systems*, 17, pp 249-258.
- [Clivillé, 04] Clivillé, V. (2004). Approche Systémique et méthode multicritère pour la définition d'un système d'indicateurs de performance. *Thèse de l'Université de Savoie, Annecy*, 216 pages.
- [Denguir et al., 06] Denguir-Rekik, A., Mauris, G., Montmain, J. (2006) Propagation of Uncertainty by the Possibility Theory in Choquet Integral based decision making: application to an E-business Website Choice Support. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 55(33), pp 721-728.
- [Denguir, 07] Denguir-Rekik, A. (2007). Un carte possibiliste pour l'aide à la décision multicritère et multi-acteurs – Application au marketing et au benchmarking de e-commerces. *Thèse de l'Université de Savoie, Nîmes.*
- [Domingo-Ferrer et al., 03] Domingo-Ferrer, J., Torra, V. (2003). Median-Based Aggregation Operators for Prototype Construction in Ordinal Scales. *In International Journal of Intelligent Systems*, 18, pp 633-655.
- [Dubois, 83] Dubois D. (1983). Modèles mathématiques de l'imprécis et de l'incertain en vue d'applications aux techniques d'aide à la décision, *Thèse de doctorat d'État ès sciences mathématiques de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.*
- [Dubois et al., 84] Dubois D., Prade, H. (1984). Criteria aggregation and ranking of alternatives in the framework of fuzzy set theory. *Fuzzy Sets and Decision Analysis, TIMS Studies in the Management Sciences*, 20, pp. 209-240.
- [Dubois et al., 85] Dubois D., Prade H. (1985). A review of fuzzy set aggregation connectives. *Information Sciences*, 36, pp. 85-121.
- [Dubois et al., 86] Dubois, D., Prade, H. (1986). A set-theoretic view of belief functions: logical operations and approximations by fuzzy sets. *International Journal of General Systems*, 12, pp 193–226.

- [Dubois *et al.*, 87] Dubois, D., Prade, H. (1987). The mean value of a fuzzy number. *Fuzzy Sets and Systems*, 24, pp 279–300.
- [Dubois *et al.*, 88] Dubois, D., Prade, H. (1988). Théorie des possibilités. Application à la représentation des connaissances en informatique. *Dunod*.
- [Dubois *et al.*, 01] Dubois, D., Grabisch, M., Prade, H., Smets, P. (2001). Using the transferable belief model and a qualitative possibility theory approach on an illustrative example: the assessment of the value of a candidate. *International Journal of Intelligent Systems, John Wiley & Sons*, 16, pp.1245-1272.
- [Gabay, 05] Gabay, J. (2005). Merise et uml : pour la modélisation de systèmes d'information. *Dunod, 01Informatique, 5ème édition*, 289 pages.
- [Guarnieri *et al.*, 04] Guarnieri, F., Garbolino, E. (2004). Systèmes d'information et risques naturels. *Paris : Presse de l'École des Mines*, 251 pages.
- [Grabisch *et al.*, 95] Grabisch, M., Nguyen H.T., Walker, E.A. (1995). Fundamentals of Uncertainty Calculi, with Applications to Fuzzy Inference. *Kluwer Academic*.
- [Guoguelin *et al.*, 88] Guoguelin, P., Cuny, X. (1988). La prise de risque dans le travail, *actes des journées d'étude et de réflexion organisées par les Chaires de psychologie du travail & sécurité du travail, Paris, juin 1988, Éditions O/E, Marseille*.
- [Grabisch, 97] Grabisch, M. (1997). K-Ordered Discrete fuzzy Measures and Their Representation. *Fuzzy sets and systems*, 92, pp 167-189.
- [Grabisch *et al.*, 98] Grabisch, M., Orłowski, S. A., Yager, R. (1998). Fuzzy aggregation of numerical preferences. In R. Slowinski (Ed.), *Fuzzy Sets in Decision Analysis, Operations Research and Statistics*. (ed.): *Kluwer Academic*.
- [Grabisch *et al.*, 00] Grabisch, M., Roubens, M. (2000). Application of the Choquet Integral in Multicriteria Decision Making, Fuzzy Measures and Integrals : Theory and Applications. (ed.): (Grabisch, Murofushi and Sugeno), *Physica-Verlag*.
- [Grabisch, 06] Grabisch, M. (2006). Representation of preferences over a finite scale by a mean operator. *Mathematical Social Sciences*, 52(2), pp 131-151.
- [ITSEOA, 79] Ministère des Transports. (1979). Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art – 1^{ère} partie : dispositions applicables à tous les ouvrages – *Direction de la Route et de la Circulation Routière*, 19 Octobre 1979 (révisée le 26 décembre 1995).
- [Jarrosson, 94] Jarrosson, B. (1994). Décider ou ne pas décider ? *Maxima, Laurent du Mesnil, Editeur, 1994*.
- [Jullien *et al.*, 06] Jullien, S., Mauris, G., Valet, L., Bolon, Ph. (2006). Decision aiding tools for Animated film selection from a mean aggregation of criteria preferences over a finite scale. *IPMU, Paris, France*.
- [Kacprzyk, 87] Kacprzyk, J. (1987). Towards "human-consistent" decision support systems through commonsense knowledge-based decision making and control models: a fuzzy approach. *Computers and Artificial Intelligence*, 6(2), pp 97-122.
- [Kervern, 00] Kervern, G-Y. (2000). Le mauvais génie face à la science du risque : les Cyndiniques. *Actes du Colloque Risque et Génie Civil, Paris UNESCO, 8-9 novembre 2000, Presses de l'ENPC, n°ISBN 2-85978-334-2*, pp. 7-19.
- [Keeney *et al.*, 76] Keeney, R., Raiffa, H. (1976) Decisions with Multiple Objectives : Preference and Value of Trade-offs. *Wiley, New York*.
- [Koning, 90] Koning, J-L. (1990). Un mécanisme de gestion de règles de décision antagonistes pour les systèmes à base de connaissances. *Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse*.

- [Kretz, 06] Kretz, T. (2006). Présentation de l'article intitulé « Application à la campagne IQRN des méthodes statistiques d'analyse de l'évolution des chaussées ». *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n°261-262, avri l/mai/juin 2006, p 26.
- [Latour, 94] Latour, B. (1994). Sociologie des sciences, analyse des risques collectifs et des situations de crise. *Point de vue de Bruno Latour, Séminaire du programme « Risques collectifs et situations de crise », Actes de la première scéance, École des Mines, 15 novembre 1994.*
- [Lepert, 06] Lepert, P. (2006). Gestion technico-économique des infrastructures routières. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n°261-262, avril/mai/juin 2006, pp 3-23.
- [Lévy, 91] Lévy, P. (1991). L'idéographie dynamique, vers une imagination artificielle. *Éditions La Découverte, Paris.*
- [March, 88] March, J. (1988). Decisions and Organization. *Blackwell, New-York.*
- [March, 91] March, J. (1991). Décisions et organisation. *Éditions d'Organisation.*
- [Marichal, 98] Marichal, J-L. (1998). Aggregation operators for multicriteria decision aid. *PhD thesis, Institute of Mathematics, Univ. Of Liège, Belgium.*
- [Marichal, 00] Marichal, J-L. (2000). The influence of variables on pseudo-Boolean functions with applications to game theory and multicriteria decision making. *In Discrete Applied Mathematics*, 107, pp. 139-164.
- [Mavrovouniotis et al., 88] Mavrovouniotis, M., Stephanopulos, G. (1988). Formal order-of-magnitude reasoning in process engineering. *Computer and Chemical Engineering*, 12(9/10), pp 867-880.
- [Mélèse, 72] Mélèse, J. (1972). L'analyse modulaire des systèmes de gestion. *Rédition de l'édition de 1972, Les Éditions d'Organisation, Paris, 1990.*
- [Montero, 89] Montero, F.J. (1989). Weighted aggregation and single-peaked intensities. *Workshop on Aggregation and best choices of imprecise opinions, Bruxelles, Belgium.*
- [Montmain et al., 02] Montmain, J., Akharraz, A. and Mauris, G. (2002). Knowledge management as a support for collective decision-making and argumentation processes. *IPMU'2002, 9th International Conference on Information processing and Management of uncertainty in Knowledge-Based Systems, Annecy, France.*
- [Montmain et al., 07] Montmain, J., Mauris, G., Akharraz, A., (2007). Elucidation and Decisional Risk in a Multi Criteria Decision based on a Choquet Integral Aggregation—A Cybernetic Framework. *To be published, Journal of multi-criteria decision analysis, Wiley Intersciences.*
- [Montmain et al., 08] Montmain, J., Penalva, J-M. (*A paraître en 2008*). La décision, une rupture-La perspective du management du risque. *Revue 2001+ du Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement.*
- [Muller et al., 00] Muller, P-A., Gaertner, N. (2000). Modélisation objet avec UML. *Eyrolles 2000, 2èmem édition*, 514 pages.
- [Murofushi et al., 91] Murofushi, T., Soneda, S. (1991). A theory of fuzzy measures: representations, the Choquet integral, and null sets. *J. Math. Anal. Appl.*, 159, pp. 532-549.
- [Murofushi et al., 93] Murofushi, T., Soneda, S. (1993). Techniques for reading fuzzy measures(III) : Interaction index. *In 9th Fuzzy sysem Symposium*, pp. 693-696, Sapparo, Japan.
- [Penalva, 97] Penalva, J-M. (1997). La modélisation par les systèmes en situations complexes. *Thèse de l'Université de Parix XI-Orsay.*
- [Penalva et al., 02] Penalva, J-M., Montmain, J. (2002). Travail collectif et intelligence collective : les référentiels de connaissances. *IPMU'2002, 9th International Conference on*

- Information processing and Management of uncertainty in Knowledge-Based Systems, Annecy, France.*
- [Peyras, 03]** Peyras, L. (2003). Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages, développement de méthodes d'aide à l'expertise. *Thèse de doctorat, Université Blaise-Pascal, Clermont 2*, 199 pages.
- [Peyras et al., 04]** Peyras, L., Boissier, D., Royet, P. (2004). Approches de l'analyse de risques en génie civil : exemples des barrages. *Revue Française de Génie Civil*, 8(2), pp. 931-952.
- [Plantié, 06]** Plantié, M. (2006). Extraction automatique de connaissances pour la décision multicritère. *Thèse de l'Université Jean Monnet de Saint Etienne*.
- [Piet et al., 05]** Piet, Y-H., Julia, F., Gausset, B. La politique d'entretien des ouvrages d'art départementaux de Loire-Atlantique. *Journée Stratégies et Politiques Routières, LCPC, Bouguenais*, 12 Octobre 2005.
- [Pincet, 05]** Pincet, B. (2005). Auscultation des ouvrages. *Rapport au comité d'experts IREX, 14 décembre 2005*.
- [Pomerol, 02]** Pomerol, J. C. (2002). L'apport de Herbert Simon dans le management et la décision. *Revue de l'intelligence artificielle (Revue des Sciences et Technologies de l'Information)*, 16 (1-2).
- [Rico et al., 07]** Rico, A., Auray, J-P. (2007). L'intégrale de Sugeno pour la mesure de la qualité de vie. *LFA 2007, Nîmes, France*.
- [Roy, 85]** Roy, B. (1985). Méthodologie multicritère d'aide à la décision. *Paris, Economica*.
- [Roy et al., 93]** Roy B., Bouyssou, D. (1993). Aide multicritère à la décision : méthodes et cas, *Économica Paris*, 695 pages.
- [Saaty, 80]** Saaty, T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process. *McGraw-Hill, New York*.
- [Sageau, 00]** Sageau, J.F. (2000). Le suivi préventif des infrastructures. *Actes du Colloque Risque et Génie Civil, Paris UNESCO, 8-9 novembre 2000, Presses de l'ENPC*, n°SBN 2-85978-334-2, pp. 541-552.
- [Sanchez et al., 07]** Sanchez, C., Montmain, J., Vinches, M., Mahieu, B. (2007). A multicriteria evaluation over a finite scale for maintenance activities of a motorway operator. *4th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO-2007) May 9 - 12, 2007 Angers, France*. Awarded best student paper <http://www.icinco.org/icinco2007/awards.htm>.
- [Satzinger, 04]** Satzinger, J-W. (2004). Analyse et conception de systèmes d'information. *Éditions Reynald Goulet, 2^{ème} édition*, 705 pages.
- [Serre et al., 06]** Serre, D., Peyras, L., Tourment, R., Diab, Y. (2006). Évaluation de la performance des digues de protection contre les inondations. *Revue française de géotechnique, n°155, 2^{ème} trimestre 2006*, pp. 57-70.
- [Setra, 96]** SETRA. (1996). IQOA (Image de la Qualité des Ouvrages d'Art) Guide de visite en subdivision. *Référence F 9630 PV, Bureau de vente du SETRA*, 1996, 17 pages.
- [Simon, 83]** Simon, H. A. (1983). Administration et processus de décision. *Economica, Paris*.
- [Simon, 91]** Simon, H.A. (1991). Sciences des systèmes, sciences de l'artificiel, *Dunod*, 229 pages.
- [Simon, 97]** Simon, H. A. (1997). Models of Bounded rationality. MIT Press, Cambridge Massachusetts.

- [Sugeno, 74]** Sugeno, M. (1974). Theory of fuzzy integrals and its applications. *Ph.D. Thesis, Tokyo Institute of Technology, Tokyo.*
- [Sugeno et al., 77]** Sugeno, M., et al. (1977). Fuzzy measures and fuzzy integrals_A survey. In Gupata, Saridis and Gaines, editors, *Fuzzy Automata and decision processes*, pp.89-102.
- [Trouillet, 00]** Trouillet, P. (2000). Suivi préventif des ponts autoroutiers du réseau concédé. *Actes du Colloque Risque et Génie Civil, Paris UNESCO, 8-9 novembre 2000, Presses de l'ENPC*, n°SBN 2-85978-334-2, pp. 553-561.
- [Yager, 88]** Yager, R. (1988). On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision-making. *IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics*, 18, pp 183-190.
- [Zadeh, 65]** Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338–353.
- [Zadeh, 78]** Zadeh, L.A. (1978). Fuzzy Sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1, pp.3-28.
- [Zadeh, 83]** Zadeh, L.A. (1983). Computational approach to fuzzy quantifiers in natural languages. *Computers and Mathematics with Applications*, 9, pp 149-184.

Résumé

La Société des Autoroutes Estérel Côtes d'Azur Provence Alpes, ESCOTA, est l'un des principaux concessionnaires d'autoroutes à péage en France. Face au vieillissement de l'infrastructure qui est devenue une des préoccupations majeures des entreprises du BTP, ESCOTA a décidé de formaliser et d'améliorer le processus décisionnel pour la maintenance préventive et la gestion de son patrimoine infrastructure dans un environnement multi acteurs et multicritère. Cette activité concerne la planification d'opérations d'entretien, d'amélioration et de mise à niveau. Le traitement de l'information chez ESCOTA peut être formalisé selon un processus en trois étapes : mesure, évaluation et décision. Des inspections périodiques sont effectuées pour détecter les symptômes de pathologies ou des défauts de fonctionnement. L'expert responsable d'un domaine (chaussées, ouvrages d'art, bâtiments...) évalue la situation de chaque élément de patrimoine et lui associe un degré d'urgence. Le responsable de l'infrastructure pondère et coordonne les demandes des experts en attribuant un degré de priorité à chaque opération selon ses propres critères stratégiques. Un ensemble spécifique de critères et un opérateur d'agrégation (Moyenne Pondérée — MP) sont associés à chaque étape de ce processus d'évaluation. La MP est calculée par l'agrégation des scores partiels affectés à l'opération, après analyse selon chacun des critères. Dans la pratique, les scores partiels sont exprimés sur une échelle finie alors que le modèle d'agrégation suppose implicitement de travailler sur des échelles numériques continues. Notre travail a consisté à proposer une méthodologie d'évaluation cohérente qui permet 1) aux experts d'exprimer leurs valeurs de jugements dans leur univers de discours discret, 2) de convertir les étiquettes symboliques en valeurs numériques via la méthode MACBETH et des techniques de clustering, 3) de calculer la valeur numérique de la MP puis de la convertir dans l'univers de discours des experts, 4) d'effectuer une analyse de robustesse pour diagnostiquer le risque d'erreur de classification. Cette méthode a été implémentée dans un Système de Traitement de l'Information —SINERGIE— pour les décisions concernant la programmation des opérations et faciliter la façon dont les décideurs utilisent leur capacité de raisonnement via une procédure adéquate de traitement de l'information.

Mots-clés — Gestion de patrimoine, Transport, Système d'Information, Aide multicritère à la décision, Agrégation multicritère, Échelle finie, Système Interactif d'Aide à la Décision, Infrastructure Autoroutière.

Abstract

The ESCOTA Company is one of the leading operators of toll motorways in France. The ageing of the infrastructure is a constant concern for the owner, thus the ESCOTA Company aims at the formalization and improvement of the decisional process for preventive maintenance and assets management in a multi actors and multi criteria (MC) environment. This activity is related to the planning of upkeep, improvement, or upgrading operations. The information processing used by ESCOTA for property management can be formalized in three steps: measure, evaluation and decision. Periodic inspections are performed to detect any malfunction symptoms as early as possible. The expert in charge of a domain (carriageways, bridges, road signs, buildings ...) evaluates the situation seriousness and associates an emergency degree to the corresponding maintenance operation. The official in charge of the operating network then coordinates and ponders the experts' needs and requirements by attributing a priority degree on the basis of more strategic criteria. To each step of this process a specific set of criteria and an aggregation operator (Weighted Average Mean WAM) correspond. Each MC evaluation step is modelled as the aggregation of partial scores attributed to an operation w.r.t. a set of n criteria. The scores are expressed over a finite scale as labels, whereas the aggregation model is supposed to deal with numerical values and cardinal scales. Our work has been to set up a consistent evaluation process that enables 1) experts to express their judgement values in their own discrete semantic universe, 2) to convert the labels in adequate numerical values using the MACBETH method and clustering techniques, 3) to compute the WAM based aggregated value and convert it in return into the experts' semantic universe 4) to carry out a robustness analysis of the evaluation process to assess the risk of misclassification of the operations and to diagnose these misclassifications. This method is implemented in an IPS —SINERGIE — that supports decisions concerning maintenance operations planning and facilitates the way decision-makers use their reasoning capabilities through adequate information processing procedure.

Keywords: Property Management, Transport, Information System, Multi-criteria decision-making, Multi-criteria aggregation, Finite scale, Decision Support System, Motorway infrastructure.