



HAL
open science

Prendre en compte l'humain en génie civil, la modélisation face au défi de la complexité

Franck Sfiligoï Taillandier

► **To cite this version:**

Franck Sfiligoï Taillandier. Prendre en compte l'humain en génie civil, la modélisation face au défi de la complexité. Génie civil. Université de Bordeaux, 2018. tel-02014034

HAL Id: tel-02014034

<https://hal.science/tel-02014034>

Submitted on 11 Feb 2019

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.

Prendre en compte l'humain en génie civil

-La modélisation face au défi de la complexité-

Dossier d'Habilitation à Diriger des Recherches

de l'Université De Bordeaux

présenté par

Franck Sfiligoï Taillandier

Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux

Présenté le 14 décembre 2018 devant le jury composé de :

Pierre	BREUL	Professeur des Universités	Président
Frédéric	AMBLARD	Professeur des Universités	Rapporteur
David	BIGAUD	Professeur des Universités	Rapporteur
Corine	CURT	Ingénieure de Recherche (HDR)	Rapporteur
Christophe	LEPAGE	Chargé de Recherche (HDR)	Examineur
Sidi Mohammed	ELACHACHI	Professeur des Universités	Examineur
Amadou	NDIAYE	Ingénieur de Recherche	Examineur
Denys	BREYSSE	Professeur des Universités	Directeur

*En souvenirs de Régis Bonetto,
qui m'a accompagné dans
mes premiers pas de chercheur.*

Résumés

Résumé. Le génie civil est un domaine riche tant par la diversité des acteurs qui y sont associés (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, utilisateur, etc.) que par la variété des enjeux auxquels ces acteurs doivent se confronter (e.g. maîtriser la durée et le coût des projets de construction, assurer un bon niveau de confort pour l'habitant, etc.). Les acteurs doivent notamment faire face à de nombreux problèmes décisionnels complexes (e.g. choix de conception, d'actions de maintenance, de stratégie de démolition, etc.), qui constituent autant de défis scientifiques. Au travers de ce manuscrit, j'explore comment le modèle et la modélisation peuvent apporter des réponses au défi de la complexité en intégrant l'humain dans ses différentes dimensions (acteur, décideur, expert). Pour cela, au travers de trois systèmes (le projet de construction, le bâtiment et le parc immobilier), je présente différents modèles permettant de faire face à la complexité. En plus d'exposer mon travail sur les modèles, je me suis attaché à formaliser les réflexions personnelles que ces modèles avaient pu susciter. Mon ambition, au travers de ce manuscrit d'HDR, est de tirer des enseignements de ma pratique de la recherche et de pouvoir, par-là, faire réfléchir tout chercheur souhaitant se lancer dans le domaine de l'aide à la décision appliquée et de la simulation des systèmes complexes.

Abstract. Civil engineering is a rich field both in terms of the diversity of the actors associated with it (project owner, project manager, user, etc.) and in terms of the variety of issues that these actors must face (e.g. limit the duration and cost of construction projects, ensure a good level of comfort for the inhabitants, etc.). In particular, the actors have to face many complex decision-making problems (e.g. design choices, maintenance actions planning, select a demolition strategy, etc.), which constitute as many scientific challenges. Through this manuscript, I explore how the model and the modelling can provide answers to the challenge of complexity by integrating the human in its different dimensions (actor, decision-maker, expert). For this, through three systems (construction project, building and building stock), I propose a set of models addressing the issue of the complexity. In addition to exposing my work on the models, I endeavored to formalize the personal reflections that these models had generated. My ambition, through this HDR manuscript, is to draw lessons from my research practice and thus generate food for thought for any researcher who wishes to work in the field of applied decision support and simulation of complex systems.

Remerciements

La recherche est tout à la fois œuvre individuelle et collective. Construire son parcours de recherche résulte d'un cheminement personnel, mais qui ne saurait se concevoir sans l'appui des autres qu'ils soient chercheurs, collègues mais aussi famille ou amis.

Je voudrais tout d'abord remercier les rapporteurs, Corinne, Frédéric et David, pour leur travail d'analyse sur ce manuscrit et par toutes les réflexions qu'ils ont partagées avec moi lors de la soutenance. Je tiens aussi à remercier Pierre et Christophe qui ont accepté d'évaluer ce travail en assistant à la soutenance. Ils ont permis d'élargir encore le panel des disciplines représentées, apportant un nouvel éclairage, riche et profond sur mon travail. Au-delà de ce travail d'évaluation, c'est surtout les échanges, qui ont lieu pendant et après, que je retiendrais. Ils m'ont permis d'aller encore plus dans mes réflexions sur mon travail et, je l'espère, conduiront à renforcer nos collaborations.

Je remercie chaleureusement Denys, Amadou et Mohammed pour m'avoir accompagné dans l'aventure de l'HDR. Ils ont, par leurs précieux conseils, contribué à enrichir considérablement cet ouvrage. En dehors même de l'HDR, ils ont, tout au long de ces années que j'ai passées à Bordeaux, participé à mon développement en tant que chercheur, marquant durablement mes travaux de recherche.

Je tiens aussi à remercier tous ceux qui ont partagé mes années bordelaises, que ce soit mes collègues, les doctorants avec les lesquels j'ai travaillé, et plus généralement toutes les personnes que j'ai eu le plaisir de rencontrer durant ces huit années passées à l'I2M.

Finalement, puisque mon parcours de recherche se confond avec celui du chercheur que je suis, me repositionnant en tant qu'humain, je remercie mes proches, ma famille et mes amis qui m'ont accompagné tout au long de ces années. Par leur bienveillance et leur gentillesse, ils ont contribué à mon développement scientifique et humain. Un merci spécial à Eléonore, qui par son soutien, m'a permis d'avancer et de construire pas à pas ce parcours.

Table des matières

Introduction	9
1. Préambule.....	11
2. Thèmes de recherche.....	11
3. Parcours scientifique.....	12
4. Problématique.....	13
5. Cartographie des travaux et clefs de lecture du manuscrit.....	14
Chapitre 1 : Positionnement & Problématique	17
1. Introduction.....	19
2. De la position de l'humain vis à vis du système et du modèle.....	20
3. De la complexité.....	21
4. Incertitudes et complexité.....	27
5. Modèle.....	28
6. Modéliser.....	33
7. Conclusion.....	43
Chapitre 2 : La gestion des projets de construction et de leurs risques	45
1. Introduction.....	47
2. RBS : Tailored RBS.....	48
3. Modèle relationnel : MMRMP.....	53
4. PRM : CP-HPRM.....	56
5. ABM : SMACC1 & SMACC2.....	60
6. Jeux sérieux : Domago.....	63
7. Discussion.....	66
8. Conclusion.....	73
Chapitre 3 : Vers des bâtiments durables	75
1. Introduction.....	77
2. ABM : Li-BIM.....	78
3. Aide à la décision multicritère : ARD-Fourmi.....	86
4. Optimisation multi-objectif : ECO2D2.....	95
5. Discussion.....	105
6. Conclusion.....	111
Chapitre 4 : Gestion de parcs immobiliers	113
1. Introduction.....	115
2. Approche multicritère interactive : REMIND.....	116
3. Optimisation de sac à dos multipoches multi-objectif : RP-MMK... ..	126
4. Optimisation, multicritère et argumentation : AIPA.....	133
5. Discussion.....	142
6. Conclusion.....	148
Chapitre 5 : Discussion & Conclusion	149
1. Introduction.....	151
2. Discutons modèle.....	151
3. Le <i>Chercheur</i>	163
4. Des perspectives.....	170
5. Conclusion générale.....	175
Annexes	177
Annexe A : Liste des sigles utilisés dans le manuscrit.....	179
Annexe B : Publications.....	181
Annexe C : Projets de recherche.....	187
Annexe D : Encadrements scientifiques.....	189
Annexe E : Références.....	192

INTRODUCTION

Où il sera question de :

*Positionnement,
Thèmes de recherche,
Parcours scientifique,
Travaux antérieurs,
Problématique.*

Introduction

1. Préambule

Au travers de ce manuscrit, je me lance dans la délicate tâche de synthétiser 11 années de recherche, depuis les débuts de ma thèse, en un document d'une taille que j'ai cherché à garder raisonnable. Si le document va décrire les travaux effectués au cours de ces années, il ne va pas chercher à en donner une vision exhaustive et détaillée. Je laisserai aux lecteurs souhaitant approfondir certains sujets, lire les articles cités dans l'**Annexe B** ; là est référencé l'ensemble de ma production scientifique (75 publications dont 17 articles parus dans des revues internationales de rang A). L'enjeu du manuscrit est de mettre en perspective le travail effectué au travers d'un prisme lentement façonné par de multiples lectures, rencontres, échanges et réflexions tout au long de ces années. Pour cela, il me sera nécessaire d'introduire différents termes et notions. Ces choix sémantiques ne sont pas neutres parce qu'ils induisent déjà un positionnement scientifique. Même si certains de ces termes sont utilisés dès ce chapitre introductif afin de présenter la problématique qui sera traitée, l'ensemble des notions utilisées seront clairement définies dans le **Chapitre 1** qui positionnera mon travail de chercheur. Les chapitres suivants (**Chapitres 2 à 4**), exposeront la teneur de mes recherches en les appliquant à des systèmes spécifiques. Puis suivra une conclusion (**Chapitre 5**) qui discutera des points clefs et de la trajectoire dessinée. Mais avant d'aller plus loin, esquissons le cheminement emprunté par ce manuscrit, en décrivant tout à la fois les thèmes qui seront abordés, mon parcours et les questions qui seront posées dans ce document et auxquelles je tâcherai d'apporter réponses. Cette introduction s'achèvera sur la cartographie de mes travaux (**partie 5**) qui servira de support au **Chapitre 1** pour positionner la problématique scientifique considérée. Afin d'aider le lecteur à se repérer dans la jungle des sigles et acronymes présents dans ce manuscrit, l'**Annexe A** en propose la liste complète avec leur signification.

2. Thèmes de recherche

Au centre de mon activité de recherche, se place la problématique de l'aide à la décision dans le domaine du génie civil. Le génie civil est perçu dans sa dimension la plus large, incluant tous les éléments bâtis (bâtiment, ouvrage d'art, infrastructure, etc.) aux différentes étapes de leur cycle de vie (conception, construction, gestion d'ouvrage existant, etc.) et aux différentes échelles (l'ouvrage, le quartier, le parc immobilier, la ville, etc.). Dans cette vision large du génie civil, le bâti est considéré dans sa dimension physique mais aussi dans ses dimensions symboliques et fonctionnelles. Tout ouvrage a plusieurs fonctions qui doivent être considérées tout autant que ses caractéristiques mécaniques ou physiques car ce sont ces fonctions premières qui guident les choix : un pont n'existe que parce qu'il permet de franchir un obstacle. On ne peut penser le bâti sans considérer l'ensemble des fonctions auxquelles il doit répondre. Ces fonctions répondent à des enjeux humains, imposant de prendre en compte les acteurs qui y sont associés, qu'ils soient maître d'ouvrage, maître d'œuvre, utilisateur, etc. Mes recherches prennent donc acte de cette nécessité d'intégrer tant les acteurs que les fonctions associées à l'ouvrage et considèrent le génie civil dans une vision holistique (voir **Chapitre 1 partie 5.2**). Dans cette optique, le bâtiment, le quartier et la ville sont appréhendés dans toute leur complexité. L'humain est alors remis au centre du système car il est le demandeur, le concepteur, le constructeur et l'utilisateur. Ainsi, bien que souvent associé directement aux sciences de l'ingénieur, voire parfois restreint à sa dimension mécanistique, le génie civil, tel qu'abordé dans mon travail, est bien plus englobant. Il fonde un domaine aux multiples interactions entre les systèmes techniques et humains, pouvant être étudié sous l'angle de n'importe quelle discipline, depuis l'Histoire (vision patrimoniale) jusqu'à la chimie (vision matériaux), en passant par la philosophie (penser la ville) ou la psychologie (comportement des occupants/habitants).

Le deuxième champ abordé dans mes recherches est lui aussi directement lié à l'humain, puisqu'il s'agit de l'aide à la décision. L'aide à la décision ne peut se concevoir qu'en relation avec un/des décideur(s). Bien que l'on puisse vouloir chercher à automatiser des processus décisionnels en éludant le décideur humain, la décision sera toujours perçue dans sa capacité à répondre à un dessein humain. Les sciences de la décision sont par nature pluridisciplinaires : gestion, mathématiques, économie, psychologie, sociologie, ingénierie, philosophie, etc. Décider est une préoccupation partagée par tous les domaines d'application ; l'étudier, accompagner les gens vers de bons choix est une préoccupation majeure, hier comme aujourd'hui. La recherche scientifique a ainsi investi le champ de l'aide à la décision sous de multiples angles, du plus théorique au plus appliqué. Cela offre un corpus d'une richesse rare et un panel d'outils propres à répondre à de nombreuses problématiques.

Au croisement de ces deux domaines (le génie civil et l'aide à la décision) se trouve ainsi l'humain, composante souvent peu considérée par les sciences de l'ingénieur et pourtant au cœur de tous les systèmes d'ingénierie. La prise en compte de l'humain m'a amené à découvrir d'autres champs disciplinaires : informatique, sociologie, psychologie, etc. Cela induit la nécessité d'une vraie multidisciplinarité, empruntant des méthodes, outils et approches de différentes disciplines, tout en restant focalisée sur les objets du génie civil. Cette approche, plaçant l'humain au cœur du système et de la décision, est partagée par la communauté de la recherche opérationnelle comportementale (*Behavioral Operational Research – BOR*) (Kunc, Malpass et al. 2016). Mon travail traduit la volonté de décloisonner les disciplines pour aborder, dans un espace riche et ouvert, la problématique de l'aide à la décision pour les systèmes du génie civil.

3. Parcours scientifique

Cette vision du génie civil est le fruit d'un parcours et de rencontres. Ma formation d'ingénieur à l'ESTP (Ecole Spéciale des Travaux Publics à Paris) m'a donné les connaissances élémentaires en génie civil avec une forte orientation vers les ouvrages d'art. L'école, tournée vers le monde industriel, m'a apporté une vision très opérationnelle de l'ingénierie civile. Cette formation a révélé aussi une nouvelle envie, celle d'enseigner. Cela m'a poussé à passer l'agrégation de génie civil l'année qui a suivi l'obtention de mon diplôme d'ingénieur. L'année de préparation au concours, intense, a consolidé mes compétences théoriques et a complété mes connaissances en génie civil, notamment en ce qui concerne le bâtiment, élargissant ma vision de ce domaine. La réussite à ce concours m'a permis de découvrir de nouvelles envies avec en ligne de mire la possibilité de faire de la recherche. Souhaitant parfaire mes connaissances en éco-construction, j'ai opté pour un Master recherche à l'Université de Savoie qui s'est poursuivi par une thèse. Ma volonté d'aborder le domaine du génie civil selon une logique transversale sous l'angle du développement durable est entrée en phase avec le sujet de thèse proposé par Gérard Sauce (LOCIE) et Régis Bonetto (CSTB). Ma thèse portait sur l'aide à la construction d'une stratégie de maintenance pluriannuelle d'un parc patrimonial immobilier à partir d'une évaluation orientée risque des composants. La vision « parc immobilier » a encore étendu ma perception du champ du génie civil. Un autre apport majeur a été l'approche systémique du travail imprimée par mes encadrants, et que j'ai depuis fait mienne. Cette thèse requérait de se confronter à des enjeux de modélisation de systèmes complexes multi-échelles et à des problématiques d'aide à la décision, deux préoccupations majeures qui occupent toujours mes recherches. Ce travail a débouché sur deux articles (voir **Annexe B**) durant la thèse (et de nombreuses conférences), mais il a aussi donné lieu à deux autres articles, ultérieurs, qui en exploitent de façon plus fine les idées posées.

Persuadé que la pluridisciplinarité était une clef pour la compréhension et la résolution des problèmes d'aide à la décision que je percevais en génie civil, j'ai, après la soutenance de ma thèse, choisi de rejoindre la faculté d'administration à l'Université Laval (Québec, Canada). Durant cette

année de post-doctorat, j'ai travaillé, en collaboration avec Irène Abi-Zeid (Pr. Université Laval, Québec) sur l'évaluation environnementale des parcs immobiliers par le recours à l'analyse de cycle de vie. J'ai pu, dans ce cadre, largement renforcer mes connaissances et ma maîtrise des méthodes d'aide à la décision, tout en me formant aux méthodes d'évaluation environnementale. Ce travail a donné lieu à une publication dans une revue et plusieurs articles de conférences (voir **Annexe B**).

J'ai rejoint en 2010, l'Université de Bordeaux où j'ai pu renforcer ma problématique de recherche en lui donnant un caractère plus vaste et générique, centrée autour de la modélisation des systèmes complexes et de la décision. Mes rencontres dans différentes communautés et les travaux partagés m'ont énormément apporté, rendant encore plus effective, la notion de multidisciplinarité.

4. Problématique

Ma vision du génie civil se veut large et ouverte, englobant tout à la fois les éléments matériels, immatériels et humains. Cette vision conduit à considérer les objets d'étude comme complexes (cette notion sera plus largement explicitée dans le **Chapitre 1**) ; cela est d'autant plus prégnant que la composante humaine est elle-même éminemment complexe. Afin d'appréhender cette complexité, j'utiliserai l'angle de la systémique en introduisant la notion de *complexité systémique*. L'enjeu est alors d'analyser, de formaliser et de simuler les systèmes complexes du génie civil. Cette complexité se retrouve à un deuxième niveau qui est lui aussi inhérent à l'humain, celui de la décision formant la *complexité décisionnelle*. Tout comme il est possible de donner les caractéristiques qui créent la complexité systémique, on peut définir ce qui rend complexe, une situation de décision. Cette double complexité peut être considérée comme un frein devant être réduite pour être dépassée ; c'est ce qui fonde la vision analytique classique. En effet, la complexité rend difficile la compréhension des systèmes : elle induit du bruit, de l'émergence (voir **Chapitre 1 partie 3.2**), de l'incertitude... autant de choses qui rendent difficile le travail de celle ou celui qui étudie ce système. Elle rend aussi difficile la prise de décision : comment décider lorsque l'on n'a pas tous les éléments en main ? Comment être sûr de prendre la bonne décision ? Pourtant, loin de vouloir simplifier, je fais mienne l'opinion des penseurs du complexe (Simon (2004), Morin (2004), Le Moigne (1977)...) : plutôt que de réduire la complexité, je chercherai à mieux l'appréhender, à lui donner forme pour pouvoir la prendre en compte et mieux la penser pour la maîtriser.

C'est là qu'intervient la notion de modèle, notion polymorphe qui sera définie dans le **Chapitre 1**. C'est le modèle qui donnera forme au système dans sa complexité. Pour cela, il faudra recueillir et assembler de la connaissance permettant de construire et enrichir le modèle. Cette connaissance peut avoir différentes sources, différentes natures, différents formats, être lacunaire... Il faut considérer cet ensemble parcellaire et hétérogène de connaissances et le structurer pour composer un modèle. C'est là une troisième source de complexité, que je nommerai *complexité gnoséologique*, héritée de celle du système, mais à laquelle la transition par l'humain (en tant qu'émetteur ou que récepteur de connaissances) donne toute sa spécificité. Ces trois complexités seront décrites plus en détail et illustrées vis-à-vis de systèmes appartenant au génie civil dans le **Chapitre 1**.

Ces trois complexités (système, décisionnelle et gnoséologique) entrent en écho avec un triple positionnement de l'humain par rapport au système : celui qui est et/ou agit dans le système, celui qui connaît/veut connaître le système et celui qui décide vis-à-vis du système. Ces positionnements peuvent se combiner ; e.g. un gestionnaire peut être tout à la fois dans un positionnement d'acteur du système et de décideur vis-à-vis de celui-ci. Cela induit une typologie de modèles fondée sur ce triple positionnement, décliné selon trois enjeux : simuler l'humain dans le système, l'aider à connaître et l'aider à décider. Ces trois positionnements liés au modèle, appelées respectivement positionnement du système, de la connaissance et de la décision correspondent à autant de problématiques. A ces positionnements, s'ajoute un autre, transversal, celui du *Chercheur*. Le *Chercheur* a pour charge de

modéliser afin de répondre aux enjeux portés par les trois positionnements précédemment évoqués. C'est dans son regard que se dessine la question du travail de recherche, que je poserai pour ce manuscrit : *Comment la modélisation peut-elle permettre de prendre en compte l'humain dans ses différentes dimensions et de faire face à la complexité en génie civil pour aider à comprendre, à réfléchir et à décider ?*

5. Cartographie des travaux et clefs de lecture du manuscrit

Cette problématique, seule, ne permettrait pas de comprendre mes travaux de recherche, qui croisent un regard méthodologique avec un domaine d'application défini. L'aspect applicatif a une double importance : en premier lieu, mon travail s'inscrit dans le champ des sciences appliquées, ensuite l'application permet de ré-ancrer le modèle dans le réel, lui donnant l'espoir d'impacter la société. Ainsi, aux positionnements de l'humain évoqués dans la partie précédente (système, connaissance, décision et *Chercheur*), il faut ajouter deux dimensions physiques propres au domaine d'application (i.e. le génie civil) : les dimensions temporelle et spatiale. La dimension temporelle va permettre de positionner le travail vis-à-vis du cycle de vie de l'objet étudié (**Figure I.1.a**). La dimension spatiale va représenter l'échelle et le périmètre considérés, depuis l'échelle du matériau jusqu'à l'échelle de la ville (**Figure I.1.b**).

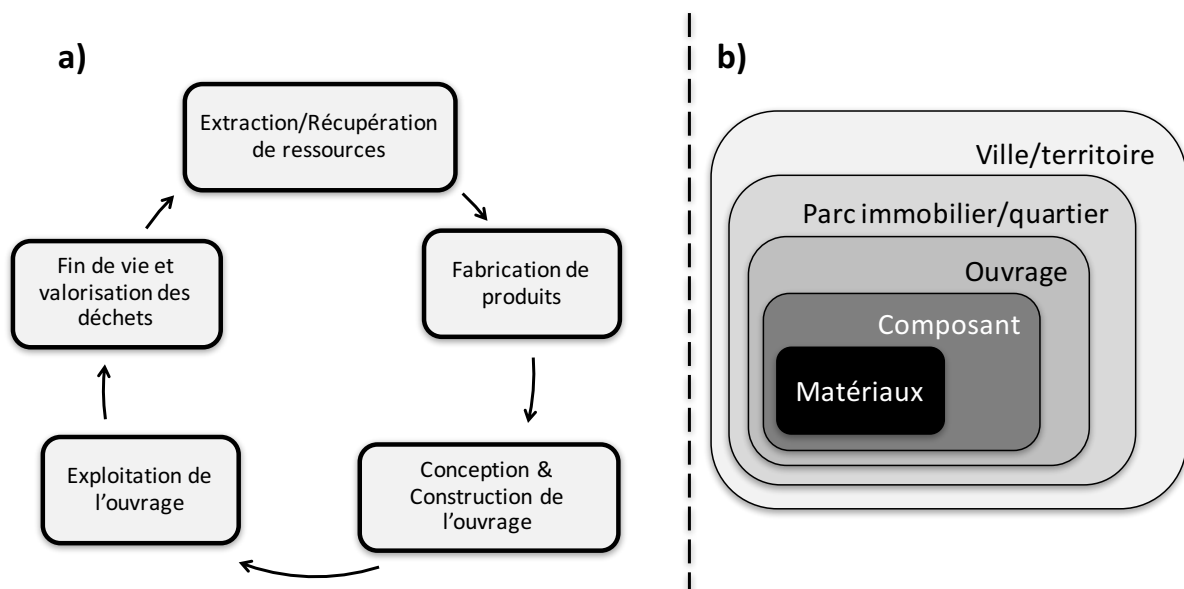


Fig I.1. Différentes échelles d'un système de génie civil : temporelle (1.a), spatiale (1.b)

En croisant ces deux dimensions avec les positionnements de l'humain, la **Figure I.2** positionne mes publications, traçant la cartographie de mes recherches. Cette carte dénote la variété des systèmes abordés quoiqu'ils appartiennent tous au domaine du génie civil. Chaque case du tableau correspond à un ou plusieurs systèmes : e.g. le croisement *Exploitation* avec *Parc/quartier* renvoie tout à la fois à la gestion d'un parc immobilier qu'au réaménagement d'un quartier.

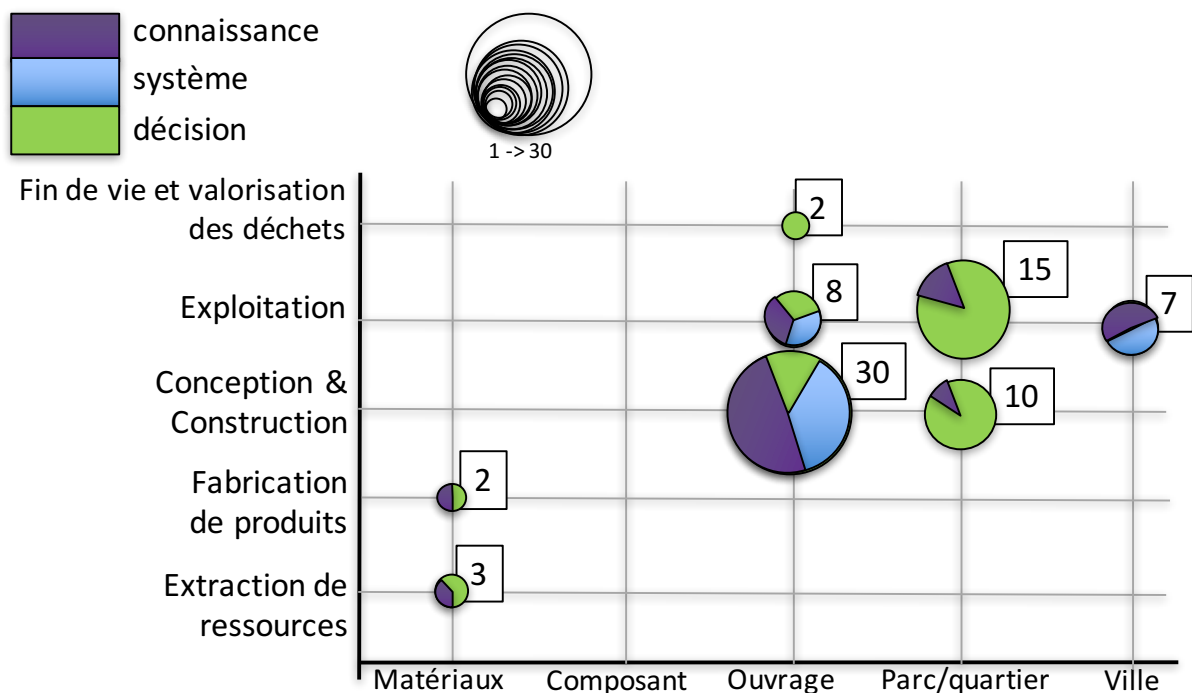


Fig I.2. Cartographie des travaux de recherche

Il est possible de rassembler la plus grande partie de mes travaux sous 10 problématiques applicatives :

- Exploiter des ressources forestières pour la construction,
- Concevoir un isolant thermique bio-sourcé,
- Gérer un projet de construction,
- (Ré-)Aménager un quartier,
- Reproduire le comportement des occupants d'un bâtiment,
- Rénover/réhabiliter un bâtiment
- Gérer un parc immobilier,
- Gérer les risques liés à un territoire,
- Gérer des infrastructures urbaines,
- Déconstruire un ouvrage.

Tous ces travaux ne pourront pas être abordés dans ce manuscrit, qui ne prétend pas retranscrire de façon exhaustive l'ensemble de mon travail passé. J'aborderai la question de l'humain pour trois systèmes : (a) le projet de construction, (b) le bâtiment et (c) le parc immobilier. Les autres systèmes faisant l'objet de mes travaux seront évoqués ou utilisés à titre illustratif dans les différents chapitres mais ils ne seront pas détaillés. Toutefois, ils sont référencés dans la bibliographie en **Annexe B**.

Ce document est structuré en 5 chapitres. Dans le **Chapitre 1**, je positionne mes travaux et ma problématique de recherche. J'expose la notion de complexité dans une approche épistémique et systémique. Je fais le point sur le vocabulaire utilisé et j'exprime en quoi le génie civil est confronté à cette complexité. Enfin, j'y introduis la modélisation comme élément de réponse face à la complexité. Dans chacun des trois chapitres suivants, j'explore un système spécifique en déclinant les différents positionnements de l'humain autour de celui-ci. Le **Chapitre 2** porte sur les projets de construction et la gestion des risques qui leur sont liés. J'expose dans ce chapitre comment il est possible de formaliser la connaissance sur ce système, comment cela peut permettre de mieux comprendre et apprendre et enfin comment il est possible de simuler le déroulement d'un projet de construction. Le **Chapitre 3** porte sur les bâtiments en phase d'exploitation et en fin de vie : comment on y vit, comment on peut les rénover et comment on peut les démolir lorsqu'ils ont atteint leur fin de vie. Je

présente dans ce chapitre un modèle fin de simulation du comportement humain et l'utilisation de deux processus d'aide à la décision pour aider un propriétaire à rénover sa maison et pour établir une stratégie de démolition efficace. Le **Chapitre 4** se focalise sur la gestion d'un parc immobilier et s'intéresse particulièrement à la question de la maintenance et de la réhabilitation dans le cas d'un ensemble important de bâtiments. Il présente plusieurs modèles d'aide à la décision liés à cette problématique complexe. Dans le **Chapitre 5**, je discute des différents points abordés tout au long de ce manuscrit, en explorant notamment comment les différentes positions de l'humain peuvent se combiner au travers des modèles. J'achèverai ce manuscrit en traçant les perspectives de ce travail avant finalement de conclure.

CHAPITRE 1

Positionnement & Problématique

Du constat des complexités à la nécessité de la modélisation

Où il sera question de :

La position de l'humain vis à vis du système,

Complexité,

Incertitudes,

Modèle,

Modélisation.

Chapitre 1

Positionnement & Problématique

-Du constat des complexités à la nécessité de la modélisation-

1. Introduction

Si l'**Introduction** de ce manuscrit a visé à cartographier mes travaux et à en tirer une problématique générale, il importe dans ce premier chapitre de positionner clairement mes recherches vis-à-vis d'enjeux scientifiques. Plus précisément, il me faut expliciter le positionnement que j'adopterai, c'est à dire définir la place du *Chercheur* telle que je la conçois. Cela n'est pas neutre, puisque c'est au travers de ce positionnement que peut se comprendre la problématique de mon travail de recherche. Ce positionnement est d'autant plus important que ce travail se situe à l'interface de différentes disciplines induisant une difficulté sémantique. Les termes n'ont pas tous le même sens selon la discipline dans laquelle nous nous situons. Pour lever ce problème, je poserai et définirai dans ce premier chapitre tous les termes importants utilisés dans le manuscrit. Ce travail de définition fera apparaître les verrous scientifiques intrinsèques aux concepts et enjeux manipulés.

La logique qui prévaut dans mes recherches est une approche itérative de conceptualisation (**Figure 1.1**). Dans cette logique, le concept le plus concret utilisé sera celui de *monde*. Je parlerai de monde, pour qualifier les objets tels qu'ils sont réellement, dans toute leur complexité (Juignet 2015). L'humain, faute d'omniscience, n'a pas la capacité cognitive d'appréhender ce monde dans sa complète mesure ; il lui faut l'interpréter. Le résultat de cette interprétation correspond au *monde réel*. Cette interprétation étant multiple, on parlera alors de *mondes réels* (Juignet 2015). Le *monde virtuel* correspond à la représentation du monde vue au travers du modèle, et par extension, au monde simulé informatiquement.

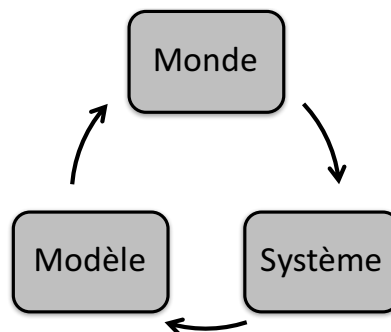


Fig 1.1. Cycle d'abstraction

Pour conceptualiser le monde, il existe de nombreux paradigmes (e.g. réductionnisme (Juignet 2015), mouvement (Guy 2014), sémiotique (Hénault 1979), etc.). L'ensemble de ce travail se placera sous l'égide de la systémique. La systémique est un courant de pensée à rapprocher de la cybernétique (Wiener 2014), de la théorie de l'information (Shannon 1948) et du structuralisme (Petitot 1998). Elle place le *système* au cœur de l'approche. Un système est défini comme un ensemble « vivant » d'éléments en relation, arbitrairement limité (i.e. le système a des frontières, un périmètre), hiérarchisé, organisé et finalisé (Le Moigne 1977). Vivant signifie ici que le système est un ensemble en évolution : il est composé d'éléments qui interagissent dynamiquement les uns avec les autres. Tous mes travaux vont s'inscrire dans le courant du *système ouvert* (Bertalanffy 2012) : l'environnement du système est tout à la fois extérieur et intérieur au système. Cela se traduira par la présence d'une entité *environnement* au sein du système qui sera l'avatar de tout ce qu'il y a en dehors, permettant de décrire les relations entre le système et son environnement.

Le système est déjà une représentation du monde puisqu'il correspond à son interprétation par l'humain. Comme exposé dans l'**Introduction**, l'humain est perçu dans mes travaux selon une quadruple dimension : agissant vis-à-vis du système (*Acteur*), connaissant le système (*Expert*), décidant vis-à-vis du système (*Décideur*) et étudiant le système (*Chercheur*). La systémique telle que je l'aborde induit de la subjectivité ; elle renvoie chez Morin (2004) à la notion de *sujet*. Le sujet est à comprendre dans sa dichotomie *objet/sujet*. L'objet pouvant être un être, vivant ou non, mental ou physique. Il peut être le système dans son ensemble ou une partie de celui-ci. Le sujet est celui qui pense, perçoit ou représente l'objet ; c'est le sujet qui interprète la finalité du système et en fixe les frontières. Cette distinction permet de positionner et de discuter le rapport du sujet à l'objet, celui-ci pouvant en faire partie (e.g. parties prenantes ayant leur vision du système), ou non (e.g. le chercheur analysant un système).

Une caractéristique inhérente à la plupart des systèmes est la *complexité*. La notion de complexité est une pierre angulaire de la systémique. Cependant, elle peut aussi s'entendre dans un spectre plus large que celle de l'analyse *stricto-sensu* du système. La **partie 3** discutera de ces différentes dimensions de la complexité.

Le système est une représentation du monde, mais afin de pouvoir en faire usage pour répondre à une problématique, il est nécessaire de le traduire en lois et règles, c'est à dire le *modéliser*. La **partie 5** de ce chapitre exposera de façon détaillée, mon approche du *modèle* et ce qu'elle induit dans mes travaux. C'est à partir du modèle que l'on pourra répondre aux enjeux posés par ce mémoire : *aider à réfléchir, à comprendre et à décider*. Les réponses à ces problématiques vont impacter le monde. Mon travail se présente comme un cheminement, ou plutôt une boucle, partant du monde et l'influençant en retour (**Figure 1.1**). Dans ce cycle, le modèle est tout à la fois impacté et impactant pour le monde. Il sera au cœur de ce document, en étant réinvesti dans les différents travaux présentés.

2. De la position de l'humain vis à vis du système et du modèle

Telle qu'exposée dans l'**Introduction**, ma vision du génie civil, qui se veut large, multi-échelle, et multidisciplinaire, impose de considérer l'humain comme point central de mon travail. Mais revenons tout d'abord sur cette notion d'*humain* qui n'a pas encore été définie. Premier élément, le terme *humain* a été préféré à ceux d'*Homme* ou d'*homme*, de par sa neutralité de genre. De plus, son utilisation ici regroupe tout à la fois l'individu, le groupe et la société. Dans une optique systémique (voir **partie 1**) et holistique (voir **partie 5.2**), les trois dimensions (individu, groupe et société) doivent être considérées dans les systèmes étudiés, d'autant que l'espèce humaine est éminemment sociale et que les différents niveaux d'organisation ont un impact fort sur son comportement. Exclure le champ collectif ou individuel serait se priver d'une partie de la compréhension de l'humain.

Le domaine du génie civil (et *a fortiori* le domaine de l'ingénierie) intègre de multiples systèmes comportant des humains, que ce soit à l'échelle individuelle comme par exemple un habitant d'une maison, ou collective comme par exemple des automobilistes. Les sciences de l'ingénieur ont donc dû prendre en compte l'humain dans leurs modèles. Cela se fait classiquement au travers de la notion de *facteur humain* (*human element* en anglais, *human factor* désignant l'ergonomie). Le facteur humain renvoie généralement au comportement des femmes/hommes dans un contexte de travail et/ou de risque ; il est souvent associé à l'idée de faute, de défaillance ou de traumatisme (Dejours 2010). Cette notion renvoie l'humain à un positionnement dual : à la fois source et récepteur d'un flux (e.g. information, risque, ressource...). Ainsi, dans la gestion des risques industriels, le facteur humain désigne l'humain comme élément provoquant ou modifiant un aléa ou comme celui qui en est victime. Ce positionnement est trop limitatif au regard de l'objectif défini dans ce travail où l'on va considérer l'humain dans la pluralité de ses dimensions. Si l'on en revient au domaine de la gestion des risques, j'aborderai l'humain comme une source et un récepteur de risque, mais aussi comme un élément du

système devant vivre dans un environnement risqué et dont l'attitude est guidée par une connaissance imparfaite des risques et une appréhension propre de ceux-ci. De plus, la notion de facteur humain, en renvoyant l'humain à un facteur induit un positionnement éthique que je ne souhaite pas assumer (Russ and Leguil 2012). Bien évidemment, ce terme est utilisé, le plus souvent, avec des intentions tout à fait louables (e.g. mieux considérer l'humain dans les systèmes d'ingénierie). De plus, de nombreux travaux proposés par les tenants de ce cadre sont très intéressants. Mais, je préfère, quitte à perdre en précision, me positionner dans un cadre plus large, où l'humain est observateur, penseur et acteur du système et non simplement un émetteur/récepteur. Ce choix aussi a vocation à faciliter les échanges avec les chercheurs des autres disciplines et les parties prenantes, qui peuvent ne pas être à l'aise avec ce terme de facteur humain. Pour ces raisons, je n'utiliserai pas la notion de facteur humain, qui me semble trop réductrice, préférant la notion plus générale d'humain.

En parallèle des approches de l'humain par les sciences de l'ingénieur, la littérature propose aussi de nombreux travaux de chercheurs en sciences humaines s'intéressant au domaine du génie civil. A titre illustratif et sans la moindre ambition d'être exhaustif, on peut citer des travaux portant sur : la prise de risque chez les ouvriers (Choudhry and Fang 2008), le burn-out chez les ingénieurs en génie civil (Lingard 2003), les femmes en ingénierie (Fielden, Davidson et al. 2000), les facteurs psychologiques et sociaux influents dans l'adoption de mesures d'économie d'énergie (Hanus, Wong-Parodi et al. 2018). Ces approches sont intéressantes, bien que visant un objectif différent du mien. Elles cherchent à décrire, à comprendre, voire pour certaines, à faire des préconisations quant au comportement humain. La notion de modèle y est souvent tenue, voire absente, se contentant d'une vision descriptive ou explicative du monde. Bien qu'ayant un objectif différent, ces études peuvent se révéler très utiles pour mes travaux de par l'information et la connaissance qu'elles recèlent. Cependant, ces études ne sont pas suffisantes dans mon optique, où le positionnement central du modèle permet un questionnement plus profond du système.

Mon approche emprunte tout à la fois la capacité de description et de compréhension de l'humain propre aux sciences humaines et la capacité de le représenter et de le modéliser propres aux sciences « exactes ». Ce dernier terme est toutefois trompeur car aucune science n'est, en soit, exacte, mais il décrit du moins une ambition. L'enjeu est de trouver un compromis admissible (i.e. une position acceptable) entre capacité à prendre en compte la complexité de l'humain et capacité à concevoir, produire et utiliser le modèle en se positionnant à l'interface entre ces approches. Bien évidemment, ce positionnement n'est nullement inédit et de nombreux chercheurs ont déjà creusé le sillon ici emprunté (e.g. sciences cognitives (Miller 2003), intelligence artificielle (Russell, Norvig et al. 2010)), bien que le domaine du génie civil n'ait été jusqu'à présent que marginalement abordé. La volonté d'adopter ce positionnement et sa faible utilisation dans le domaine du génie civil m'ont permis de bénéficier d'approches, de méthodes et d'outils déjà éprouvés, tout en parcourant un champ disciplinaire dans lequel il reste beaucoup à faire. Toutefois, je ne saurais prétendre avoir la connaissance suffisante de toutes les sciences convoquées (ingénierie, psychologie, sociologie...) pour assumer seul ce positionnement. Choisir une telle pluridisciplinarité impose de travailler en collaboration. Je reviendrai sur ce point dans le **Chapitre 5 partie 3.3**.

3. De la complexité

Comme je l'ai évoqué précédemment, la complexité est tout à la fois la difficulté à lever (i.e. verrou scientifique) et l'un des principaux enjeux de mes recherches. Mais avant d'étudier comment y faire face, il me faut, dans un premier temps, la définir. Pour cela, je distinguerai trois niveaux de complexité attachés aux trois positionnements de l'humain préalablement définis : la *complexité gnoséologique*, la *complexité systémique* et la *complexité décisionnelle*. Ces trois niveaux de complexité seront illustrés au travers des différentes problématiques applicatives présentées dans

l'**Introduction partie 5**. Il me faudra répondre à cette triple complexité pour réussir à atteindre l'objectif d'aide à la décision que je me suis fixé.

3.1. Complexité gnoséologique

Le premier pan de complexité est celui en lien avec la connaissance. Je distingue dans ce travail la *donnée*, l'*information* et la *connaissance*, en utilisant les définitions proposées par Liew (2007) : (1) La *donnée* est un symbole ou un signal lu/perçu. Le terme de symbole est à prendre dans son acceptation large et peut être un mot (texte et/ou parole), un nombre, un diagramme ou une image ; il représente n'importe quel élément constitutif de la communication. Les signaux comprennent des mesures et/ou des observations sensorielles de tout phénomène (lumineux, acoustique...). (2) L'*information* est un message contenant une signification, une implication ou une contribution pertinente pour la décision et/ou l'action. Elle suppose donc une sémantique et une mise en contexte. (3) La *connaissance* est la reconnaissance (savoir-quoi), la capacité d'agir (savoir-faire) et la compréhension (savoir-pourquoi) qui réside dans l'esprit (cerveau) humain. Elle renvoie à l'idée de cognition et implique, par rapport à l'information, une prise de recul, la capacité à faire des liens et faire des raisonnements, à prendre des décisions et à agir.

J'ai choisi le terme de complexité gnoséologique plutôt que ceux de complexité de la connaissance (i.e. *knowledge complexity* en anglais) ou de complexité épistémologique. La notion de *knowledge complexity* a été introduite par Goldwasser, Micali et al. (1989) et renvoie à une complexité computationnelle de manipulation des interactions entre éléments. Elle est utilisée en gestion mathématique/informatique des connaissances, et notamment en cryptographie (Vadhan 2007). La connaissance n'existe dans ce contexte qu'au travers des interactions. Or, j'entends considérer la connaissance aussi à son échelle élémentaire, qui peut, en soit, être complexe (de par les incertitudes, les perceptions...). Un autre terme que j'aurais pu utiliser est celui de complexité épistémologique ; l'épistémologie est une discipline qui étudie la connaissance scientifique (Barreau 2013). C'est un champ disciplinaire dans lequel se placent de nombreux travaux, notamment en philosophie des sciences. Contrairement à son équivalent anglais *epistemology* qui est plus général, le terme français d'épistémologie renvoie à des connaissances scientifiques. Dans ce document, le terme, moins connoté, de *gnoséologie* qui renvoie à la connaissance en général est préféré.

Plusieurs attributs qualifient la complexité gnoséologique (Meyer and Curley 1991, Hobballah 2017) : le nombre de domaines abordés, la taille des domaines, le niveau d'expertise requis pour les comprendre, le type et la variété des sources, la nature et la quantité des données/informations, la disponibilité, les incertitudes et la complétude des connaissances. Afin d'évaluer ces différents indicateurs de complexité, une grille d'évaluation qualitative est proposée en **Table 1.1**.

Tab 1.1. Echelle d'évaluation des indicateurs de complexité gnoséologique

Indicateur	Niveau de complexité				
	Nul	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
Multi-disciplinarité	Un seul domaine considéré	Plusieurs domaines proches (e.g. mécanique du solide et des fluides)	Multidisciplinarité peu importante (e.g. ingénierie et mathématique)	Multidisciplinarité assez importante (e.g. sociologie et ingénierie)	Forte multidisciplinarité (e.g. linguistique, mathématiques, médecine et ingénierie)
Source	Une seule source	Plusieurs sources, mais de nature identique (e.g. deux avis d'experts)	Plusieurs sources différentes, mais restant assez proches (e.g. dires d'experts et littérature scientifique)	Plusieurs sources de nature assez différente (e.g. pratiques, littérature scientifique)	Plusieurs sources très variées (e.g. savoir-faire expert, littérature scientifique et données statistiques)

Quantité des données et/ou informations	Très faible nombre (moins de 10)	Faible nombre (moins de 100)	Quantité moyenne (plusieurs centaines)	Quantité importante (plusieurs milliers)	Quantité très importante (plusieurs millions)
Quantitatif/Qualitatif	Données purement quantitatives	Données qualitatives	Combinaison légère de données qualitatives et quantitatives (e.g. tout est quantitatif, sauf une donnée)	Combinaison importante de données qualitatives et quantitatives (e.g. tout est quantitatif, sauf quelques données)	Combinaison très importante de données qualitatives et quantitatives (e.g. données de toute nature)
Incertitudes	Aucune	Faible incertitude (e.g. un peu d'aléatoire sur les données)	Incertitudes moyennes (e.g. variables/données stochastiques suivant des lois connues)	Fortes incertitudes (e.g. variables/données stochastiques suivant des lois non connues)	Très fortes incertitudes (e.g. beaucoup d'incertitudes de toute nature et en interaction)
Complétudes /Disponibilité	Complet et disponible	Demande un effort limité pour acquérir l'information (e.g. recherche bibliographique)	Demande un effort modéré pour acquérir l'information (e.g. interview d'experts)	Demande un effort important pour acquérir l'information (e.g. expérimentations à mener pour obtenir les données)	Très incomplet ou indisponibles (e.g. données confidentielles, champ scientifique non encore investigué)

Il est à noter que cette table (tout comme les **Table 1.2** et **1.3** respectivement dédiées au système et à la décision) a été construite sur la base de mon expertise ; les valeurs quantitatives (e.g. quantité de données) ont, avant tout, pour enjeu de donner des ordres de grandeur. Ces différents éléments de complexité gnoséologique se retrouvent au niveau des systèmes étudiés. La **Figure 1.2** illustre, pour les dix systèmes considérés, les éléments de complexité.

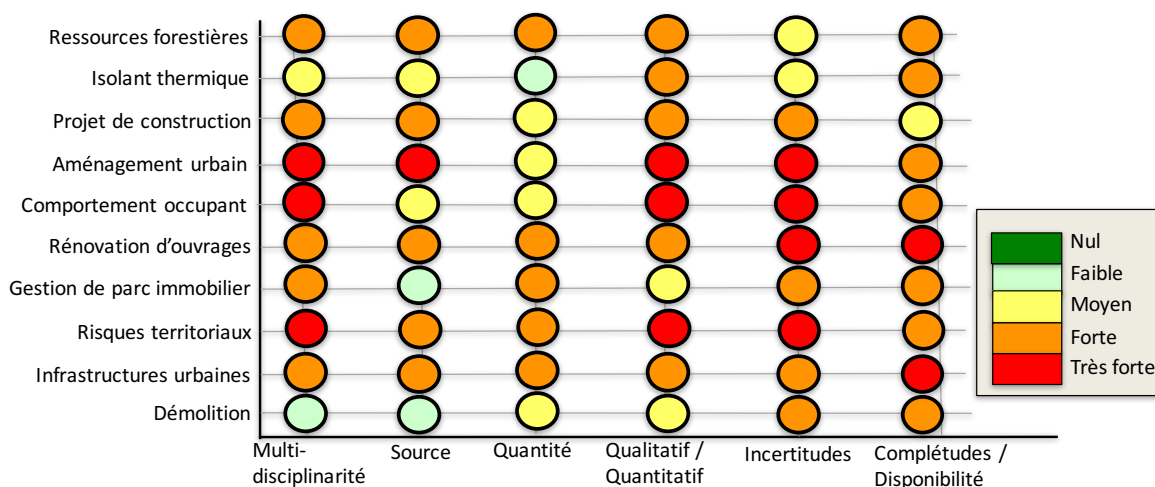


Fig 1.2. Cartographie de la complexité gnoséologique

Au niveau des systèmes étudiés, les différents indicateurs de complexité varient de *Faible* à *Très forte*, avec une valeur médiane à *Forte*. Certains domaines, comme l'aménagement urbain, induisent une forte complexité gnoséologique. Cela est dû à la nature très multidisciplinaire (géographie, génie civil, sociologie...) et multi-acteurs (services techniques, citoyens, gestionnaires, politiques...) de ce domaine. Chaque acteur a une connaissance et une vision du système qui lui est propre, se traduisant par des données hétérogènes et pouvant être difficiles à collecter (disponibilité des acteurs, données incertaines...). Même pour des domaines présentant moins de complexité comme la démolition, il existe des éléments de complexité. Ce domaine est moins pluridisciplinaire, convoquant surtout des champs techniques (génie civil, sciences de l'environnement) et économiques. Cependant, il doit faire face à des connaissances parcellaires (connaissances imparfaites des ouvrages à démolir, du devenir des déchets...) induisant une certaine complexité. Il faudra donc prendre en compte cette complexité gnoséologique dans les modèles de connaissances ou intégrant de la connaissance.

3.2. Complexité systémique

La complexité est une caractéristique inhérente à certains systèmes. Plusieurs définitions ou manières de qualifier cette complexité systémique existent dans la littérature, mais il y a tout de même convergence sur différents points. Ainsi, on affecte au système l'attribut de complexité lorsque l'on a (De Rosnay 1975) : (a) un grand nombre d'éléments variés, (b) différents niveaux de description (hiérarchiques) de ces éléments (microscopique, mésoscopique...), (c) un grand nombre de liaisons variées entre ces éléments, et (d) la non linéarité des interactions entre ces éléments. A ces éléments, plusieurs auteurs (Xiao, Zhang et al. 2015) en ajoutent deux autres : (a) la rétroaction et (b) l'émergence. Une rétroaction (*feedback* en anglais) est un mécanisme permettant de renvoyer en entrée du système des informations dépendantes des sorties ; par rapport à une simple interaction, elle induit une dissymétrie entre entrée et sortie (Cadoz 2006). Cela est à rapprocher des capacités d'adaptation et de régulation (Simon 1962). Par exemple, dans les projets de construction, lorsqu'un retard est constaté sur l'avancement du projet, le responsable du projet peut mobiliser des moyens supplémentaires afin de combler ce retard. De la même façon, un système de régulation peut influencer la puissance de chauffage pour compenser une réduction de la température. L'émergence définit l'apparition à un niveau macro d'une nouvelle propriété générée par des interactions à un niveau micro. Chalmers (2002) distingue l'émergence forte (*strong emergence*) de l'émergence faible (*weak emergence*) par la déductibilité de la propriété via l'examen des entités (et des interactions) du niveau micro. Ainsi, dans le cas d'une émergence faible, il serait possible de déduire la propriété émergente, mais pas pour l'émergence forte. La distinction entre les deux, bien que philosophiquement valide, me paraît difficilement applicable aux systèmes réels, pour lesquels la connaissance imparfaite rend la déductibilité des propriétés difficile à affirmer ou à infirmer ; une propriété émergente pourrait être déductible en ayant une connaissance parfaite du système au niveau micro, mais non en connaissance imparfaite. La notion d'émergence est à rapprocher de la notion d'auto-organisation. Par exemple, en se regroupant, des personnes peuvent former un groupe qui aura un comportement différent de la « somme » des comportements individuels (e.g. l'expérience de Asch sur le conformisme social, démontrant l'effet « mouton de Panurge » dans les décisions de groupe (Asch 1951)). Comme pour la complexité gnoséologique, j'ai proposé une grille d'évaluation des indicateurs de complexité systémique (**Table 1.2**).

Tab 1.2. Echelle d'évaluation des indicateurs de complexité systémique

Indicateur	Niveau de complexité				
	Nul	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
Variété des composants	Tous les composants sont identiques	Les composants sont de natures très proches (e.g. que des éléments de structure)	Les composants sont de natures relativement proches (e.g. tous les éléments d'un bâtiment)	Les composants sont de natures variées (e.g. composants matériels et humains)	Les composants sont de nature très variée (e.g. éléments matériels, abstrait et humain)
Niveau hiérarchique	Un seul niveau	Deux niveaux (micro/macro)	Trois niveaux (micro/meso/macro)	Quatre à dix niveaux considérés	Plus de dix niveaux hiérarchiques
Variété des liaisons	Un seul type de liaison	Deux relations différentes, mais de type très proche (e.g. relation d'héritage et méréologique)	Plusieurs relations différentes, mais de types proches (e.g. relation d'héritage et d'influence)	Plusieurs relations différentes, mais de types variés (e.g. héritage, chronologique)	Nombreuses relations très variées (e.g. héritage, chronologique, interpersonnelles...)
Non linéarité	Système complètement linéaire	Non-linéarité très faible (e.g. une seule fonction non linéaire, mais mathématiquement formalisable)	Non-linéarité modérée (plusieurs fonctions non-linéaires mais mathématiquement formalisables)	Non-linéarité assez forte (au moins une fonction non formalisable par des équations mathématiques)	Non-linéarité très forte (nombreuses fonctions non mathématiquement formalisables)

Rétroactions	Aucune rétroaction	Rétroactions modifiant très peu le fonctionnement du système	Rétroactions modifiant de façon légère le fonctionnement du système	Rétroactions modifiant de façon sensible le fonctionnement du système	Nombreuses rétroactions modifiant de façon très importante le fonctionnement du système
Émergence	Aucune émergence	Très faible émergence (1 nouvelle propriété apparaissant)	Faible émergence (quelques nouvelles propriétés ne modifiant pas beaucoup le fonctionnement du système)	Émergence modérée (quelques nouvelles propriétés modifiant sensiblement le fonctionnement du système)	Émergence forte (nouveaux comportements collectifs, auto-organisation...)
Incertitudes	Aucune	Faible incertitude (e.g. un peu d'aléatoire sur les données)	Incertitudes moyennes (e.g. variables/données stochastiques suivant des lois connues)	Fortes incertitudes (e.g. variables/données stochastiques suivant des lois non connues)	Très fortes incertitudes (e.g. beaucoup d'incertitudes de toute nature et en interactions)

J'ai croisé cette grille avec les dix systèmes étudiés dans la **Figure 1.3**.

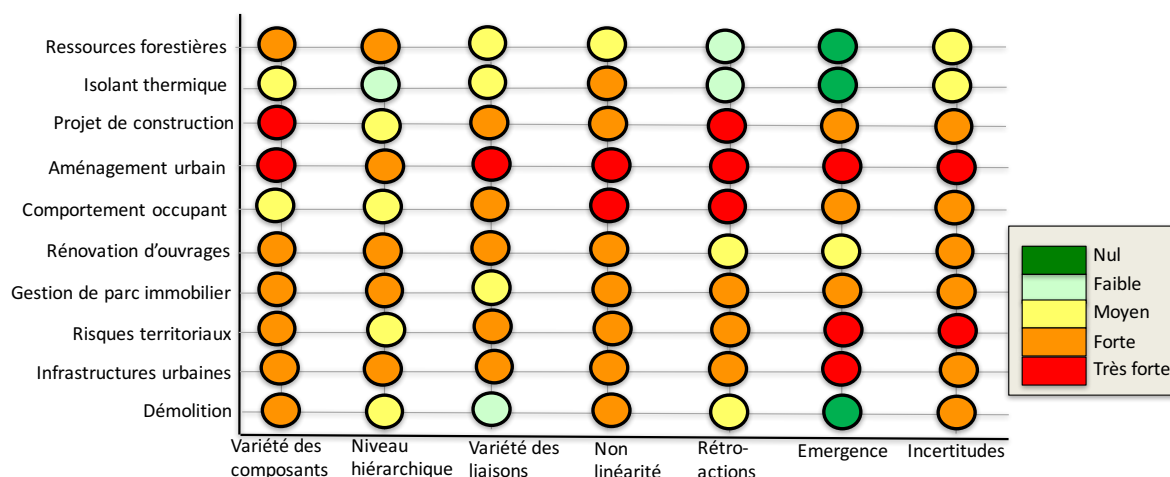


Fig 1.3. Cartographie de la complexité systémique

Comme pour la complexité gnoséologique, les systèmes étudiés peuvent être qualifiés de complexes ; ils ont tous un ou plusieurs indicateurs de complexité au moins à un niveau *Fort*, avec une médiane au niveau *Fort*. Le système présentant ici la plus faible complexité est celui de la gestion de la ressource forestière pour les produits de construction. Cependant, même pour ce domaine, il est nécessaire de prendre en compte des composants variés se déclinant sur plusieurs niveaux hiérarchiques. Par exemple, on a la grume de bois dans laquelle sera extraite des planches permettant de faire des produits de construction en bois, l'arbre dont la grume est extraite, la parcelle, la forêt... Il est à noter que le système forestier, qui intègre la faune, la flore et l'environnement humain, est lui un système très complexe (niveau *Très fort* sur la plupart des indicateurs). Ce qui réduit ici quelque peu la complexité est le positionnement de la problématique tournée vers les produits de construction. Comme pour la complexité gnoséologique, l'aménagement urbain ressort comme un domaine particulièrement complexe, où se mêlent un grand nombre d'acteurs ayant des interactions complexes. Comme tout système intégrant de nombreux humains, il est confronté à de fortes rétroactions, de l'émergence et de l'auto-organisation rendant son étude d'autant plus complexe. En résumé, il me sera indispensable de prendre en compte la complexité pour l'ensemble des systèmes que j'aborderai.

3.3. Complexité décisionnelle

La complexité décisionnelle peut se définir au travers de différentes caractéristiques (Keeney 1982) : (a) des objectifs ou des critères multiples et intangibles, (b) une difficulté à identifier les bonnes options (i.e. solutions possibles), (c) des conséquences durables et ayant un impact sur de nombreux groupes, (d) des incertitudes importantes, (d) un contexte multidisciplinaire, (e) plusieurs décideurs et (f) des interactions entre décisions. La grille d'évaluation des indicateurs de complexité décisionnelle est présentée en **Table 1.3**.

Tab 1.3. Echelle d'évaluation des indicateurs de complexité décisionnelle

Indicateur	Niveau de complexité				
	Nul	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
Objectifs ou critères	Monocritère/ Monobjectif	De 2 à 5 objectifs/critères	De 6 à 10 objectifs/critères	De 11 à 30 objectifs/critères	Plus de 30 critères/objectifs
Options	Quelques options	Des dizaines d'options	Des centaines d'options	Des milliers d'options	Plusieurs dizaines de milliers d'options, voire une infinité
Conséquences	Conséquences très faibles (e.g. choix d'un restaurant)	Conséquences assez faibles et peu pérennes (e.g. choix impactant simplement le confort ou de faibles montants monétaires)	Conséquences modérées (e.g. choix impactant la qualité de vie ou des montants monétaires assez importants)	Conséquences fortes et/ou très pérennes (e.g. risque de blessures, impact financier très importants)	Conséquences très fortes et/ou non réversibles (e.g. vies humaines en jeu)
Incertitudes	Aucune	Faible incertitude (e.g. un peu d'aléatoire sur les données)	Incertaines moyennes (e.g. variables/données stochastiques)	Fortes incertitudes (e.g. variables/données stochastiques avec des lois de variations non connu)	Très fortes incertitudes (e.g. beaucoup d'incertitudes de toute nature et en interactions)
Multi- disciplinarité	Un seul domaine considéré	Plusieurs domaines, mais proches (e.g. mécanique du solide et des fluides)	Multidisciplinarité peu importante (e.g. ingénierie et mathématique)	Multidisciplinarité assez importante (e.g. sociologie et ingénierie)	Forte multidisciplinarité (e.g. linguistique, mathématiques et médecine)
Décideurs	Un seul décideur	Moins de 5 décideurs	Moins de 20 décideurs	Moins de 100 décideurs	Très grand nombre de décideurs (e.g. élections présidentielles)
Interactions	Décisions indépendantes	Faible dépendance	Dépendance modérée	Forte dépendance	Très fortes interactions entre diverses situations de prises de décision

Le **Figure 1.4** expose, à la lumière des critères de complexité décisionnelle énoncés, en quoi les systèmes étudiés dans ce manuscrit rentrent dans le champ de la complexité.

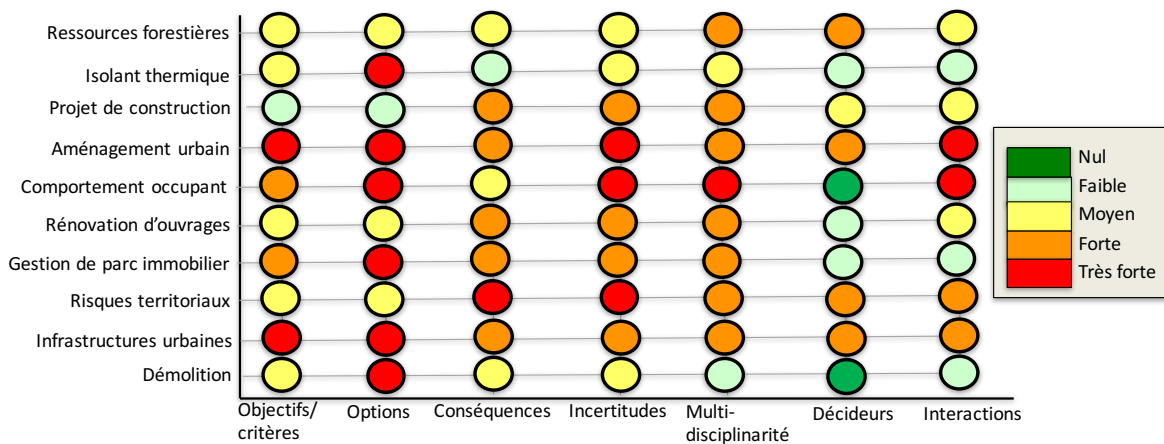


Fig 1.4. Cartographie de la complexité décisionnelle

Le constat est le même que pour les deux premiers niveaux de complexité (gnoséologique et systémique), les systèmes abordés sont complexes en termes de décision (médiane à *Forte*). Si l'on prend, par exemple, la problématique de la conception d'un isolant thermique bio-sourcé, il sera nécessaire de pouvoir prendre en compte un très grand nombre d'options. Effectivement, les caractéristiques de l'isolant et ses performances vis-à-vis d'objectifs définis (minimiser son énergie grise, maximiser sa résistance thermique, etc.) dépendent d'un grand nombre de variables (type de fibre végétale, finesse des fibres, compression appliquée lors de la fabrication, etc.). Il ne sera pas possible, dans un temps raisonnable, de construire l'ensemble des options possibles pour les évaluer et les hiérarchiser, ce qui est un marqueur de la complexité. De plus, il existe des incertitudes importantes quant à la capacité des isolants à répondre aux objectifs. La présence de la complexité décisionnelle rend les décisions plus difficiles à prendre pour le(s) décideur(s), justifiant la nécessité de faire appel à un/des modèle(s) décisionnel(s) pour supporter l'aide à la décision.

4. Incertitudes et complexité

4.1. Différents types d'incertitudes

La notion d'incertitude est primordiale pour qualifier la complexité ; elle est présente aux trois niveaux (connaissance, système et décision). On peut distinguer les incertitudes *épistémiques* des incertitudes *stochastiques* (appelées aussi incertitudes *aléatoires*) (Li, Lu et al. 2016). L'incertitude stochastique est due à la nature aléatoire des événements ; par exemple, le résultat du tirage d'un dé à 6 faces obéit à une loi de probabilité simple. Cette incertitude est irréductible et elle est généralement traitée avec la théorie des probabilités (Mullins, Ling et al. 2016). L'incertitude épistémique résulte du manque de connaissances sur le système. Elle est en théorie réductible par une démarche d'investigation ; cependant, le coût de cette investigation peut être jugé trop lourd au regard de l'intérêt de la connaissance. Ces deux types d'incertitudes diffèrent tout à la fois ontologiquement, en termes de représentation et au niveau de leur perception par les humains. Généralement, l'humain est averse (*risk adverse*) aux incertitudes ou à leurs conséquences : il privilégiera entre deux solutions, par ailleurs égales, la solution sans incertitude, à la solution avec de l'incertitude (Taillandier and Breyse 2016). Toutefois, sa perception des deux types d'incertitude n'est pas forcément la même, formant une double aversion (aux incertitudes stochastiques et épistémiques) (Ellsberg 1961). Le traitement de ces incertitudes nécessitera l'usage de formalismes (i.e. modèle) différents pour leur prise en compte (Dubois and Prade 2010) ; e.g. probabilité pour les incertitudes stochastiques et logique floue pour les incertitudes épistémiques.

4.2. Incertitudes dans la prise de décision

L'acte de décider est nécessairement teinté d'incertitudes. Les conséquences des décisions sont forcément postérieures à la situation de choix et n'ayant nul moyen de prédire exactement (i.e. de manière parfaite et exacte) le futur, les conséquences des choix sont forcément non parfaitement connues. Evidemment, en faisant un choix, on va rendre effectif l'un des itinéraires possibles permettant de vivre les conséquences, mais les autres chemins resteront définitivement teintés d'incertitudes. L'évaluation des conséquences *a priori* est tout à la fois touchée par les incertitudes liées à la connaissance, par celles liées au système, par les incertitudes de modèles et par les erreurs de perception de la désirabilité des options. Les différents types d'incertitudes seront pris en compte dans les modèles au travers de différents formalismes (probabiliste, logique floue...) et/ou par des analyses sur les modèles (sensibilité et robustesse) abordées au **Chapitre 5 partie 2.1**. L'aspect désirabilité a été largement abordé en psychologie sociale ; des travaux ont, par exemple, porté sur la différence entre les sentiments que l'on pense ressentir face à une situation future et ceux que l'on va réellement ressentir (Gilbert 2006, Verner-Filion, Lafrenière et al. 2012), traduisant un écart entre désirabilité et satisfaction. Bien que les travaux en aide à la décision que j'exposerai dans mon manuscrit (par exemple dans le **Chapitre 3 partie 2**) ne formalisent pas cet écart, il sera pour autant intégré au niveau de l'interprétation des modèles et de leurs résultats.

5. Modèle

Nous avons vu dans la partie précédente que le domaine du génie civil était largement confronté à la complexité. La complexité représente autant un défi qu'un enjeu de recherche auxquels mes travaux vont être confrontés. Pour cela, je ferai appel à la notion de modèle qui sera au centre de ce travail. Le modèle n'est pourtant pas une finalité, mais un objet transitoire liant une problématique qui doit être construite en amorce du modèle (voir **partie 6.2**), à sa réponse. Parfois, il peut être utilisé directement, comme source de discussion, réflexion, compréhension, parfois, c'est au travers de son implémentation (e.g. simulation, jeu sérieux...) qu'il cherchera à répondre au problème posé (voir **Chapitre 5 partie 2.2**). Dans cette partie, j'explicitai ma vision du modèle et la façon dont je le positionne dans mon travail.

5.1. Définition et positionnement

L'enjeu principal de ce travail est de prendre en compte explicitement la complexité. Une première approche consiste à la réduire ; c'est l'approche analytique cartésienne classique (réductionnisme) qui cherche à décomposer le problème en sous-problèmes, jusqu'à arriver à un niveau où les problèmes peuvent être résolus. Cela sous-entend de : (a) décomposer en éléments simples, (b) faire des hypothèses d'indépendances, (c) considérer des valeurs représentatives (moyennes)... Si ces approches ont permis de faire avancer les sciences pendant plusieurs siècles, elles se heurtent aussi à leurs limites, les rendant peu utiles aux sciences modernes (Juignet 2015). Les phénomènes d'émergence qui sont vraiment essentiels dans les systèmes complexes ne peuvent pas être pris en compte par cette démarche. Or le domaine du génie civil, dans la vision défendue dans ce travail, est riche en émergence. Par exemple, un bâtiment est bâtiment par l'ensemble des éléments qui le composent et leurs interactions ; les caractéristiques de l'entité bâtiment sont tout autant la résultante des éléments qui le composent que de leurs interactions (e.g. liaison mécanique, pont thermique, etc.). Les propriétés (e.g. stabilité structurelle, performance thermique) et les fonctions d'un bâtiment (assurer le confort des occupants, supporter une activité, etc.) s'expriment à différentes échelles et à travers différents éléments en interaction. La complexité est encore plus importante lorsque l'on intègre à ce système, l'humain (e.g. l'occupant du bâtiment) ; cela ajoute des comportements de type rétroaction et auto-organisation, impossible à traiter par des approches purement analytiques.

Il nous faut donc trouver une autre voie... Pour cela je passerai par l'approche systémique (Le Moigne 1977), telle qu'évoquée dans la **partie 1** de ce chapitre, et je poserai le *modèle* au centre de l'approche. Le terme de *modèle* est ambigu car utilisé par toutes les sciences (y compris les sciences humaines et les mathématiques), mais avec des visions pouvant être différentes. En mécanique, le modèle renverra souvent au modèle numérique (par éléments discrets, éléments finis...). En sociologie, où le mot ne sera pas toujours utilisé, il apparaîtra comme un cadre descriptif de systèmes sociaux. Ma vision du modèle a pour vocation à regrouper l'ensemble des types de modèles (conceptuel, physique, mathématique...). Dans ce travail, un modèle est une formalisation et une abstraction du système en un ensemble de concepts en relation et de lois (équation, arbre de décision, table...). Cela peut être des concepts liés par des relations épistémiques, mais aussi des attributs reliés par des fonctions mathématiques. La **Figure 1.5** est une illustration de deux exemples de modèle (conceptuel pour **1.5.a** et mathématique pour **1.5.b**).

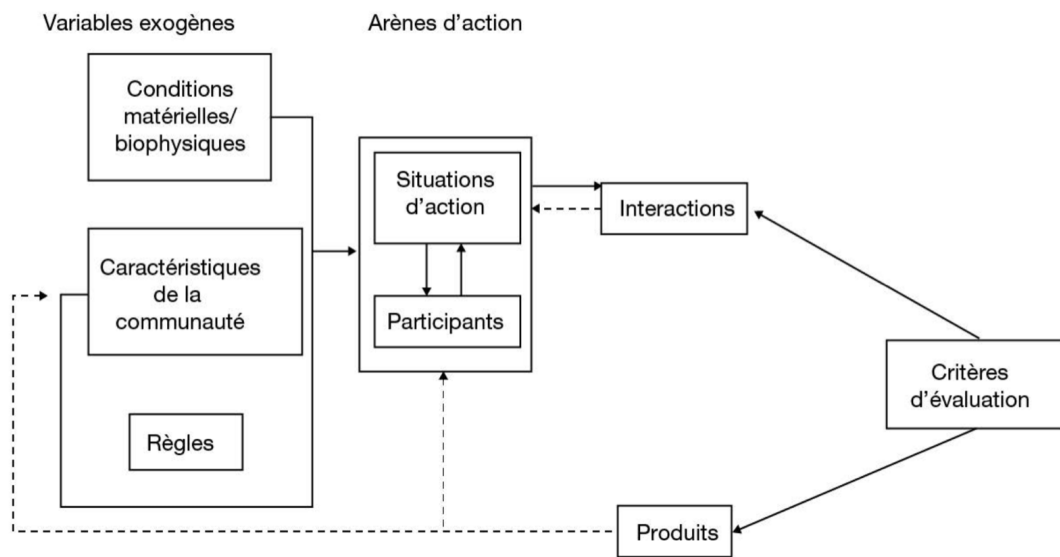


Fig 1.5.a. Un cadre d'analyse institutionnelle (Antona and Bousquet 2017) d'après (Ostrom 2005)

The mathematical formulation for crack growth rate can be expressed in terms of the governing variables as below.

$$\frac{da}{dN} = \Phi \left(\Delta G_I, G_{I_{max}}, \frac{d_{max}}{D}, \sigma_t, U_C, a \right) \quad (5)$$

Considering fatigue fracture energy U_C and tensile strength σ_t to have physically independent dimensions and applying Buckingham II theorem to Eq. (5), crack growth rate can be expressed in terms of non-dimensional parameters as given below,

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{U_C}{\sigma_t} \right) \Phi_1 \left(\frac{\Delta G_I}{U_C}, \frac{G_{I_{max}}}{U_C}, a \frac{\sigma_t}{U_C}, \frac{d_{max}}{D} \right) \quad (6)$$

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{U_C}{\sigma_t} \right) \Phi_1 (\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4) \quad (7)$$

where, the non-dimensional quantities are,

$$\Pi_1 = \frac{\Delta G_I}{U_C}, \quad \Pi_2 = \frac{G_{I_{max}}}{U_C}, \quad \Pi_3 = a \frac{\sigma_t}{U_C}, \quad \Pi_4 = \frac{d_{max}}{D} \quad (8)$$

Fig 1.5.b. Un extrait de modèle de propagation des fissures dans le béton sous charge de fatigue (Bhowmik and Ray 2018)

Une dernière ambiguïté est à lever ; j'ai placé mon approche dans le cadre de la systémique. Or, il existe des modèles se revendiquant directement de cette approche (e.g. MADS (Perrin, Muñoz-Giraldo et al. 2012), SyRes (Lundberg and Johansson 2015)) ; ces modèles seront qualifiés ici de *modèle systémique*. Ma vision du modèle se veut large et ouverte : les modèles ouvertement systémiques en font bien évidemment partie mais n'en constituent pas la totalité. D'autres approches (voir **partie 5.3**) seront aussi utilisées dans mes travaux (e.g. jeux sérieux, graphes probabilistes, modèle Agent, etc.), car elles permettent aussi, à leur façon, d'appréhender le système dans ses complexités.

5.2. Une ambition holistique mineure

Le modèle est une représentation portée par ses propres hypothèses et règles ; c'est une vision nécessairement simplifiée du système, même si l'on cherchera tout au long de ce travail à élaborer des modèles les plus complets possibles : on parlera de modèle *holistique*. La pensée holiste est en opposition à la pensée réductionniste : pour la première, le tout est plus que la totalité des composants, tandis que pour la seconde le tout est équivalent à la totalité des composants. Toutefois, ce terme est porteur d'ambiguïté, car il existe plusieurs façons de le voir. Par exemple, Morin (2004) livre une critique de l'holisme qui "*tendrait à diluer chaque élément dans une globalité molle, empêchant de penser précisément le distinct, qui efface la pluralité et recouvre les différences d'une vision unitaire et uniforme, ce qui peut rendre l'action imprécise et conduire à l'impuissance*". Cependant, cette critique s'entend en pensant l'holisme dans un cadre idéalisé où l'on chercherait à capter l'ensemble des phénomènes, à viser la complétude. Je qualifie cette approche d'*holisme majeur*.

Dans ma vision du modèle, qui n'est qu'une formalisation du système, qui, lui-même, est une abstraction du monde, l'approche holistique ne prétend pas modéliser l'ensemble des éléments composant le monde, mais essayer d'être riche en termes de variété de domaines et de problématiques abordés. Cette approche (*holisme mineur*), aussi appelé *pragmatic holism* par Simon (1962) permet de lier ambition et opérationnalité. Le modèle holistique, héritant de cet holisme mineur ne vise pas la complétude (impossible à obtenir) mais une vision *multi* -disciplinaire, -échelle, -dimensionnelle... Cela permet, notamment dans une situation de prise de décision, d'éviter les reports d'impacts et les conséquences indirectes. Sans cette vision large, on peut par exemple prendre une décision intéressante vis-à-vis de certains critères ou acteurs, mais très négatives pour d'autres ; e.g. choisir une solution de rénovation de bâtiment peu onéreuse et efficace énergétiquement, mais dégradant la qualité de l'air intérieur et peu recyclable. Toutefois, cet holisme, construit sur un compromis entre la capacité d'un modèle à reproduire finement un système et la complexité, peut être difficile à cerner ; il renvoie à la définition du périmètre du système sur laquelle je reviendrai dans la **partie 6.2**.

5.3. Différents niveaux d'abstraction

Il existe plusieurs niveaux d'abstraction et de généralité pour un modèle. J'appelle *modèle générique* un modèle d'un niveau de formalisme et de généralité élevé. Un modèle générique est transversal à de nombreux systèmes. Un modèle pourra s'appuyer sur un modèle générique ; il prendra alors ses règles et sa structure en l'appliquant à un système spécifique. Cette distinction entre modèle générique et modèle se veut flexible, laissant de la porosité entre les deux catégories. Il n'existe pas de taxonomie stricte : un modèle comme la RBS que je présenterai dans le **Chapitre 2 partie 2**, est utilisable pour plusieurs systèmes différents, mais seulement dans le cadre de la gestion des risques dans les projets. Il se positionne donc à un niveau intermédiaire, pouvant ou non être considéré comme générique. Loin d'aborder cette question avec un regard dogmatique, je préfère laisser à chacun le soin de fixer sa frontière. L'essentiel est avant tout pour moi, de mettre en lumière les différents niveaux de généralité.

Dans le cadre de ce travail, un *paradigme* est un ensemble de modèles génériques empruntant une orientation ou une philosophie commune. Par exemple, les modèles systémiques évoqués en **partie 5.1** s'intègrent dans un même paradigme. Il en va de même pour les modèles multi-agent et les automates cellulaires qui partagent des points communs (émergence par interactions entre composants élémentaires) tout en ayant leur propre spécificité (individualisation des agents, lien à leur environnement) (Ferber 1995).

Si le modèle générique et le paradigme s'inscrivent dans un niveau d'abstraction élevé, c'est en revanche l'inverse pour le modèle instancié (plus simplement appelé *instance* dans la suite du texte). Une instance est une spécification du modèle à un cas donné. Prenons un exemple pour illustrer ces concepts : l'approche multi-agent est un modèle générique, un modèle Agent spécifique (par exemple un modèle classique Proie/Prédateur) est un modèle porté par le modèle générique multi-agent et son application à la simulation d'un territoire spécifique (par exemple le Sud-Aveyron) avec des proies et prédateurs identifiés (moutons et loups) est une instance.

5.4. Différents types de modèle

Les questions posées par les différents systèmes (i.e. problématique) sont nombreuses et aucun modèle générique ne saurait répondre à toutes. Il est nécessaire de faire appel à différents types de modèle générique. S'il n'existe pas de typologie claire et partagée pour classifier les différents types de modèle générique, on pourra, à défaut, les positionner vis-à-vis des trois domaines : système, connaissance et décision. Bien évidemment, cette taxonomie, comme toutes celles proposées dans ce document, est imparfaite, subjective, mais fonctionnelle : certains modèles génériques peuvent se situer dans plusieurs catégories ou être à leurs interfaces. De plus, j'assume une certaine porosité et flexibilité entre ces catégories de modèle.

Modèle pour simuler le système. L'un des enjeux de ce travail est de proposer à des acteurs une meilleure compréhension d'un système ou une exploration de scénarios vis-à-vis de celui-ci. Cela passe par des modèles permettant de simuler le fonctionnement du système.

Une des difficultés consiste en la modélisation de l'humain et notamment de sa capacité à faire des choix, à prendre des décisions. Il existe plusieurs façons d'aborder la modélisation de l'humain. On peut en distinguer cinq qui peuvent se combiner au sein d'un même modèle : (a) boîte noire, (b) modèle réactif, (c) modèle cognitif, (d) modèle cognitif évolué et (e) modèle social. Dans les modèles *boîte noire*, on ne s'intéresse pas au processus interne de décision, mais juste à leurs effets. On considère alors l'humain comme une boîte noire, recevant des *inputs* (données, information et connaissance) et les transformant en *outputs* (décision, action). On trouvera dans cette famille par exemple les réseaux de neurones (Zhang, Vanderhaegen et al. 2006). Les *modèles réactifs* sont des modèles d'intelligence artificielle de bas niveau. Ils modélisent l'humain au travers de processus de réaction à une situation ; cela s'apparente au *processus automatique* tel que décrit par (Schneider and Shiffrin 1977). Dans ces modèles, la réaction se fait vis-à-vis d'une situation immédiate ou parfois d'événements passés, mais sans projection dans le futur. C'est ce type de comportement, que l'on retrouvera par exemple dans les automates cellulaires (Ferber 1995). Les *modèles cognitifs* affinent les modèles réactifs en ajoutant aux humains modélisés des capacités de raisonnement, d'élaboration de stratégies à plus long-terme, d'apprentissage et/ou des émotions (*processus contrôlé* et *affectif* (Camerer, Loewenstein et al. 2005)). Par exemple, le modèle cognitif BDI (Belief, Desire, Intention) permet d'apporter à l'agent une capacité à se projeter dans le futur au travers d'intentions et de plans (Taillandier, Bourgeois et al. 2016). Les *modèles cognitifs évolués* cherchent à imiter l'humain jusque dans son fonctionnement (e.g. paradigme BICA -Biologically Inspired Cognitive Architectures- (Samsonovich 2012)). On retrouve dans cette catégorie, par exemple, des modèles d'intelligence artificielle visant à passer le test de Turing (Vorobiev and Samsonovich 2018) ou à être utilisés en

robotique pour la production de robots sociaux (Samsonovich 2013, Wiltshire, Warta et al. 2017). Je n'utilise pas de tels modèles dans mon travail, car ils induisent un très fort niveau de complexité et requièrent des puissances de calcul informatique très importantes, sans que cela se justifie par rapport aux systèmes abordés en génie civil ; ainsi, je me contenterai, au plus, de modèles cognitifs. Les *modèles sociaux* permettent de modéliser les relations entre les individus pour leur donner des capacités d'actions collectives. Comme cela a déjà été évoqué dans la **partie 3.2**, le comportement d'un groupe d'individus est plus complexe que la somme des comportements : il y a des effets propres au groupe (collaboration, effets leader et mouton, etc.). Il me sera nécessaire d'intégrer ces comportements dans les modèles pour simuler les systèmes impliquant plusieurs humains en relation.

Bien sûr, la complexité des systèmes en génie civil n'est pas due qu'à la présence d'humains. Un bâtiment, même sans considérer l'occupant est déjà complexe de par les multiples éléments qui le composent et interagissent. Certains modèles génériques permettent de simuler tout à la fois des systèmes sociaux et des systèmes techniques. Par exemple, le modèle Li-BIM (**Chapitre 3 partie 3**), est basé sur le modèle Agent et permet de simuler l'occupant et le bâtiment qui l'abrite. Cependant certaines dynamiques sont plus efficacement modélisées par des modèles physiques (e.g. flux thermique, chargement mécanique) que par des modèles d'intelligence artificielle. Pour cette raison, il sera parfois nécessaire de coupler différents types de modèles pour simuler de façon pertinente un système (voir **Chapitre 4 partie 5.2**).

Modèle pour connaître. Les modèles de connaissances ont pour objet l'acquisition, la formalisation et l'utilisation de la connaissance pour répondre à différents objectifs pouvant se combiner : faire comprendre et apprendre, identifier des défauts de connaissances, partager, pérenniser, etc. Cette connaissance peut avoir différentes sources, différentes natures, différents formats, différentes granularités et appartenir à de multiples champs disciplinaires. Il nous faudra ainsi pouvoir considérer cet ensemble parcellaire et hétérogène de connaissances et le structurer pour composer notre modèle.

On peut classer les modèles génériques de connaissances selon quatre niveaux d'interaction : (a) modèle statique, (b) modèle intégrant des inférences (ou la possibilité d'en faire), (c) modèle apprenant, (d) modèle interactif. Les modèles statiques proposent une simple représentation de la connaissance sans que l'on puisse la questionner par des inférences. On retrouve ce type de modèle par exemple dans les approches de type carte conceptuelle (e.g. *mind map* (Wette 2017) ou *argument map* (Dwyer, Hogan et al. 2010)). Les modèles de connaissances possédant des systèmes d'inférences peuvent être interrogés via des requêtes. Les inférences correspondent à des raisonnements faits automatiquement par la machine. On trouve dans cette catégorie, par exemple, les graphes conceptuels dont les inférences sont basées sur la logique du premier ordre (Chein and Mugnier 2009) ou les ontologies (Munir and Sheraz Anjum 2018). La troisième catégorie regroupe des modèles ayant la capacité d'apprendre par eux-mêmes à partir de données, d'informations ou de connaissances. Ils permettent ainsi de générer de nouvelles connaissances. On trouve, par exemple, dans cette catégorie des modèles utilisant de l'apprentissage automatique basé sur du *machine learning* (Policastro, Carvalho et al. 2006) ou du *deep learning* (Baldi, Sadowski et al. 2017). Les modèles interactifs sont des modèles de connaissances prévus pour être utilisés en interaction avec l'humain. Bien évidemment, les modèles avec inférence proposent déjà une interaction avec l'utilisateur (par le biais des requêtes), mais les modèles interactifs vont beaucoup plus loin dans l'interaction : ils ne peuvent se concevoir que dans le cadre de l'interaction entre l'humain et le modèle. On peut par exemple positionner dans cette catégorie les jeux sérieux, qui sont particulièrement efficaces pour sensibiliser, faire comprendre et apprendre (Sauvé, Renaud et al. 2007, Girard, Ecalle et al. 2013, Perrotta, Featherstone et al. 2013). Un exemple de jeu sérieux sera présenté dans le **Chapitre 2 partie 4**.

Il existe ainsi des modèles génériques dédiés spécifiquement à la modélisation de la connaissance. Ils peuvent être liés à un domaine spécifique (e.g. RBS, **Chapitre 2 partie 2**) ou être transversaux (e.g. jeu sérieux, **Chapitre 2 partie 4**), avoir différents objectifs et enjeux, être statiques ou dynamiques, permettre ou non de faire des inférences et des requêtes, être des objets transitoires ou avoir une finalité par rapport à la problématique, etc.

Modèle pour décider. Le champ de la décision répond à différents enjeux et fait appel à de nombreux modèles génériques. Ils peuvent être plus descriptifs (comprendre/reproduire la façon dont un humain prend une décision) ou prescriptifs (aider à prendre une décision), voire combiner les deux axes. De nombreuses disciplines se sont intéressées à la décision sous l'une ou l'autre forme ; par exemple les neurosciences cherchent à comprendre et imiter le fonctionnement du cerveau humain alors que la recherche opérationnelle cherche à aider le(s) décideur(s) à choisir la solution la plus adaptée pour lui(eux) dans un contexte donné. Si ces approches peuvent paraître bien distinctes, elles se nourrissent, en fait, l'une l'autre. Par exemple, le domaine de l'intelligence artificielle cherche à comprendre la façon dont fonctionne l'intelligence humaine (ou d'autres formes d'intelligence) afin de la simuler pour résoudre des problèmes (e.g. métaheuristique d'optimisation).

Cette pluralité des disciplines a fait émerger de nombreux modèles pour faire comprendre, faire réfléchir et aider à décider. Ces trois actions peuvent se voir comme un processus, où le modèle et la modélisation sont d'abord utilisés pour faire comprendre à un acteur ou à un groupe d'acteurs, tout ou une partie d'un système. Cette compréhension doit engendrer une réflexion chez l'acteur ; le modèle et la modélisation devraient contribuer à cette maturation au travers de différentes fonctionnalités et approches. Finalement, ces réflexions autour du modèle doivent aider les acteurs à prendre des décisions. Mon approche, basée tout à la fois sur la littérature scientifique, une volonté pragmatique et l'expérience de terrain, cherche à donner les éléments aux décideurs pour qu'ils prennent une bonne décision plutôt que de leur suggérer une solution (ici le terme solution est utilisée dans sa forme la plus générique et peut correspondre à une action ou un ensemble d'actions à réaliser, à une préférence exprimée, etc.). En effet, d'une part la plupart des décideurs ne souhaitent pas perdre leur prérogative de décision (Pfeffer and Sutton 2006), et il n'est généralement pas souhaitable de leur faire perdre : les décideurs doivent assumer la charge des conséquences des décisions, ils sont mandatés pour cela. D'autre part, une décision qui est construite par eux sera collectivement et globalement mieux acceptée ; cette participation à la construction de la décision renforce la coopération au sein du groupe de décideurs et améliore la perception des conséquences post-décision (Kleine, Langenbach et al. 2017, Liu, Rommel et al. 2018). Je développe ainsi des outils pour aider les acteurs à construire leur décision et non simplement pour leur suggérer une décision. Cette orientation qui s'intègre dans la recherche opérationnelle comportementale, va impacter le choix des paradigmes et des modèles génériques utilisés. Il existe un grand nombre de paradigmes pour aider à décider et encore plus de modèles génériques et aucun d'entre eux ne saurait être pertinent face à tous les problèmes décisionnels. Un enjeu sera donc de choisir le bon modèle générique en fonction du problème décisionnel et du contexte de la décision. La **partie 6.4** reviendra plus en détails sur ce point en exposant la démarche de modélisation des modèles décisionnels.

6. Modéliser

La vision du modèle, ici défendue, se veut tout à la fois flexible, générique et multiformes. C'est au travers du modèle que je pourrai répondre à mes objectifs de recherche. La construction des modèles, i.e. *la modélisation*, se pose donc en processus clef, qui constituera le cœur de mon travail.

6.1. Démarche de modélisation

Dans mon approche, la démarche de modélisation se doit d'être itérative et incrémentale (**Figure 1.6**), confrontant sans cesse le modèle avec le monde.

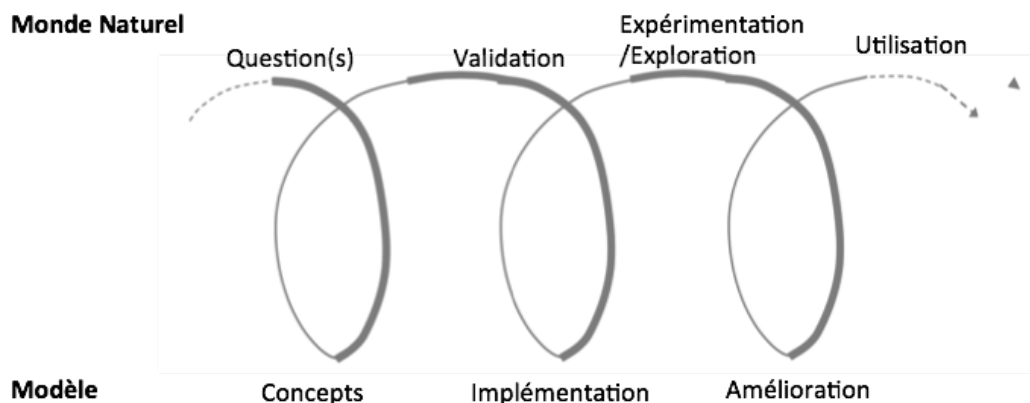


Fig 1.6. Cycle de modélisation, adapté de (Barreteau, Bousquet et al. 2010)

Cette interaction entre le modèle et le monde peut être plus ou moins forte, depuis un travail de modélisation en laboratoire avec validation par les parties prenantes (interaction faible), jusqu'à une démarche de modélisation participative (interaction forte) telle que prônée par le collectif ComMod (Barreteau, Antona et al. 2003).

Il est possible de tracer les principales étapes par lesquelles devraient passer toutes les démarches de modélisation (**Figure 1.7**), qui reprennent celles proposées dans la démarche ComMod (**Figure 1.6**).

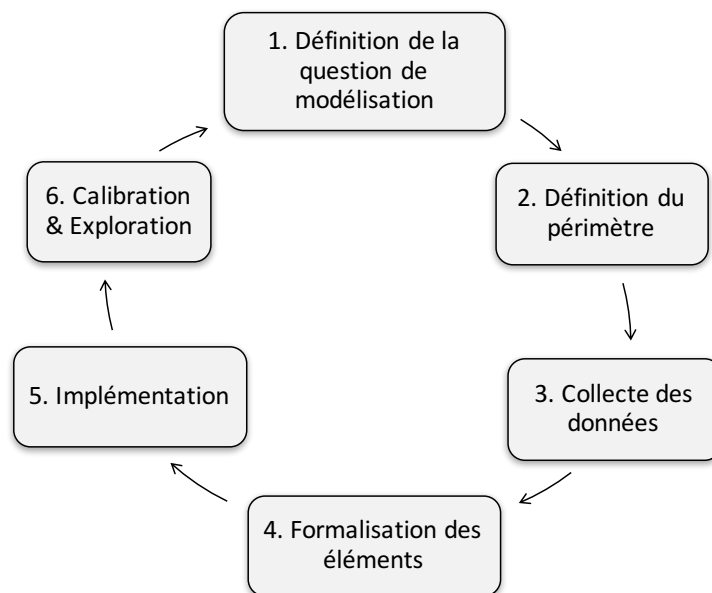


Fig 1.7. Étapes de la modélisation d'après (Bouquet, Chipeaux et al. 2014)

Définition de l'objectif de modélisation. La première étape consiste à poser explicitement la ou les questions auxquelles doit répondre la modélisation (i.e. poser la problématique du modèle). Cela doit trouver un écho sous la forme d'objectifs pour le modèle et/ou la modélisation (voir **Chapitre 5 partie 3**). Loin d'être triviale, cette opération guide toute la construction, en commençant par le choix du paradigme, du modèle générique, du périmètre et du niveau de finesse du modèle. Bien qu'il existe une multitude d'objectifs pour un modèle, nous nous focaliserons sur trois : faire comprendre, explorer et aider à décider. Ces objectifs sont énoncés ici dans des termes volontairement larges. Faire comprendre, par exemple, peut tout à la fois renvoyer à un acteur voulant mieux comprendre un

processus ou à un enjeu de formation d'étudiants. Les objectifs doivent bien sûr être mieux spécifiés pour faciliter la modélisation. Ce sera fait, ici, vis-à-vis des différents systèmes qui seront abordés dans les prochains chapitres, en amorce de la présentation de chacun des modèles développés. Un autre point important est qu'un même modèle peut chercher à répondre simultanément à plusieurs questions. Par exemple, le modèle ARD-Fourmi (**Chapitre 3 Partie 3**), cherche à aider un propriétaire à choisir un bouquet de travaux et dans le même temps à diffuser une culture pro-environnementale au sein d'un quartier. L'objectif pourra orienter vers un choix de modèle générique, même si, en soi il n'est pas suffisant : il existe généralement plusieurs (voire un grand nombre) de modèles génériques pouvant répondre à un même objectif.

Définition du périmètre de modélisation. La deuxième étape consiste à définir la frontière du modèle et à identifier les éléments (composants, relations, processus, dynamiques...) à prendre en compte dans le modèle. Cette étape ne peut s'entendre qu'au travers de l'objectif défini préalablement et au regard des connaissances disponibles sur le système. Dans le cas d'un système sur lequel de nombreuses connaissances sont disponibles, positionner cette frontière est plus aisé, sans pour autant être trivial. Ce positionnement est forcément subjectif (porté par des humains) et, en cas de points de vue contradictoires, il peut résulter d'un compromis pouvant être, là encore, délicat à trouver. Lorsque peu de connaissances sont disponibles sur le domaine ou qu'elles sont incomplètes, le positionnement de la frontière est d'autant plus difficile. Il peut alors être nécessaire de passer par une phase préalable de recueil de données et de formalisation des connaissances (**partie 6.2**). Toutefois, de façon générale, il est nécessaire d'adopter une approche pragmatique en sciences : il est nécessaire de se limiter (holisme mineur) et ainsi de faire des choix. On s'appuiera sur un principe de parcimonie : si on (le *Chercheur*) a de sérieuses raisons (avis d'expert, littérature scientifique, etc.) de penser qu'un élément n'a que peu d'intérêt (influence faible) vis à vis des objectifs de modélisation, on pourra l'exclure du modèle. Cependant, cette approche doit être équilibrée par un positionnement critique et flexible : si de nouveaux éléments sont apportés (e.g. nouvelle publication scientifique), il faut alors accepter de remettre en cause son positionnement et de faire évoluer le modèle.

Collecte des données. La troisième étape consiste à collecter les données, informations et connaissances nécessaires à la construction du modèle. Cette démarche est indispensable à tout modèle, mais peut bénéficier de l'utilisation de modèle de connaissances, qui peuvent servir de modèle transitoire ou être une finalité de la démarche de modélisation. **La partie 6.2** détaille plus spécifiquement la conception et construction de ces modèles. Bien évidemment, cette étape de collecte de données est fortement dépendante des deux premières étapes (définition des objectifs et du périmètre) qui conditionnent fortement la quantité de données à collecter et, en conséquence, la longueur de cette étape.

Formalisation du modèle. La quatrième étape consiste à formaliser le modèle, c'est à dire à lui donner une forme interprétable par un humain et/ou une machine. Cela peut passer par plusieurs niveaux de formalisation, en commençant par des modèles conceptuels abstraits, jusqu'à des modèles permettant de réaliser des simulations. La formalisation sera portée par un/des modèle(s) générique(s) retenu(s) en fonction des objectifs de modélisation et des données collectées dans l'étape précédente. Le choix du paradigme et du modèle générique est un élément clef de cette étape de modélisation. Il sera discuté tout au long des chapitres en fonction des objectifs de modélisation, et notamment dans le **Chapitre 3 partie 5.1**. Le modèle doit ensuite faire l'objet d'une validation de la part des acteurs, qui peuvent être des parties prenantes du système (e.g. approche ComMod) et/ou des experts extérieurs. Les étapes de conception et validation se répètent généralement plusieurs fois pour tendre vers un modèle validé qui peut être implémenté. La validation des modèles sera discutée au **Chapitre 2 partie 7.2**.

Implémentation. La cinquième étape consiste en l'implémentation du modèle. L'implémentation correspond à la traduction du modèle dans un format directement exploitable. On associe généralement cette étape à la traduction dans un langage informatique spécifique. Cependant, je préfère considérer l'implémentation dans un cadre plus large, intégrant aussi des éléments physiques. Par exemple, un modèle peut être implémenté sous la forme d'un jeu sérieux non informatisé (un exemple sera présenté dans le **Chapitre 2 partie 5**). Un modèle n'a pas toujours besoin d'être implémenté car la démarche de modélisation peut parfois elle-même répondre à la problématique. Il peut exister des écarts entre le modèle développé et son implémentation pour différentes raisons telles que la difficulté d'implémentation (aspect technique), les moyens et le temps disponibles, ou encore par exemple, la volonté d'optimiser des algorithmes. Il est important de bien documenter le modèle implémenté, que ce soit du code (guide d'utilisation, commentaires, etc.) ou un jeu (règles du jeu, livret d'accompagnement, etc.) et de garder trace des modifications et des différentes versions du modèle implémenté.

Le modèle implémenté doit être testé afin de vérifier la qualité et/ou l'intérêt des résultats produits. Cela conduit généralement à la proposition de points d'amélioration (voire même parfois à une refonte totale du modèle et/ou de son implémentation). On peut alors passer par une nouvelle étape d'implémentation ou de conception du modèle. Il est aussi possible, comme c'est le cas dans l'approche de développement Agile (Fowler and Highsmith 2001), de passer par des étapes de conception et implémentation itératives, incrémentales et adaptatives du modèle. Le modèle implémenté est alors testé progressivement par les utilisateurs finaux, et le modèle est complété au fil de l'eau, au fur et à mesure des tests. Ce type d'approche est particulièrement pertinent pour des modèles pouvant se décomposer en modules pouvant être testés/validés séparément, et permet d'avoir un retour des utilisateurs finaux sur l'outil en développement, afin d'orienter son élaboration et d'assurer son utilité et son utilisabilité (voir (Tricot, Plégat-Soutjis et al. 2003) pour une définition de ces termes).

Dans le cadre de ce travail, l'implémentation n'est pas une question centrale et la démarche d'implémentation ne sera pas exposée dans ce manuscrit. Cette phase, bien que secondaire dans mon travail, peut se révéler chronophage et porteuse de nombreux défis. Pour les différents modèles implémentés, je préciserai le type, la plateforme et/ou le langage d'implémentation et le cas échéant, le lien vers le modèle implémenté.

Calibration & Exploration. Après son implémentation, plusieurs éléments peuvent être encore nécessaires à son parfait fonctionnement et seront abordés dans une sixième étape. Un premier point est la calibration du modèle. Cela consiste à définir les valeurs de paramètres permettant au modèle implémenté de donner les résultats les plus pertinents possibles, i.e. les plus proches des observations faites sur le monde ou des valeurs attendues. Bien sûr cela nécessite de posséder des données d'observation du monde ou des valeurs attendues pour les résultats. Il existe différents types de méthodes pour réaliser cette calibration (plus ou moins automatisés). Si la calibration est optionnelle, l'exploration du modèle implémenté est en revanche toujours nécessaire. Cette exploration renvoie à l'analyse de sensibilité : le principe est de faire varier les paramètres et de voir leur impact sur le résultat des simulations. Le **Chapitre 5 partie 2.1** revient plus en détail sur ces étapes.

Le cycle de modélisation avec ses différentes étapes est souvent reconduit plusieurs fois dans une démarche de modélisation. Il n'est pas forcément nécessaire de réaliser l'ensemble des six étapes pour chaque nouveau cycle. Si par exemple durant l'étape de collecte de données, on s'aperçoit que le périmètre retenu est trop large, rendant l'étape de collecte de données impossible à réaliser dans des temps raisonnables, il peut être nécessaire directement de revoir le périmètre du modèle. Ainsi, la modélisation est une démarche dynamique, qui est déjà en elle-même porteuse de sens et de connaissances. Ce dernier point sera abordé dans la discussion au **Chapitre 5 partie 2.2**.

Utilisation. Lorsque l'on considère que le modèle ou son implémentation répond aux objectifs posés en amont, il peut être livré puis utilisé ; le "on" ici est volontairement large car il peut intégrer une grande variété d'acteurs selon les objectifs et la démarche retenue. Cette phase est postérieure à la modélisation en tant que et elle est particulièrement complexe à gérer pour le chercheur, puisqu'elle induit la question du rôle du chercheur dans l'après-projet. Cela interroge le positionnement du *Chercheur* vis-à-vis du terrain d'étude, remettant en avant la dualité objet/sujet, abordée dans la **partie 1**. Cet aspect du positionnement du *Chercheur* sera développé et discuté dans le **Chapitre 3** **partie 5.3**.

6.2. Démarche de modélisation de la connaissance

J'ai décrit dans la partie précédente la démarche générale de modélisation. Cette démarche s'applique bien sûr aussi aux modèles de connaissances qui peut être davantage spécifié en la croisant avec des approches de recueil et de formalisation de la connaissance. Comme je l'ai démontré dans la **partie 3.1**, la connaissance pour les différents systèmes abordés est complexe. Elle est hétérogène, multidisciplinaire, parcellaire... Aucun expert ne saurait avoir à lui-seul toute la connaissance liée à ces systèmes. Par ailleurs, la littérature scientifique ne permet pas de couvrir l'intégralité des connaissances : elle se montre souvent lacunaire en termes de connaissances sur les pratiques, sur le savoir-faire, etc. Acquérir de la connaissance passera par le recours à plusieurs sources (plusieurs experts, littérature scientifique, acteurs de terrain, etc.). La démarche que je propose est inspirée des travaux de Hobballah, Ndiaye et al. (2018) qui s'intéressent au recueil de la connaissance experte dans un contexte de complexité gnoséologique (**Figure 1.8**). Je vais passer en revue les différentes étapes de cette démarche.

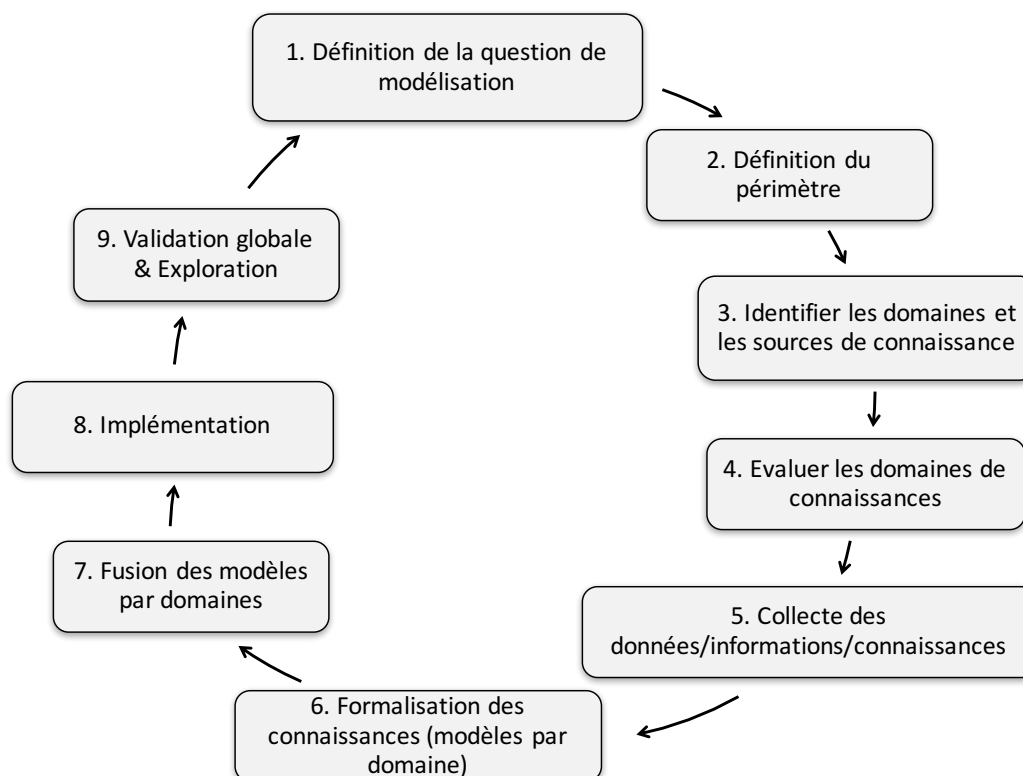


Fig 1.8. Étapes de modélisation de la connaissance, inspiré de (Hobballah, Ndiaye et al. 2018)

Définition d'un objectif. Dans toute démarche de modélisation la première étape consiste à définir l'objectif du modèle. C'est bien sûr aussi le cas des modèles de connaissances, du moins, classiquement. En effet, dans ce domaine, l'objectif peut se concevoir sans avoir une idée précise des résultats souhaités. D'une part, face à un domaine dont on ignore beaucoup, il peut être difficile de

fixer un objectif précis de modélisation de la connaissance. Un premier travail est alors d'acquérir de la connaissance pour préciser les objectifs et les enjeux de modélisation. On peut donc commencer par un objectif large et imprécis qui, au fur et à mesure du cycle (ou des cycles), sera précisé. Par ailleurs, certaines approches de recueil de connaissances se positionnent dans un cadre d'objectif plus libre dans lequel on essaie de tirer des connaissances à partir de données sans nécessairement connaître les connaissances recherchées (recherche non guidée) ; c'est notamment l'un des enjeux du *data mining* (voir **partie Collecte des données, information & connaissances**). Cependant, dans la perspective de mon travail, les objectifs seront fixés, qu'il s'agisse d'aider un/des décideur(s) à comprendre un système, à prendre des décisions, etc.

Définition du périmètre. Ce choix d'objectifs nous conduit à fixer le périmètre. Mieux l'objectif est défini, plus la recherche de connaissances peut être ciblée et précise afin de répondre de façon directe et claire à l'objectif. Ce dernier point peut être tout de même soumis à discussion : fixer son attention sur un champ précis peut parfois amener à écarter trop vite une connaissance semblant en dehors, mais dont les interactions avec d'autres connaissances peuvent faire sens au regard de l'objectif (e.g. une connaissance liée à l'environnement social pour comprendre le comportement d'occupants dans un bâtiment et leurs consommations énergétiques). Cette question est à remettre en perspective avec les réflexions sur le caractère holistique mineur des modèles considérés. Elle pourra trouver une réponse dans la nature itérative du recueil de connaissances et de la modélisation. On essaiera d'avancer pas à pas, en précisant à chaque cycle les contours de la connaissance d'intérêt. Bien évidemment, le modélisateur pourra se baser sur les connaissances déjà à sa disposition ; il peut en effet avoir déjà une expertise dans le domaine. Il faut ainsi identifier ce qui est connu, et avec quel niveau de maîtrise, de ce qui ne l'est pas. Cela peut permettre de dresser une carte de connaissances initiales (i.e. formaliser les connaissances *a priori*). Cela s'inscrit comme un premier pas de la démarche itérative et incrémentale, en tant que point initial du recueil de la connaissance.

Identifier les domaines et les sources de connaissance. Dans un cadre de connaissances multidisciplinaires et hétérogènes, il est souvent nécessaire de décomposer le corpus de connaissances en domaines correspondants à des champs établis (e.g. un procédé particulier, un matériau, un champ disciplinaire universitaire, etc.) pour lesquels il est possible de trouver des sources d'informations et de connaissances (expert, littérature scientifique).

Il existe différentes sources de connaissance que l'on peut répartir dans trois catégories : (a) la littérature scientifique et technique (que l'on peut extrapoler aux textes réglementaires, législatifs, etc.), ou à un savoir écrit en général, (b) le savoir expert, opérationnel, basé sur l'expérience personnelle et professionnelle, et enfin le (c) *big data* (bases de données disponibles sur le Web). La première source est classique en recherche ; elle en est même la base. Le travail bibliographique trace les fondations de toute recherche. Le savoir expert est basé sur la connaissance d'une personne ou d'un groupe de personnes. Il peut recouper la connaissance scientifique ou apporter de nouveaux éléments. Par exemple, si l'on pense à une pratique, à un geste, il y a peu de chance de le voir inscrit dans un cadre scientifique. De la même façon, les procédures et processus propres à une organisation peuvent être riches d'enseignements sans qu'ils ne soient accessibles en dehors d'un périmètre restreint. La troisième source (*big data*), la plus récente, est née l'émergence de la société de l'information et de la communication, et de la numérisation des données. En effet, la multiplication des outils de collecte automatique de données et la construction des bases de données ont conduit à d'énormes masses de données qui sont stockées dans des entrepôts (*on-line* ou *off-line*). Mais, si ces données brutes, en tant que telles, n'ont que peu de sens et de valeur, leur traitement peut produire de la connaissance, qui elle, a une grande valeur. C'est là, l'enjeu des méthodes de traitement du *big data*, qui au travers d'opérations sur les données (voir **partie Collecte des données, information & connaissances**) leur confère du sens.

Dans mon approche multidisciplinaire, il sera nécessaire d'explorer plusieurs domaines différents et de faire appel à plusieurs sources de données, informations, et connaissances. Ainsi, nous pourrions affecter à chaque domaine une ou plusieurs stratégies de recherche. Par exemple, pour du recueil expert, il faut définir en fonction des experts disponibles, leurs domaines de compétences. Connaissant l'ensemble de ces domaines de compétence, il est possible de faire une décomposition adéquate du champ investigué en différents domaines, permettant à chacun d'intervenir dans son propre champ de compétence. De la même façon, certains domaines bénéficient d'une large littérature scientifique. Pour ces domaines, il s'agira d'identifier les communautés de chercheurs et les revues pertinentes. La décomposition induit toujours la question de l'interface : certains domaines peuvent partiellement se recouper (e.g. la question du confort thermique s'intègre tout à la fois dans le domaine de la thermique du bâtiment et dans celui de la psychologie et du comportement de l'occupant). Par ailleurs, lors de la phase de l'agrégation des modèles par domaine (voir **partie Fusionner les modèles par domaine**), des trous de connaissances d'interface peuvent apparaître et dès lors un domaine particulier d'interface doit être exploré.

Evaluer les domaines de connaissance. Il est souvent utile de positionner les sous-domaines dans une matrice *Intérêt du domaine/difficulté à recueillir la connaissance* (Hoballah, Ndiaye et al. 2018). L'intérêt de la connaissance doit être évalué au regard de l'objectif et du périmètre. Si le sous-domaine est tout à la fois au cœur de l'objectif et du périmètre, il présentera un intérêt fort. À l'inverse, un domaine non indispensable pour atteindre l'objectif ou périphérique au champ investigué, présentera un intérêt faible. La difficulté du recueil peut dépendre du nombre de sources (nombre d'experts du domaine, nombre d'articles, etc.), de leur disponibilité, du temps nécessaire pour le recueil, etc. Il est évident qu'un sous-domaine présentant un fort intérêt et facile à recueillir, sera jugé comme prioritaire. C'est aux modélisateurs que revient le choix du compromis entre ces deux dimensions selon leurs préférences, le temps et les ressources disponibles, etc. Ils pourront ainsi déterminer les domaines à investiguer et les prioriser.

Collecte des données, informations & connaissances. Le recueil de connaissances peut se faire via différentes méthodes et approches d'élicitation. Sachant qu'une seule technique d'élicitation ne peut pas fonctionner dans toutes les situations (Hickey and Davis 2003), plusieurs méthodes d'acquisition des connaissances peuvent être envisagées en fonction du type de connaissances et de ses sources. Pour la littérature, les données et les informations peuvent provenir d'approche bibliographique classique au travers des bases de données d'articles scientifiques (e.g. WoS, Scopus, etc.), de thèses (e.g. TEL), de réseaux de chercheurs (e.g. *ResearchGate*), mais aussi de rapports de projets, de lectures de réglementation et de normes ou d'articles issus du milieu industriel. Le recueil bibliographique est classiquement fait manuellement en se basant sur les bases de ressources indexées et via le support de moteurs de recherche. Cependant, certains outils de recueil automatisé ou semi-automatisé peuvent assister le chercheur dans cette tâche. On peut recourir par exemple à un processus d'extraction de texte semi-automatique, permettant de collecter rapidement des données et informations (Buche, Dervaux et al. 2013). Pour acquérir des connaissances auprès d'experts, Davis, Dieste et al. (2006) recommandent le recours à un ensemble d'entretiens semi-dirigés. Les entretiens sont combinés à la modélisation des connaissances. Le modèle est alors utilisé comme support d'entretien pour aider l'expert à exprimer des connaissances implicites. Pour obtenir des données et de l'information sur les pratiques opérationnelles, il est intéressant de combiner différentes approches : questionnaires, entretiens semi-dirigés, mise en situation, vidéo, etc. L'enjeu est de pouvoir capter tout à la fois des connaissances explicites (procédures, méthodes) et tacites (gestes). Pour obtenir de la connaissance à partir du *big data*, différentes méthodes et outils ont été développés, que l'on peut associer au domaine de la fouille de données (*data mining*). La fouille de données passe par différents processus (e.g. synthèse, classification, régression, association, etc.) afin de produire de la

connaissance. Les méthodes peuvent être complètement automatisées ou faire appel à un opérateur. De nombreux ouvrages exposent ces méthodes (e.g. (Tuffery 2017)). Le *data mining* constitue un domaine de recherche extrêmement dynamique et il est conseillé de s'informer des algorithmes de traitement des données les plus récents (e.g. (Vadim 2018, Wang, Ji et al. 2018)). Bien que particulièrement intéressantes, ces approches de fouille de données ne seront pas développées plus largement dans ce document.

Formalisation des connaissances (modèles par domaine). Le recueil de connaissances permet de récupérer de la donnée, de l'information et de la connaissance. Mais quelle forme donner au savoir hétérogène récolté ? La structuration et la formalisation de ce savoir ont un intérêt double. D'une part, cela permet de mieux faire comprendre la connaissance, de la partager et d'en faciliter l'utilisation. D'autre part, cela permet d'aider au recueil lui-même, en permettant à la personne interrogée de réfléchir à la connaissance proposée, à la corriger et la compléter si nécessaire. Le recueil de littérature se trouve simplifié par une modélisation efficace de la connaissance qui permet de mettre en avant les points émergents et les trous de connaissances, et peut permettre une automatisation (e.g. (Boonyasopon, Riel et al. 2011)) ou une semi-automatisation de ce recueil (e.g. *text mining* (Demeter, Szász et al. 2018)).

Plusieurs types de modèles de connaissances sont utilisables en fonction de la source, du type de connaissance recueillie et de l'objectif de modélisation. On peut ainsi citer quelques exemples à titre illustratif : (a) la carte causale (ou diagramme d'influence) qui formalise les influences entre les variables d'un système (**figure 1.9.a**), (b) le diagramme de tâches qui formalise la succession des tâches composant un processus (**figure 1.9.b**) et (c) le thésaurus qui est un ensemble structuré de vocabulaires liés à un domaine (**figure 1.9.c**).

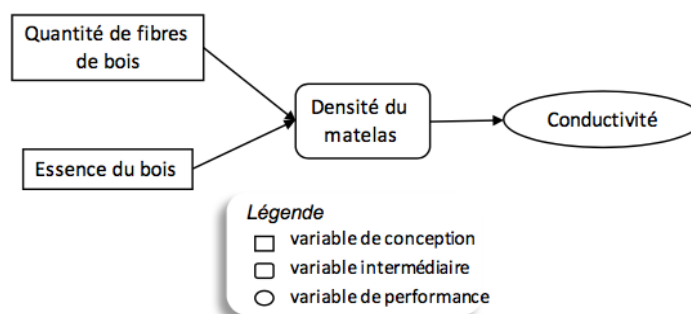


Fig 1.9.a. Exemple de carte causale pour la conductivité d'un isolant biosourcé (Hoballah 2018)

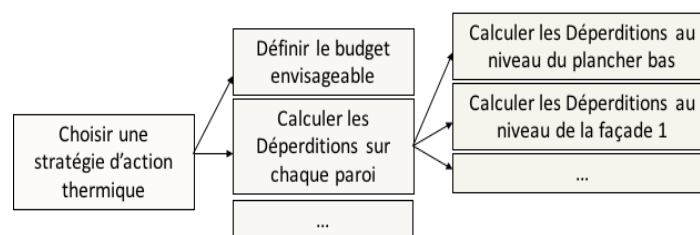


Fig 1.9.b. Un extrait de diagramme de tâche (Taillandier, Aries et al. 2013)

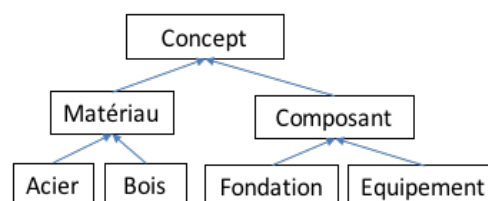


Fig 1.9.c. Un extrait de Thésaurus (Taillandier, Baudrit et al. 2018)

Afin de s'assurer de l'exactitude des modèles par domaine, il est nécessaire de les valider. Cela peut consister, par exemple, à les faire valider par des experts ou des parties prenantes qui possèdent la connaissance, afin de vérifier l'absence de malentendu ou d'ambiguïté sur la connaissance formalisée. Il peut être intéressant aussi de soumettre cette connaissance à des personnes (e.g. experts) n'ayant pas participé à la phase de recueil pour s'assurer de la qualité de la connaissance. Pour cela, il est nécessaire que les modèles soient basés sur des modèles génériques explicites et facilement interprétables. Si besoin, le modèle peut être corrigé et de nouvelles connaissances recueillies. Il est fortement recommandé de passer par une validation incrémentale pour éviter de noyer l'expert sous un amas de connaissances (surcharge cognitive). La modélisation des connaissances des domaines passe donc par des étapes itératives et incrémentales entre recueil, formalisation et validation.

Fusionner les modèles par domaine. L'étape précédente a permis la formalisation des modèles par domaine. Ces modèles, qui peuvent être issus de sources diverses, peuvent être différents en termes de formalisme et la connaissance qu'ils contiennent peut être parfois contradictoire. En agrégeant les différents modèles par domaine en un seul modèle global de connaissances, les contradictions vont apparaître. Plusieurs approches sont possibles pour traiter les contradictions : discussion entre les parties prenantes (e.g. experts) pour les amener à un consensus, considération des avis contradictoires dans le modèle, traitement par un modèle d'incertitudes (probabilité, logique floue), choix d'une solution selon la confiance accordée aux différentes sources. La fusion des modèles par domaine conduit au repérage des trous de connaissances notamment aux interfaces entre domaines. Cela peut conduire à identifier un nouveau domaine correspondant à cette interface et repasser par une étape de collecte de données/informations/connaissances et de formalisation.

Implémenter le modèle. Les modèles de connaissances ne nécessitent pas toujours une implémentation ; ils peuvent être simplement utilisés par et pour ce qu'ils décrivent. Le support informatique peut permettre parfois une consultation et une visualisation plus facile de la connaissance. Comme évoqué dans la **partie 5.4** *Modèle pour connaître*, certains modèles profitent aussi de moteur d'inférences permettant à l'utilisateur de questionner le modèle via des requêtes ; dans ce cas, l'implémentation informatique est nécessaire. L'implémentation n'impose pas forcément de support informatique. Par exemple, le jeu sérieux (e.g. jeu de rôle), informatisé ou non, est aussi une implémentation d'un modèle de connaissances (voir un exemple au **Chapitre 2 partie 6**).

Explorer, Valider et utiliser. La connaissance interne a normalement déjà été validée par domaine dans la phase de *Formalisation des connaissances*. Cependant, il peut être nécessaire de refaire un point à cette étape, en particulier pour vérifier que l'implémentation n'a pas dégradé la connaissance. D'autre part, il faut s'assurer que le modèle implémenté est bien en mesure de répondre aux objectifs fixés dans la première étape. Pour des modèles ayant un usage spécifique comme par exemple faire apprendre, le modèle peut être soumis à des expérimentations face à des apprenants pour mesurer sa capacité à faire apprendre (e.g. modèle SPRITE (Taillandier and Adam 2018)). Dans cette étape, on peut aussi explorer le modèle implémenté (i.e. faire différents tests afin d'en analyser les résultats). Cela peut permettre de s'assurer de la validité et du fonctionnement du modèle dans toute l'étendue de ses possibilités et usages, et parfois de faire émerger de nouvelles connaissances (par exemple au travers d'inférences) ou de nouveaux types d'usage (e.g. capitaliser, transférer des connaissances) non prévus initialement.

6.3. Démarche de modélisation d'un problème décisionnel

Tout comme pour les modèles de connaissances, il existe des spécificités pour la conception et la construction des modèles décisionnels, qui modifient le processus général de modélisation (**Figure 1.10**). Tout d'abord, l'objectif du modèle est ici directement induit à partir du type même de modèle :

aider à prendre une décision. Cependant, cet objectif peut être spécifié en précisant le processus décisionnel et en étudiant le contexte décisionnel ; cela sera l'objet de la première étape.

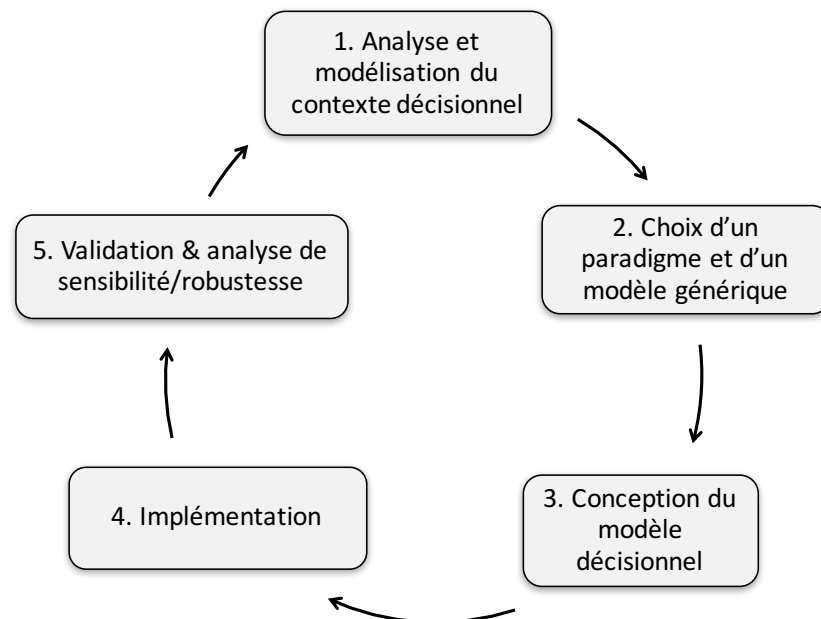


Fig 1.10. *Étapes de modélisation décisionnelle*

Analyse et modélisation du contexte décisionnel. Toute approche d'aide à la décision doit passer par une analyse du problème décisionnel. On ne saurait mettre en œuvre une stratégie efficace d'aide à la décision sans avoir bien compris le problème auquel sont confrontés les décideurs. Cette analyse doit permettre d'explicitier les différents aspects et enjeux du problème décisionnel : qui sont les décideurs, quel est le processus de décision (chaîne de décision, temporalité, rôle dans la décision, etc.), quelles sont les options possibles, quelles sont les données, les informations disponibles, quelles sont les contraintes, les objectifs, les critères, les préférences des décideurs, etc. Afin d'analyser le problème décisionnel, le recours aux approches d'acquisition de connaissances et aux modèles de formalisation de la connaissance peuvent se révéler très utiles. Cela peut permettre de produire un modèle intermédiaire afin de s'assurer de la bonne analyse du problème décisionnel. Par exemple une carte causale peut être très intéressante pour comprendre, dans un processus de décision, quelles sont les variables qui ont une influence sur un objectif à optimiser.

Choix d'un modèle générique. Le choix du modèle générique est déterminant pour le résultat. Il doit se faire par la conjonction entre caractéristiques du problème décisionnel et capacités et limites des modèles génériques. Il existe un très grand nombre de modèles génériques, aptes chacun à répondre à un ensemble de problèmes décisionnels, mais aucun ne peut répondre à tous les problèmes. Le chercheur en décision doit ainsi avoir une bonne connaissance de nombreux modèles génériques afin de sélectionner le plus adapté à chaque problème décisionnel (voir **Chapitre 3 partie 5.1** pour une discussion sur ce point).

Conception du modèle décisionnel et implémentation. A partir de l'analyse du problème décisionnel et du choix du modèle générique, il est possible de modéliser le problème décisionnel. C'est souvent à cette étape que l'on est confronté à toute la complexité du problème et aux verrous scientifiques ; si le problème est mal modélisé, aucun algorithme de résolution ne saurait donner une réponse valide. Cette étape de modélisation peut être conduite par le chercheur seul, ou en collaboration avec les décideurs. Il est généralement très intéressant de faire intervenir l'utilisateur final dès cette étape afin de : (a) s'assurer que son point de vue sur le problème décisionnel est bien pris en compte, (b) lui faire comprendre la démarche d'aide à la décision, et (c) le faire avancer sur ses réflexions quant au problème décisionnel. Il arrive parfois, que la formalisation du problème suffise et

permette au décideur de trouver la solution qui lui convient sans même avoir besoin d'un algorithme de résolution. Cependant, le recours à des algorithmes ou plus généralement, l'implémentation du modèle, peut apporter de nouvelles informations/connaissances utiles pour la prise de décision.

Validation et analyse de sensibilité et de robustesse. Comme tout modèle, les modèles décisionnels doivent être validés. Cette validation peut être complexe dans le sens où, tel que discuté dans la **partie 4.2**, une décision est un pari sur l'avenir induisant forcément de l'incertitude. A défaut de pouvoir faire une validation externe du modèle décisionnel, il est tout de même possible de faire une validation interne (voir le **Chapitre 2 partie 7.2** pour une discussion sur le problème de validation). De plus, il est toujours indispensable d'effectuer une analyse de sensibilité et de robustesse pour s'assurer de la validité des résultats du modèle (Lissouck, Pommier et al. 2018). Le **Chapitre 5 partie 2.1** revient plus en détails sur ces analyses.

La démarche de modélisation décisionnelle est itérative et incrémentale : il est souvent intéressant, après une étape, de revenir en arrière pour affiner un choix précédent. Par exemple, lorsque les résultats sont obtenus, un décideur peut se rendre compte qu'un critère important n'a pas été pris en compte. Il peut revenir à la phase de formalisation du problème pour le rajouter.

7. Conclusion

Dans ce premier chapitre, j'ai exposé ce qu'était la complexité, ou plutôt les complexités, puisque la complexité s'exprime différemment selon l'objectif (système, connaissance et décision). J'ai montré que le domaine du génie civil était fortement confronté à ces trois complexités (respectivement systémique, gnoséologique et décisionnelle). Ces complexités induisent une difficulté à appréhender, à comprendre et à décider face à ces systèmes. Cependant, les simplifier reviendrait à tronquer le système, à prendre le risque de perdre son sens profond et de mal interpréter la connaissance qui pourrait en être tirée. J'ai ainsi proposé de passer par une approche systémique s'inscrivant dans un holisme mineur. Le modèle a alors été posé comme pierre angulaire de cette approche, sous la forme de quatre niveaux d'abstraction : le paradigme, le modèle générique, le modèle et l'instance. Tous les modèles retenus dans mon travail s'efforceront d'apporter une réponse au défi de la complexité. La démarche de modélisation, elle-même, prendra acte de ces principes et prendra en compte à ces complexités.

J'essaierai ainsi, dans les trois prochains chapitres, d'illustrer ma démarche et mon approche en m'appuyant sur des modèles développés pour trois systèmes : le projet de construction (**Chapitre 2**), le bâtiment (**Chapitre 3**) et le parc immobilier (**Chapitre 4**). Les modèles qui seront présentés appartiennent à différentes catégories et permettront de répondre à différents objectifs. Dans leur diversité, ils démontreront la variété de mon travail mais aussi son unité et sa cohérence. Le **Chapitre 5** mettra les modèles abordés en parallèle, ouvrant de nouvelles voies de réflexion et de discussion, propres à nourrir de nombreuses perspectives de recherche.

CHAPITRE 2

La gestion des projets de construction et de leurs risques *Connaitre, apprendre, évaluer et simuler*

Modèles présentés

Modèle	Modèle générique	Problématique	Aspects remarquables
T-RBS	RBS	Analyse des risques des projets de construction	<ul style="list-style-type: none">• Base de connaissances de RBSs,• RBS adaptée à chaque contexte, phase & acteur,• Propagation des valeurs de risques dans la RBS.
MMRMP	Modèle relationnel	Analyse des risques des projets de construction	<ul style="list-style-type: none">• Modèle de connaissances Projet & Risque,• Multidimensionnel (temporelle, organisationnelle, etc.),• Multiniveau (plusieurs niveaux de granularité),• Modélisation en partenariat avec l'utilisateur final.
CP-HPRM	PRM	Simulation des projets de construction en considérant les risques	<ul style="list-style-type: none">• Modèle de connaissances Projet & Risque multiniveau,• Génération automatique d'un réseau bayésien,• Inférences Bayésienne (requêtes <i>Forward/Backward</i>, réactualisation par ajout d'informations, etc.).
SMACC2	ABM	Simulation des projets de construction en considérant les risques	<ul style="list-style-type: none">• Simulation des projets de construction et des risques,• Modèle et simulation explicite,• Capacité d'auto-adaptation des acteurs (modèle réactif).
Domego	Jeux sérieux	Apprentissage de connaissances sur les projets de construction	<ul style="list-style-type: none">• Enseignement de différentes notions autour des projets de construction (acteurs, phases, enjeux...),• Approche constructiviste,• Deux modes d'apprentissage (jeu normal & construction de scénarios).

Où il sera discuté de :

*Evolution des modèles,
Validation des modèles,
Comparaison de modèles génériques,
Apprentissage par le modèle.*

Chapitre 2

La gestion des projets de construction et de leurs risques -Connaitre, apprendre, évaluer et simuler-

1. Introduction

La construction d'un ouvrage, que ce soit un bâtiment ou un ouvrage d'art, passe par un processus complexe, i.e. le projet de construction (**Chapitre 1 partie 3**), faisant intervenir de multiples acteurs aux motivations et objectifs variés. La norme ISO 10006 définit un projet comme un "*processus unique qui consiste en un ensemble d'activités coordonnées et maîtrisées comportant des dates de début et de fin, entrepris dans le but d'atteindre un objectif conforme à des exigences spécifiques, incluant les contraintes de délais, de coûts et de ressources*" (ISO 2003). En accord avec cette définition, la réussite des projets de construction peut se définir, à un niveau global (i.e. au niveau du projet dans son ensemble), relativement à trois objectifs (Taillandier, Taillandier et al. 2015) : le coût, la durée et la qualité (i.e. respect d'exigences techniques, de sécurité, esthétiques, de satisfaction des clients, etc. (Petersen 2005)). Bien évidemment, localement, au niveau de chacun des acteurs, d'autres objectifs peuvent s'ajouter ou se substituer à ceux-ci (e.g. pour une entreprise : réaliser des bénéfices lors de l'opération, faire travailler ses employés, etc.).

Malgré une littérature scientifique et technique riche dans le domaine de la gestion de projet, il est très courant que les projets de construction n'atteignent pas leurs objectifs (Koushki, Al-Rashid et al. 2005, Devaraj and Velkennedy 2016, Serpell, Ferrada et al. 2017). Les exemples sont nombreux et parfois spectaculaires. Par exemple, on peut citer le projet de l'aéroport de Berlin-Brandebourg (Allemagne) initialement prévu pour s'achever en 2010, et dont la date de livraison a été reportée à 2020, avec un dépassement de 7 milliards d'euros, ou l'EPR de Flamanville (France) affichant déjà, et sans que l'ouvrage ne soit fini, un retard de six ans et un budget deux fois supérieur au budget initial. Ces défaillances de projets ont différentes origines et notamment, les incertitudes liées au projet de construction, qu'elles soient liées à des facteurs techniques, organisationnels, humains ou économiques (Atkinson 1999, Assaf and Al-Hejji 2006). La non-atteinte des objectifs n'est pas due qu'à une mauvaise appréhension des incertitudes. Par exemple, pour les grands projets (e.g. EPR), le maître d'ouvrage est souvent poussé à sous-estimer le budget initial pour faire accepter le projet par les instances de délibération, obligeant la maîtrise d'œuvre à s'aligner sur des montants largement sous-estimés sous peine de ne pas être retenue au concours (Baumann, d'Auzon et al. 2015). Cette sous-évaluation volontaire initiale ne fait qu'accentuer le besoin d'une bonne gestion des incertitudes. Plus le domaine est concurrentiel, plus les marges sont réduites, et plus il est nécessaire de gérer au mieux les projets et les incertitudes inhérentes.

La norme ISO 31000 définit le risque comme l'effet de l'incertitude sur les objectifs (ISO 2009) ; cette définition peut être extrapolée aux effets des incertitudes sur le système. Cependant, cette vision de la notion de risque n'est pas partagée par tous les champs scientifiques, y compris au sein même du domaine du génie civil ; e.g. dans la gestion des risques naturels et industriels, le risque est défini vis-à-vis des notions d'aléa (i.e. phénomène ou évènement pouvant affecter le système) et d'enjeux (i.e. élément du système auquel on prête une valeur). Il existe un très grand nombre de définitions du risque (Fischhoff, Watson et al. 1984, Taillandier 2009). Aucune de ces définitions ne saurait être la meilleure pour l'ensemble des contextes. Plutôt que d'imposer une définition, il est préférable de choisir, en fonction du contexte, et si possible avec les parties prenantes, la plus adaptée.

Quelle que soit la définition retenue, la maîtrise des risques est l'un des enjeux importants de la gestion de projet. La gestion des risques passe traditionnellement par 3 phases (Taillandier 2009) : analyse des risques (identification et évaluation des risques), proposition d'actions de maîtrise des

risques et suivi des actions et du système. Ces étapes peuvent être déclinées différemment selon la méthode utilisée (e.g. AMDEC (Bahrami, Bazzaz et al. 2012), MOSAR (Perrin, Muñoz-Giraldo et al. 2012), etc.) et le point de vue qu'elle porte (e.g. technique, gestionnaire, etc.) (Christensen, Andersen et al. 2003). Par exemple, dans les méthodes de type arbre (e.g. arbre de défaillance, de causes, d'évènements, etc.), qui se concentrent sur l'analyse des risques, les deux premières phases sont constituées d'une étape de construction de scénarios de risque et d'une étape de propagation des incertitudes dans les branches de l'arbre (Hyun, Min et al. 2015). La phase d'analyse est certainement celle ayant fait l'objet de la plus large littérature (Carr and Tah 2001) conduisant à un grand nombre de modèles. Cela s'explique simplement : il est illusoire de pouvoir mener des actions pertinentes pour maîtriser les risques si l'on n'a pas précédemment bien analysé ces risques. Ainsi, un enjeu important consiste à analyser les risques tout en faisant face à la complexité inhérente aux projets de construction rendant cette tâche extrêmement difficile. Je présenterai dans cette partie quatre modèles, correspondant à autant de modèles génériques, permettant de modéliser les projets de construction et/ou leur risques : T-RBS basé sur les RBSs (**partie 2**), MMRMP basé sur les Modèles relationnels (**partie 3**), CP-HPRM basés sur les HPRMs (**partie 4**), SMACC2 basés sur les ABMs (**partie 5**). Ces modèles vont dessiner une trajectoire qui sera exposée dans la **partie 7**, qui permettra de prendre du recul sur le travail effectué et de discuter des points qui émergeront de la présentation des modèles. En plus de ces modèles visant à identifier et/ou évaluer les risques dans les projets de construction, je présenterai Domego en **partie 6**. Domego est un jeu sérieux servant de support à l'enseignement de connaissances liées aux projets de construction (les principales phases, les acteurs, etc.) et permettant de mettre en lumière les enjeux liés à leur gestion, et notamment, la gestion des risques.

2. RBS : Tailored RBSs

Parmi les modèles génériques visant à analyser les risques, j'ai pu travailler, au travers de la thèse de Rasool Mehdizadeh (avec Denys Breysse), dans le cadre du projet ANR-GERMA, sur les RBSs (*Risk Breakdown Structure*). Cette partie présentera le formalisme des RBSs, ses limites et les avancées que nous avons proposé pour y faire face.

2.1. Principe et limites des RBS

La RBS est une représentation hiérarchisée, sous forme d'un arbre, des risques attachés à un projet (PMI 2008). Elle est composée de deux concepts (Holzmann and Spiegler 2011) : les catégories de risques (RCs) et les événements risqués (REs). Les catégories de risques constituent les branches de l'arbre ; elles se décomposent selon une structure catégorie/sous-catégories permettant de décrire les familles de risques à différentes granularités. Les événements risqués constituent les feuilles de l'arbre ; ils représentent des situations pouvant affecter les objectifs du projet et sont rattachés à des catégories de risque. La **Figure 2.1** illustre un exemple de RBS ; les concepts en gris clair correspondent à des catégories de risque (e.g. *Risque externe, Risque environnemental...*) et les REs à des événements risqués (e.g. *Accident durant le chantier, Erreur dans les plans...*).

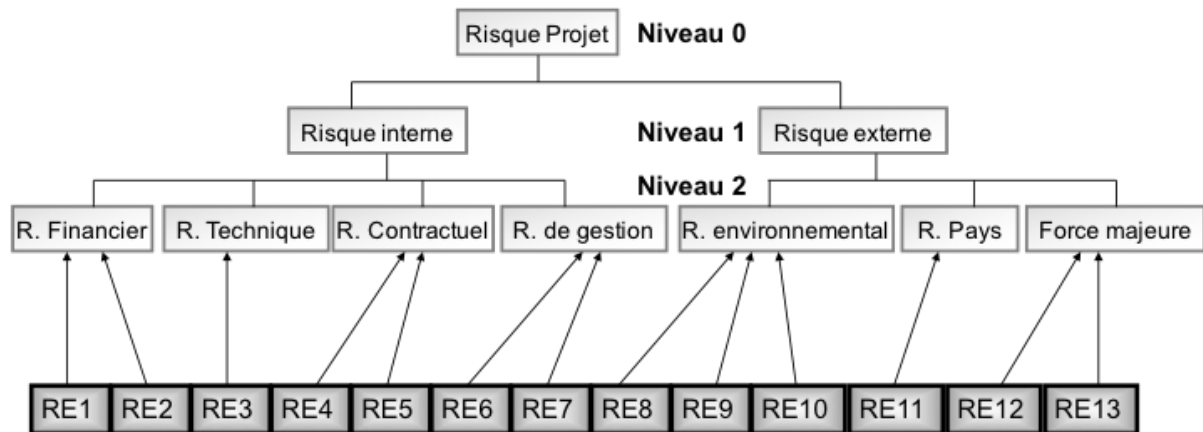


Fig 2.1. Exemple de RBS issu de (Taillandier, Mehdizadeh et al. 2011)

Le formalisme des RBSs présente de nombreux avantages qui rendent ce modèle adapté à la gestion des risques dans les projets de construction : il offre une vision synthétique des risques, il est compatible avec la nature dynamique des risques (évoluant tout au long du projet) (Hamzaoui, Taillandier et al. 2015) et il permet à chaque acteur du projet d’avoir sa propre vision des risques (Mehdizadeh, Breyse et al. 2013). Cependant les RBSs présentent aussi des inconvénients : (a) la définition des RCs et des REs est souvent floue et non partagée, (b) il n’y a pas de consensus sur la façon de les construire, enfin (c) il n’y a pas de règles permettant de propager les évaluations de risque (qualitatives ou quantitatives) dans les branches de la RBS. La littérature sur les RBSs est particulièrement riche en modèles instanciés ; e.g. RBS orientée projets CET (Construction-Exploitation-Transfert) (Ebrahimnejad, Mousavi et al. 2010), évaluation des risques de projet aux Emirats Arabes Unis (El-Sayegh 2008). Cependant, chacune de ces applications a été développée au cas par cas, sans souci de proposer un modèle global et générique applicable pour n’importe quel projet de construction. De plus, aucune méthodologie de construction de RBS n’est proposée dans la littérature. Chaque RBS est construite *ex-nihilo* en refaisant une analyse des risques complète (pas de capitalisation de connaissances). Finalement, il n’existe pas de règle d’évaluation et de propagation des valeurs de risque au sein des RBSs : malgré leur structure hiérarchisée qui se prêterait parfaitement à une logique d’agrégation, la plupart des RBSs ne proposent aucune évaluation des risques.

Afin de répondre à ces enjeux, nous avons : (a) homogénéisé et clarifié le vocabulaire lié aux RBSs et construit une base de connaissances rassemblant les RCs et les REs présents dans la littérature (**partie 2.2**), (b) élaboré un outil d’aide à la construction d’une RBS adaptée à chaque acteur et à chaque phase du projet (**partie 2.3**), et (c) proposé des règles d’évaluation et de propagation des valeurs de risque au sein de l’arbre afin de pouvoir identifier les RCs et les REs les plus critiques (**partie 2.4**).

2.2. Construction d’une base de connaissances de RBSs

La première étape (i.e. base de connaissances cohérente) appartient au champ du recueil de connaissances, avec pour objet l’analyse des RBSs (concepts et relations) présents dans la littérature scientifique (plus de 100 articles étudiés). Les connaissances collectées provenaient d’un seul type de source (article scientifique) facilitant la collecte et la modélisation (directement sous la forme de RBSs). Cependant, deux difficultés étaient à considérer : la faiblesse ontologique et la cohérence de la connaissance. Le premier point renvoie aux différentes définitions utilisées pour les REs et les RCs présents dans les articles et à la façon dont ils sont utilisés dans les instances du modèle. Par exemple, un RE dans un article peut être une RC dans une autre publication, ou parfois, simplement les REs ne sont même pas des événements (e.g. *barrière de la langue* dans (Zhi 1995)). Afin de pouvoir

introduire ces éléments de connaissances, il a fallu, dans un premier temps, clarifier les définitions, puis reformuler ou restructurer les éléments de connaissance de la littérature pour les faire correspondre à nos définitions. Cela est un travail de type ontologique, même si le modèle générique des ontologies (Studer, Benjamins et al. 1998) n'a pas été ici directement convoqué. Dans notre travail, un RE est un événement ou un fait, dont l'occurrence peut avoir des conséquences sur l'un des objectifs du projet, et une RC est un ensemble de REs (Mehdizadeh 2012).

Le problème de cohérence se présente au niveau des concepts, mais aussi au niveau, plus global, des arbres (RBSs). Par exemple, une RC avait, dans un article, une sous-RC, qui était son parent dans un autre article. Il a donc fallu faire des choix de modélisation. Ces choix sont subjectifs et s'inscrivent dans une démarche itérative experte. A chaque nouvel article, la nouvelle connaissance est vérifiée par rapport à celle déjà formalisée afin d'assurer sa cohérence. Elle est reformalisée et restructurée au besoin. Dans la construction du modèle, certains choix ont pu être remis en question. Une structure de RBS paraissant pertinente au début a par exemple pu être modifiée suite à l'arrivée de nouvelles connaissances.

Près de 90 RBSs ont ainsi été analysés, permettant de définir un ensemble de concepts et de relations cohérent (320 REs et 146 RCs). De plus, l'analyse de ces RBSs a permis de définir un ensemble de structures partonomiques élémentaires appelés micro-arbres (*micro-tree*, noté MT). Un MT est un extrait de RBS composé de deux niveaux (RC parent et RCs enfant). La **Figure 2.2** donne un exemple de MT. Construire une RBS consiste à choisir un ensemble de MTs qui composeront l'arbre global.

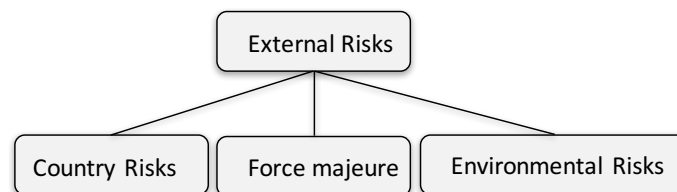


Fig 2.2. Exemple de Micro-arbre (MT) issu de (Mehdizadeh 2012)

Les enjeux de cohérence de la structure se retrouvent au niveau des MTs pour lesquels des règles de cohérence ont été établies : (a) un MT doit comporter au moins deux RCs enfants, (b) une RC peut être le nœud parent d'un MT, uniquement s'il est la RC enfant d'un autre MT, à l'exception de la RC *Risques de projet* qui est le nœud origine, (c) une RC enfant d'un MT ne peut pas être le parent de son parent dans un autre MT, (d) une RC ne peut être présente qu'une fois en tant qu'enfant dans un MT (N.B. cependant, une RC peut être le nœud parent de différents MTs), (e) une RC ne peut pas être à la fois parent et enfant dans un même MT. La vérification de la cohérence a été faite de façon experte et systématique en s'appuyant sur la connaissance déjà dans la base. Cette démarche de collecte de connaissances associant directement extraction et modélisation a été réellement itérative : à chaque nouvel apport (étude d'un nouvel article), le modèle a été testé pour voir s'il pouvait l'intégrer sans nuire à la cohérence globale. Pour aider à cette vérification, des scripts (macro) ont été intégrés à la base de connaissances afin d'automatiser en partie la démarche, la vérification de la cohérence sémantique restant manuelle.

2.3. Tailored-RBS

En plus de proposer une base de connaissances contenant les RBSs de la littérature, il a été proposé une méthode d'aide à la construction de RBS adaptée à chaque utilisateur (*Tailored RBS*). Cette approche propose à l'utilisateur de choisir préalablement les REs pouvant affecter son projet de construction. Pour cela, il peut s'appuyer sur la méthode proposée en **Figure 2.3**. C'est une approche itérative dans laquelle l'utilisateur choisit, à partir de la liste de REs de la base de connaissances

(checklist), ceux qui lui paraissent pertinents au regard de son projet. Ce choix peut s'appuyer sur une expertise métier, sur des projets passés, sur la littérature scientifique et technique et sur une méthode préalable d'analyse des risques. L'outil construit une RBS adaptée et propose de nouveaux REs qui semblent intéressants par rapport à la RBS proposée. L'utilisateur peut alors modifier les REs retenus et relancer une nouvelle construction de RBS. En plus du choix des REs, l'utilisateur peut spécifier la phase du projet importante pour lui ainsi que les acteurs ciblés. Il peut aussi choisir le nombre de niveaux (profondeur) souhaités pour sa RBS. A partir de ces informations, un algorithme va construire une RBS adaptée.

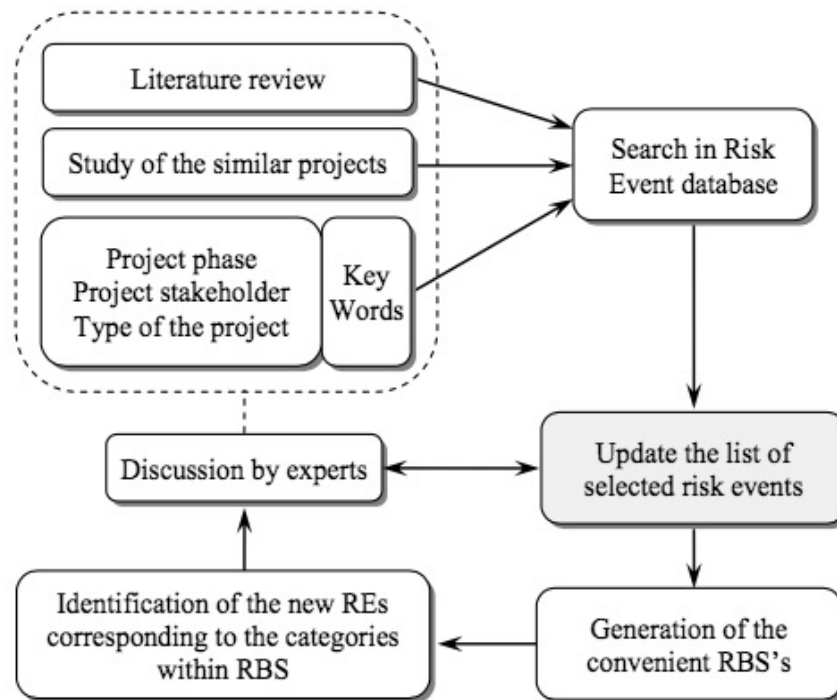


Fig 2.3. *Processus de construction de Tailored-RBS (Mehdizadeh 2012)*

L'algorithme de choix de la RBS la plus adaptée est basé sur un paradigme d'aide à la décision multicritère considérant 4 critères (Mehdizadeh 2012) : (a) Couverture des REs, (b) Granularité, (c) Point de vue utilisateur (objectifs importants, phase à mettre en avant, rôle de l'utilisateur dans le projet), (d) Mise en évidence des risques critiques (nécessite d'évaluer les risques, voir la **partie 2.4**). La méthode retenue consiste à construire, à partir des MTs de la base de connaissances, l'ensemble des RBSs homogènes (i.e. de même niveau sur chacune des branches) puis de les évaluer sur les 4 critères retenus. A partir de cette évaluation, les RBS sont hiérarchisées par le recours à une méthode d'aide à la décision multicritère (e.g. ELECTRE III (Roy 1996), AHP (Saaty 1980), etc.). Le RBS la plus pertinente est alors présentée à l'utilisateur. Celui-ci peut modifier l'arbre en dépliant ou repliant les différentes branches (en déshomogénéisant la RBS) ; pour chaque modification, la valeur sur les différents critères est recalculée et présentée à l'utilisateur, afin de guider sa construction. L'utilisateur peut aussi modifier les REs retenus en première phase et relancer les calculs.

C2.4. Evaluation des risques

La dernière innovation méthodologique sur les RBSs que nous avons proposée, est une méthode d'évaluation des risques et de propagation de ces évaluations au travers de la structure de la RBS. Pour tirer parti de l'arborescence de la RBS, l'approche est basée sur une logique d'agrégation (Taillandier et al., 2011). Le risque est d'abord évalué au niveau des REs, puis agrégé afin de calculer

le risque lié à chaque RC. La **Figure 2.4** illustre les sept étapes de ce processus (T1 à T7), qui est détaillé dans l'article (Mehdizadeh, Taillandier et al. 2012).

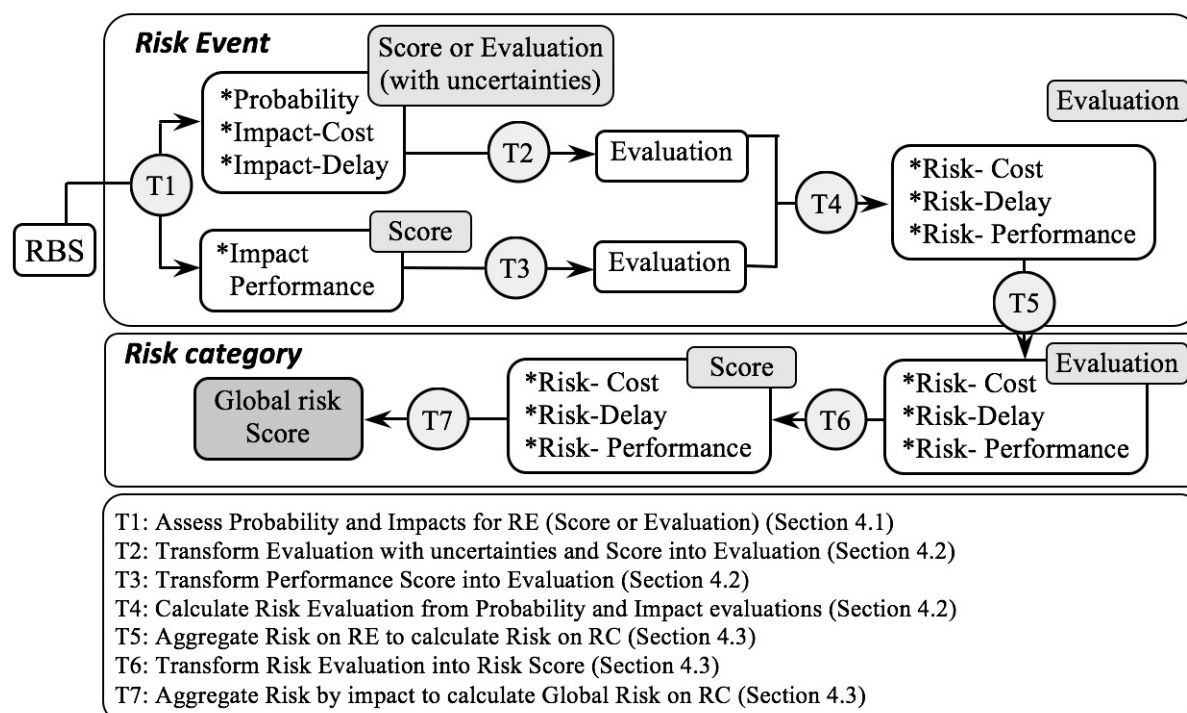


Fig 2.4. Processus d'évaluation des risques dans les RBSs (issu de (Mehdizadeh, Taillandier et al. 2012))

Evaluation des REs. Les REs sont évalués en termes de probabilité d'occurrence et d'impact sur les objectifs. Deux échelles concomitantes sont utilisées : une échelle cardinale continue et une échelle ordinale discrète. Selon le niveau d'information disponible, on peut utiliser l'une ou l'autre échelle, ou combiner les deux ; e.g. pour un RE, si l'on dispose d'une information précise sur l'impact financier, on utilisera l'échelle cardinale (en euro) mais si l'on ne dispose que d'une évaluation floue pour le délai, on pourra utiliser pour ce paramètre, l'échelle ordinale. L'échelle discrète va de 1 à 5 (5 indiquant la situation qui entraîne le plus grand risque). Afin de pouvoir combiner les deux types d'échelle, le modèle s'appuie sur la notion d'utilité (Morgenstern and Neumann 1944). L'utilité permet de modéliser l'intérêt de chaque valeur (quantitative ou qualitative) pour l'utilisateur, et de prendre aussi en compte son aversion au risque (Thomas 2016). Afin de faire éliciter à l'utilisateur ses fonctions d'utilité, on peut utiliser l'approche proposée par Abdellaoui, Driouchi et al. (2011). Pour chaque RE, le risque peut être calculé comme le produit de la probabilité et de l'impact (traduit en utilité) (Alan 1994). Afin de tenir compte des incertitudes épistémiques (**Chapitre 1 partie 4.1**) nous avons ajouté un coefficient d'aversion à l'incertitude épistémique ; il augmente la valeur du risque lorsque les incertitudes sur les informations sont importantes.

Agrégation des valeurs de risque. Après avoir évalué les risques au niveau des REs, on peut agréger ces valeurs au niveau des RCs. Pour cela, une fonction additive est utilisée : pour chaque objectif, la somme des valeurs des REs liés est calculée. Les REs liés correspondent à tous les REs qui sont directement rattachés à la RC considérée ou à ses sous-RCs. L'utilisation d'une fonction additive impose de poser pour hypothèse l'indépendance des REs entre eux. Cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée ; e.g. un RE *Température très froide* pourrait avoir un impact sur le RE *Accident sur le chantier*. Cependant, cette hypothèse permet de simplifier le modèle et d'avoir une première évaluation des risques. La question de l'interaction entre les REs demeure cependant fondamentale,

mais elle n'a pas été traitée dans ces travaux qui étaient pour nous les premiers dans ce champ disciplinaire. Ce point sera plus largement discuté dans la **partie 7.1**.

De l'évaluation du risque à la note de risque. Dans les deux étapes précédentes, nous avons proposé une méthode d'évaluation des REs et des RCs sur chacun des objectifs considérés (coût, délai, qualité). Afin d'évaluer le risque global (i.e. prenant en compte les différents objectifs), un score global est calculé en agrégeant les valeurs de risque sur les différents objectifs à l'aide de la méthode ELECTRE TRI-b (Almeida-Dias, Figueira et al. 2010). Le score de risque global est défini sur la même échelle que l'échelle discrète précédemment présentée (échelle ordinale de 1 à 5). La **Figure 2.5** propose un exemple de RBS évaluée.

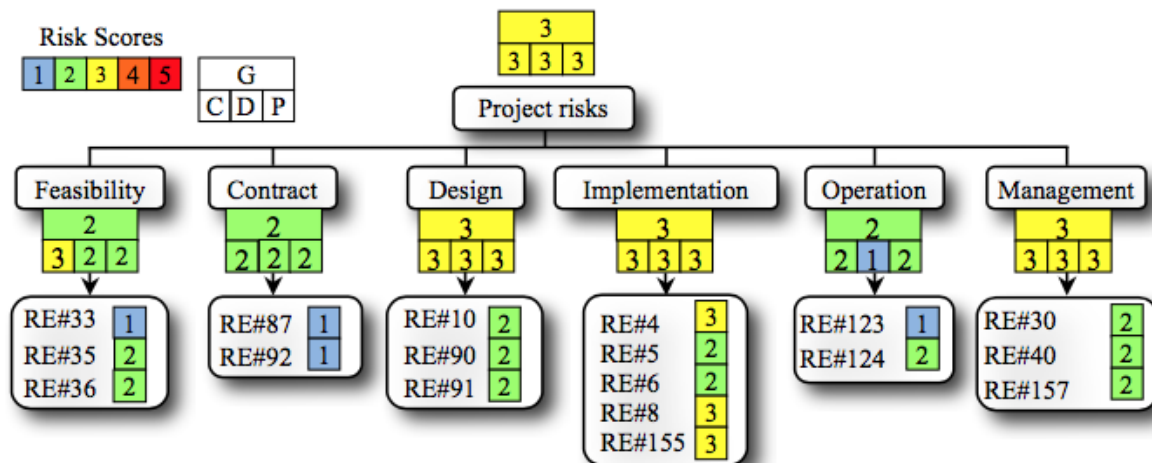


Fig 2.5. RBS évaluée (Mehdizadeh, Taillandier et al. 2012)

J'ai présenté dans cette partie le travail effectué sur la modélisation des risques liés aux projets de construction par le formalisme des RBSs. Ce travail a permis de proposer une première avancée dans la prise en compte des risques dans la gestion des projets. Cependant, la modélisation ne concerne ici que les risques et non le projet lui-même. Cela constitue une limite, en interdisant d'analyser la relation entre le projet et les risques liés. Pour analyser plus finement les risques des projets, il nous faut impérativement modéliser ce système (i.e. le projet de construction) et son environnement (*système ouvert*, voir **Chapitre 1 partie 1**). Pour répondre à ce besoin, j'ai participé au développement d'autres modèles détaillés dans les **parties 3, 4 et 5**.

3. Modèle relationnel : MMRMP

Afin de mieux gérer les risques pour les projets de construction complexes et stratégiques, nous avons développé un modèle multidimensionnel de gestion des risques (*Multidimensional Model of Risk Management Process* - MMRMP). Ce modèle a été développé dans le cadre de la thèse de Esra Tepeli (avec Denys Breyse) et a bénéficié du soutien de Vinci Construction France (VCF) dans le cadre d'un financement de l'ANRT (CIFRE). Le MMRMP vise à identifier et évaluer les risques des projets de construction parallèlement à la gestion du projet, puis à proposer un plan de réponses aux risques jugés critiques. La participation d'une entreprise telle que VCF est particulièrement intéressante à double titre : (a) pour assurer au modèle une capacité à être utilisée pour des projets réels en conditions opérationnelles, (b) pour tirer le meilleur parti de l'expérience – ou du manque d'expérience – du partenaire industriel en termes de maîtrise des risques. Dans ce cas précis, cela nous a permis d'avoir d'une part accès aux outils et pratiques (souvent sommaires) mis en œuvre dans les projets réels, et d'autre part, accès à des cas concrets de projets, facilitant le retour d'expériences sur les risques (événements risqués, conséquences...).

3.1. De l'enjeu d'une telle démarche

Comme exposé dans la **partie 1**, de nombreux modèles ont été proposés dans la littérature pour modéliser les projets de construction et/ou les risques liés à ces projets. Mais la plupart de ces modèles partagent les mêmes défauts (Tesfaye, Berhan et al. 2016) : (a) ils ne s'intéressent qu'à une partie du processus de gestion des risques (e.g. identification des risques, évaluation, etc.), (b) ils ne considèrent pas le projet et les risques dans un même modèle (e.g. RBS présentée en **partie 2**), (c) ils ne permettent pas de s'adapter à la nature dynamique des projets de construction (Hamzaoui, Taillandier et al. 2015), (d) ils se concentrent sur un seul objectif (coût, délai, etc.) ou ne tiennent pas compte des interactions entre risques (Walewski and Gibson 2003, Taroun 2014), (e) ils ne proposent pas d'évaluation de stratégies de gestion des risques (Dey and Ogunlana 2004), (f) ils n'ont pas été développés avec les utilisateurs finaux, ce qui limite leur opérationnalité, (g) ils ne sont pas implémentés et ne proposent pas de support à leur utilisation (Ali, James et al. 2015).

Afin de répondre à ces limites, le MMRMP a été construit afin de : (a) couvrir l'ensemble du cycle de vie du projet, (b) prendre en compte toutes les dimensions du projet de construction (temporelle, organisationnelle, etc.), (c) disposer d'une base de connaissances permettant de structurer des connaissances sur des projets type (d) proposer un processus évolutif, les données étant mises à jour en fonction de l'avancement du projet, (e) adapter le modèle au niveau de détail souhaité selon les informations disponibles et (f) s'assurer de l'adéquation entre le modèle et les besoins de l'utilisateur final (VCF).

3.2. Présentation du MMRMP

Le modèle est structuré en deux parties : une partie *Projet* et une partie *Risque* (**Figure 2.6**). La partie *Projet* du modèle s'inscrit dans le paradigme systémique en formalisant les différents concepts (e.g. *Activité*, *Ressource*, *Contrat*, etc.) et attributs du système, son environnement et les relations entre ces éléments sous la forme de flux (représentés par les arcs bleus sur la **Figure 2.6**). La partie *Risque* considère les REs (identiques au concept des RBSs) et le plan d'actions de gestion des risques. Les REs sont, dans ce modèle, liés à l'un des éléments (i.e. concept ou relation) du *Projet*.

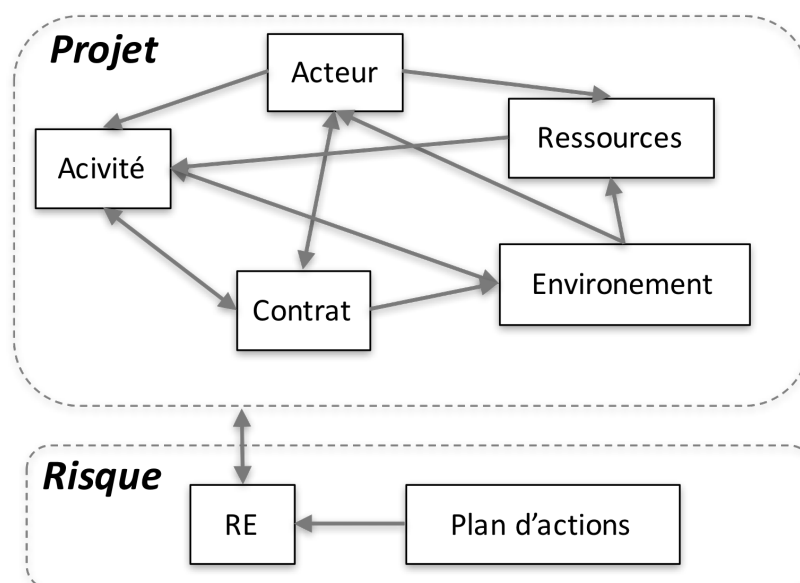


Fig 2.6. Modèle MMRMP

Les entités modélisant le projet (*Activité, Acteur...*) sont définies à différents niveaux de granularité selon la finesse d'analyse désirée et les informations disponibles. Par exemple, l'*Activité*, qui formalise la dimension chronologique du projet, intègre les *phases* (1er niveau) qui se décomposent en *sous-phases* (2ième niveau) qui elles-mêmes se décomposent en *tâches* et *jalons* (3ième niveau) (Walewski and Gibson 2003). La dimension organisationnelle (*Acteur*) intègre les entreprises ou les principales parties prenantes (1er niveau) telles que le maître d'ouvrage ou le maître d'œuvre, puis les départements (2ème niveau) tels que le département financier ou le département technique, et au troisième niveau, le personnel (e.g. directeur, ingénieur, ouvrier). La description détaillée des entités du modèle à chaque niveau de granularité peut être trouvée dans (Tepeli 2014).

En plus de proposer cette vision multi-niveau, le MMRMP présente une approche évolutive de la gestion des risques tout au long du déroulement du projet. Pendant le cycle de vie du projet, l'analyse des risques peut être répétée plusieurs fois, en gardant trace des analyses passées. A chaque application, la base de données peut être mise à jour en ajoutant les nouvelles informations disponibles (par exemple, liées à la disponibilité d'une ressource) et en actualisant les risques sur les phases qui se sont déjà déroulées (occurrence ou non d'un RE). Cela permet de réactualiser les conséquences de ces événements sur les objectifs du projet et de constituer une base de retours d'expériences.

3.3. Base de connaissances

Les entités et leurs relations constituent une base de connaissances qui peut être mise à jour et étendue si nécessaire. L'utilisation d'une base de connaissances présente un avantage majeur. En raison du nombre élevé d'entités (tâches, acteurs, etc.) dans un projet de construction, la modélisation de chaque élément du projet peut être rapidement fastidieuse. De plus, les entités et leur organisation dans un projet suivent souvent des schémas identiques (Taillandier et al. 2015) dont profite la base de connaissances. Selon le type de projet (bâtiment, ouvrage d'art, etc.) et le type de contrat (maîtrise d'ouvrage publique, partenariat public-privé, etc.), MMRMP, en se basant sur la base de connaissances, propose un modèle instancié adapté comprenant : (a) les acteurs et leurs responsabilités, (b) les étapes du projet, (c) les différents contrats de sous-traitance, et (d) les types de ressources possibles. La base de connaissances du MMRMP contient, en plus, un registre des risques, permettant de proposer une liste de REs à partir de la description du projet. Finalement, la base de connaissances contient pour chaque RE une ou plusieurs actions possibles permettant de réduire l'impact des risques. Bien évidemment, les éléments proposés par la base de connaissances constituent une proposition par défaut qui peut être amendée par l'utilisateur afin de décrire plus justement son projet. Les éléments de connaissances disponibles dans la base proviennent de la littérature scientifique et de nombreuses études de cas proposés par VCF.

3.4. Utilisation

La modélisation d'un projet spécifique consiste à instancier le modèle, i.e. (a) décrire les entités du projet concernées, (b) décrire les relations entre les entités et (c) évaluer les attributs des entités. Comme évoqué dans la **partie 3.3**, l'utilisateur peut s'appuyer sur la base de connaissances qui lui propose une description type de son projet ; il doit vérifier ces structures prédéfinies, les valider ou les modifier, et y ajouter des informations. Une fois le projet instancié, le MMRMP propose une liste des REs probables, avec des valeurs par défaut pour leurs attributs (e.g. probabilité d'occurrence, impact sur les coûts, etc.). L'utilisateur peut mettre à jour cette liste, soit en modifiant les valeurs des attributs, soit en ajoutant ou en supprimant des REs. A partir de la description du projet et des REs, le MMRMP calcule les valeurs relatives aux objectifs du projet (i.e. coût, durée, qualité) pour chacune des phases et pour le projet dans sa globalité. En plus de l'évaluation des risques, le MMRMP propose un plan d'actions (i.e. ensemble d'actions) pour les risques évalués afin de réduire les impacts négatifs jugés

critiques. L'utilisateur peut choisir une ou plusieurs de ces actions et voir son influence sur les objectifs du projet.

3.5. Limites du MMRMP

Le MMRMP permet de prendre en compte les projets de construction et les risques liés. Il contient des connaissances tant scientifiques qu'expertes facilitant son utilisation. Il a été implémenté sous Excel afin de rester sur une plateforme bien maîtrisée par les agents de VCF. Il est opérationnel, mais souffre de plusieurs défauts : (a) orienté entreprise, (b) faiblesse de l'évaluation des risques, (c) faiblesse de la propagation et de la modélisation de l'interaction entre les risques, (d) limite de la plateforme d'implémentation. Sa première limite est qu'il a été conçu par et pour une entreprise. Il ne propose qu'une vision du projet de construction, celle de l'entreprise ; son usage est par exemple peu adapté pour un maître d'ouvrage. De plus, les données disponibles dans la base de connaissances n'ont pas pu être diffusées largement, celles-ci étant une propriété de VCF. La deuxième limite du modèle concerne l'évaluation des risques et des attributs des concepts : elle est faite dans le MMRMP par une évaluation quantitative classique (coût, probabilité d'occurrence, etc.). Or, il est souvent difficile de définir ces valeurs et de les justifier. Le modèle ne permet pas de mettre des valeurs floues, quantitatives ou incertaines par exemple. De plus, les règles de propagation et d'influences entre les risques restent à un niveau très basique, essentiellement construites sur des formules additives, moyennes ou maximums. Globalement, les flux entre les concepts sont modélisés de façon assez simple et ne permettent pas de modéliser correctement la complexité de la dynamique des risques et du projet de construction. Finalement, le choix de la plateforme d'implémentation (Excel) est cohérent vis-à-vis de l'utilisateur final (VCF), mais il limite la capacité d'évolution de l'outil (modification de la structure de la base de connaissances) et la capacité d'inférence ; ce dernier point est à l'origine du choix de modélisation des flux, qui, comme je l'ai indiqué, sont basés sur des règles simplistes et rigides.

4. PRM : CP-HPRM

Après avoir nous être focalisé sur la modélisation des risques (thèse de Mehdizadeh), puis entrepris de modéliser l'objet projet (thèse Tepeli), nous avons, dans le cadre de la thèse de Phuong Tran (avec Denys Breyse et Cédric Baudrit), approfondi ce travail sur la gestion des risques des projets de construction. Le but était de garder les points forts du MMRMP (i.e. proposer une vision holistique du projet et de ses risques, gérer l'apport progressif d'informations, proposer plusieurs niveaux de description, reposer sur une base de connaissances), tout en apportant une propagation plus fine des incertitudes dans le modèle et d'étendre les requêtes possibles (e.g. questionner le modèle sur la façon de procéder pour atteindre un objectif). Afin d'atteindre ces objectifs, nous avons proposé un modèle basé sur le modèle relationnel probabiliste multi-niveau (HPRM - Hierarchical Probabilistic Relational Model).

4.1. Présentation des HPRMs

Le PRM (Probabilistic Relational Model) est un modèle à base de graphes qui étend le formalisme des réseaux Bayésiens en lui adossant un modèle de connaissances (Getoor, Friedman et al. 2007). Le modèle de connaissances est un graphe composé de : (a) *concepts* reliés entre eux par des *relations* sémantiques, (b) *attributs* caractérisant les concepts, reliés entre eux par des relations d'influence. Les relations entre attributs traduisent leurs interdépendances et sont formalisées sous la forme de probabilités conditionnelles. Le formalisme des HPRMs ajoute par rapport aux PRMs, la relation d'héritage (relation *is a*), permettant de lier un concept à un ensemble de sous-concepts qui le spécifient, selon le paradigme orienté objet. Ces sous-concepts héritent des attributs du concept mais peuvent être également caractérisés par des attributs plus spécifiques. La **Figure 2.6** montre la

structure d'un HPRM décrivant deux niveaux de connaissances où *Actor* est un concept caractérisant tout type d'acteur impliqué dans le projet et *Productivity* est un attribut qui permet de caractériser la productivité des acteurs. *Contractor* est un sous-concept de *Actor* qui hérite de *Productivity* (symbolisé par des nœuds en pointillés sur la figure) et possède des attributs plus spécifiques comme *Expertise*.

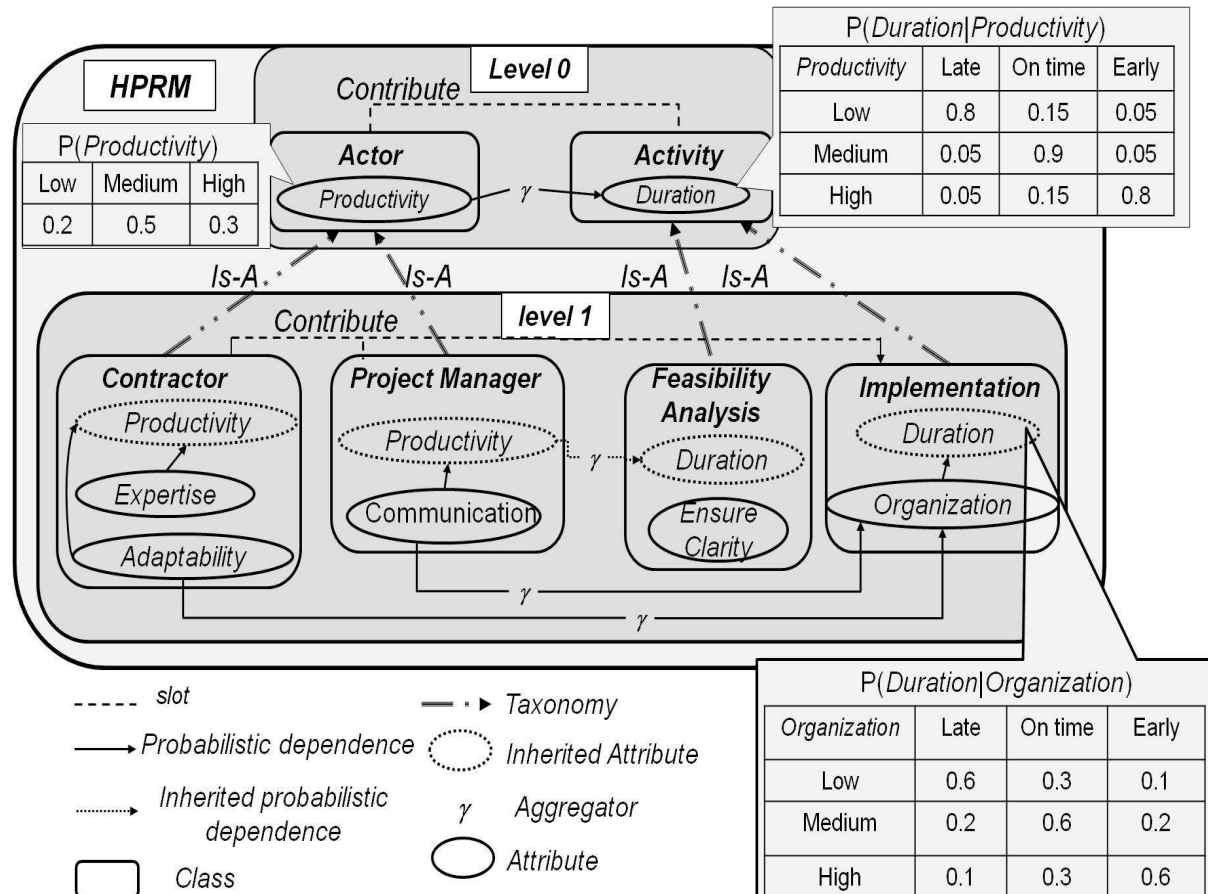


Fig 2.6. Exemple d'un HPRM issu de (Baudrit et al., 2018)

La structure au niveau 0 de la **Figure 2.6** montre que la durée de l'activité dépend de la productivité de l'acteur ou d'un ensemble d'acteurs (N.B. γ est un agrégateur permettant d'agréger la productivité de tous les acteurs participant à l'activité). Les liens en pointillés encodent les relations entre concepts. Les distributions de probabilités conditionnelles associées aux variables sont décrites à l'aide de tables de probabilités conditionnelles (CPTs) ; e.g. la table représentant la probabilité $P(Actor.Duration|(Actor.Realize^{-1}.Productivity))$ exprime dans quelle mesure la durée d'une activité peut être en retard, à l'heure, ou en avance, sachant la productivité des acteurs.

Le modèle peut être instancié vis-à-vis d'un système particulier (i.e. ici un projet de construction spécifique) ; cette instance, appelée *skeleton* dans les PRMs, génère un réseau bayésien sur lequel il est possible de faire différentes inférences (voir **partie 4.3**). Chaque attribut est alors associé à une distribution de probabilités qui peut être réactualisée selon les informations disponibles et la structure du graphe.

4.2. Modèle de connaissances générique

En nous basant sur l'architecture des HPRMs, nous avons construit un modèle de connaissances générique dédié aux projets de construction, appelé CP-HPRM. L'enjeu était de pouvoir modéliser tout type de projet, de prendre en compte différents niveaux de granularité, d'être capable de

modéliser les incertitudes et de simuler leur propagation en fonction des informations disponibles sur le projet. En reliant ces incertitudes avec des attributs liés aux objectifs du projet (e.g. coût, délai, qualité), il est alors possible d'analyser les risques liés aux projets de construction. Cela représente une différence importante par rapport aux modèles précédents passant explicitement par la notion de *Risk Event* (RE). Dans CP-HPRM, un RE correspond à une valeur imprécise, inattendue ou erronée sur un ou un ensemble d'attributs. L'avantage majeur de cette approche est de permettre une modélisation des interactions entre risques à partir de la modélisation du système projet. En revanche, on perd la représentation explicite du RE : le RE n'existe qu'au travers de la propagation des incertitudes.

Si des modèles génériques probabilistes (e.g. réseaux bayésiens, simulation Monte-Carlo, etc.) avaient déjà été utilisés pour simuler les risques dans les projets de construction (Wu, Yang et al. 2015, Chang and Ko 2017), les PRMs (et *a fortiori* les HPRMs) n'avaient encore fait l'objet d'aucune application dans ce domaine. Or les HPRMs proposent deux avantages majeurs par rapport aux modèles probabilistes classiques : (a) ils fournissent une structure générique qui peut être appliquée à toute nouvelle instance (projet spécifique) et (b) ils bénéficient de la structure orienté-objet les rendant particulièrement adaptés pour modéliser des systèmes à plusieurs niveaux de granularité. Le premier point est particulièrement important. En utilisant les réseaux bayésiens, un nouveau réseau doit être construit pour chaque nouveau projet : les nœuds (i.e. attributs) et leurs relations (CPTs) doivent être redéfinis à chaque application. Cela rend difficile et chronophage l'utilisation d'une telle approche et limite son utilisation dans des conditions opérationnelles réelles. Le HPRM permet de surmonter ce problème en s'appuyant sur une structure de connaissances générique valable pour chaque projet de construction ; l'utilisateur n'a qu'à expliciter les différentes instances (quels sont les acteurs, les activités...) et leurs relations (quel acteur travaille sur quelle activité...), c'est-à-dire fournir le *skeleton*. Tous les attributs et dépendances probabilistes (CPTs) sont déjà définis dans le modèle générique et n'ont pas besoin d'être redéfinis à chaque nouveau projet ; ils peuvent tout de même être modifiés par l'utilisateur sans altérer le modèle générique global.

CP-HPRM dispose de trois niveaux de granularité (macro, méso, micro). Il contient 6 entités de niveau macro possédant un total de 21 attributs (**Figure 2.7**), 19 entités et 148 attributs de niveau méso, et 40 entités et 625 attributs de niveau micro. Une description détaillée des entités, de leurs attributs et de leurs relations peut être trouvée dans (Tran 2018).

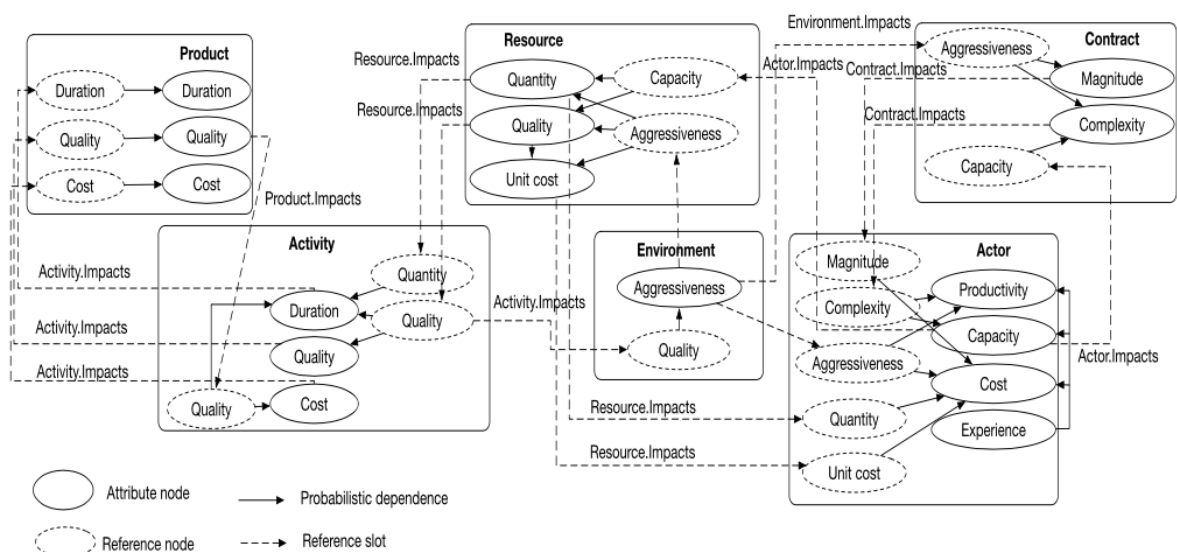


Fig 2.7. Relations entre attributs au niveau macro (Tran 2018)

La connaissance sur laquelle a été construite le modèle, est tout à la fois issue de la littérature scientifique, des travaux antérieurs menés (T-RBS, MMRMP) et de connaissances expertes de l'équipe de thèse. L'une des principales difficultés de la construction du modèle a porté sur la définition des CPTs (i.e. tableau de dépendance probabiliste reliant les attributs). Afin de réduire la longueur et la difficulté d'élicitation de ces connaissances, trois choix ont été faits : (a) tous les attributs sont évalués sur une même échelle discrète à 7 échelons (de *Strong Strong Negative* à *Strong Strong Positive*), (b) un agrégateur, noté γ , et basé sur une loi normale, est utilisé pour les attributs impactés par plusieurs attributs, (c) un jeu de CPTs type a été préconstruit laissant l'expert choisir chaque CPT au sein de ce jeu. Le point (b) est le plus impactant en termes de modèles car l'utilisation d'un agrégateur (voir (Baudrit et al., 2018) pour plus de détails) suppose de poser une hypothèse sur l'indépendance des influences des différents attributs (absence d'effets couplés). Par exemple, si une activité dépend de la productivité de deux acteurs, on suppose que l'influence de la productivité du premier est indépendante de l'influence de la productivité du second.

4.3. Utilisation de CP-HPRM

L'application de CP-HPRM à un projet réel consiste à définir le *skeleton* correspondant (c'est-à-dire l'ensemble des instances et leurs relations) sur la base du modèle de connaissances générique. L'utilisateur doit instancier les différentes entités formalisant les éléments du projet réel (par exemple, définir les acteurs, les activités...) et indiquer les relations entre ces instances tout en respectant le modèle générique (par exemple, une activité peut précéder une autre activité, une activité peut aboutir à un (ou plusieurs) produit(s)...). L'utilisateur peut également modifier les probabilités *a priori* ainsi que les CPTs par défaut, en remplaçant les distributions de probabilités selon sa propre connaissance du projet. A partir de ces éléments (i.e. *skeleton*), le CP-HPRM génère un réseau bayésien spécifique à ce projet sur lequel vont pouvoir être faites des inférences.

L'utilisateur peut alors simuler différents scénarios, c'est-à-dire spécifier un ensemble d'observations (e.g. l'environnement météorologique est très défavorable, le maître d'œuvre est particulièrement compétent) qui seront traduites en termes de distribution de probabilités sur les attributs de l'instance. Le CP-HPRM, en utilisant les inférences bayésiennes, peut alors estimer automatiquement la distribution de probabilité des variables d'intérêt de l'utilisateur (e.g. coût du projet, retard sur une activité, etc.). Le modèle permet de faire des inférences de type *forward* (e.g. *Quelle est la probabilité de retard sur mon projet, sachant que les études de sols ont été mal faites ?*) aussi bien que de type *backward* (e.g. *Quel devrait être la compétence de l'entreprise de gros-œuvre afin que mon projet se termine dans les temps ?*). De plus, comme tout réseau bayésien, le CP-HPRM est particulièrement adapté à l'ajout progressif de nouvelles informations et il permet alors d'évaluer leur impact par rapport aux variables du projet.

4.4. Applications

Dans le cadre de la thèse de P. Tran (Tran 2018), le CP-HPRM a été instancié vis-à-vis de deux projets réels. Le premier projet (2BS) consiste en la construction d'un pont dans la ville de Hue (Vietnam) ; ce projet sera plus détaillé dans la **partie 7.3**, qui compare les modèles CP-HPRM et SMACC2. Le second projet a pour objet la construction d'un institut de formation en soins infirmiers (IFSI), situé dans le Sud-Ouest de la France. Ce deuxième projet avait aussi fait l'objet d'une application du MMRMP (Tepeli 2014). Ces deux projets varient tant sur le type d'ouvrage, les montants en jeu, l'environnement du projet, les événements risqués pouvant l'affecter, et le déroulement du projet (i.e. atteinte des objectifs). En cela, l'application à ces deux projets était particulièrement intéressante pour démontrer la capacité du modèle à traiter des cas d'application réels et variés. Afin d'implémenter le modèle, un langage de domaine dédié à la modélisation des PRMs (Torti and WUILLEMIN 2017) appelé O3PRM (Open Object-Oriented Probabilistic Relational Model) a

été utilisé. O3PRM est interfacé avec la bibliothèque aGrUM (Gonzales, Torti et al. 2017), qui fournit un ensemble de fonctions permettant de réaliser les inférences bayésiennes.

Le projet 2BS a été utilisé : (a) en analysant la sensibilité de différents attributs, (b) en comparant les résultats de la simulation du déroulement du projet avec les observations réelles, et (c) en proposant et analysant les résultats d'un scénario alternatif dans lequel certains acteurs sont très performants. Le projet IFSI a été instancié sur les trois niveaux de granularité (macro, méso et micro). Ce projet a été utilisé : (a) en comparant les résultats de la simulation du déroulement du projet de construction avec les observations réelles, et (b) en comparant les résultats des simulations aux différents niveaux de granularité (cohérence entre les niveaux).

Ces applications ont permis d'exposer la capacité du modèle à être appliqué sur de vrais projets. Toutefois, elles ont aussi fait ressortir un certain nombre de limites du modèle actuel. J'en citerai ici trois qui me paraissent particulièrement importantes. La première porte sur la connaissance incluse dans le modèle (e.g. structure de la base de concepts, choix des CPTs...). Cette connaissance n'a pas fait l'objet d'une réelle validation (que ce soit une validation interne ou externe, voir **partie 7.2**). Elle devrait être vérifiée et consolidée afin de pouvoir être réellement opérationnelle. Une deuxième limite concerne la gestion des différents niveaux de granularité et de la cohérence des résultats entre les niveaux. Un premier pas a été fait dans la thèse de P. Tran en commençant à analyser la cohérence entre niveaux, mais il reste un travail important à faire sur ce point. Une dernière limite porte sur le temps de calcul nécessaire à la réalisation des inférences. Actuellement, faire une requête sur un cas d'application simple prend environ une heure sur un ordinateur de bureau standard, en raison du calcul des distributions de probabilités marginales pour tous les nœuds du réseau. L'utilisation du même modèle pour simuler des projets complexes nécessiterait de nouveaux développements méthodologiques ou de nouvelles stratégies d'implémentation (e.g. réduction de modèle, calcul approché, etc.).

5. ABM : SMACC1 & SMACC2

Les HPRMs permettent de formaliser le projet en prenant en compte les incertitudes et de propager les incertitudes dans le réseau qui modélise le système. Cependant, l'humain a un rôle central dans les projets de construction et vis-à-vis des risques associés (Walewski and Gibson 2003). Les modèles préalablement présentés proposaient une modélisation des humains, au mieux, que via leurs interactions avec les autres éléments du projet ; ils étaient traités de la même façon que tous les autres éléments du système. Cela correspond au niveau *boite noire* de la modélisation de l'humain, telle que présentée dans le **Chapitre 1 partie 5.4**. Une autre approche consiste à utiliser un modèle générique capable de modéliser l'humain avec une plus grande finesse afin de mieux saisir son influence sur le système. C'est dans cette perspective que différents travaux ont proposé d'utiliser le modèle Agent (*Agent-Based Model*, ABM) pour l'analyse des projets de construction. En effet, ce modèle générique est particulièrement adapté à un domaine qui implique de nombreux acteurs avec des intérêts et des objectifs pouvant être contradictoires et évolutifs tout au long du projet (Lin, Ho et al. 2017). Parmi ces travaux, certains se concentrent sur la phase de conception (Anumba, Ren et al. 2003), sur le choix de produits, de matériaux ou de méthodes de construction (Hadikusumo, Petchpong et al. 2005), sur les négociations entre les différents acteurs (Ren, Anumba et al. 2003) ou encore sur la gestion de l'approvisionnement (Xue, Li et al. 2005). Ces différents modèles ne s'intéressent pas au projet de construction dans son ensemble mais seulement à des étapes spécifiques et, pour la plupart d'entre eux, ne modélisent pas les incertitudes et risques qui y sont inhérents.

Dans une volonté plus holistique, j'ai développé SMACC (*Stochastic Multi-Agent model for Construction projeCt*), un ABM ayant pour objectif de simuler les projets de construction durant tout leur cycle de vie, depuis la phase de faisabilité jusqu'à la phase d'exploitation. Les ABMs sont

composés d'un ensemble d'entités autonomes, appelées agents. Chaque agent a son propre comportement, peut interagir avec d'autres agents et évoluer dans un environnement dynamique. Un agent est un concept polyvalent qui peut être un être humain (par exemple, un acteur de projet), une entité physique (par exemple, une ressource) ou un concept abstrait (par exemple, une activité). Chaque agent a sa propre vision du monde dans lequel il évolue, ainsi que son propre comportement (décision, action, réaction...). Chaque agent est défini localement et la complexité du système résulte des interactions entre eux.

SMACC formalise les processus de prise de décision propres aux différents acteurs participants aux projets et permet de prendre en compte les risques afin d'évaluer la durée, le coût et la qualité du projet. Il est basé sur une vision chronologique du projet et se focalise sur le rôle des différents acteurs pendant l'avancement du projet. SMACC a connu deux déclinaisons : SMACC1 (Taillandier, Taillandier et al. 2015) et SMACC2 (Taillandier, Taillandier et al. 2016). SMACC2 est une évolution de SMACC1 améliorant plusieurs points : (a) la formalisation de la connaissance, (b) la modélisation des ressources et des produits, (c) les dynamiques du modèle, (d) l'ajout d'évaluations qualitatives facilitant la calibration du modèle. Dans ce manuscrit, je ne décrirai que SMACC2 ; le détail des deux modèles est disponible dans les deux articles cités.

5.1. Présentation de SMACC2

Dans SMACC2, toutes les entités (e.g. activité, ressources, acteurs...) sont formalisées en tant qu'agents. Il prend en compte neuf types d'agents en relation et évoluant dans un environnement dynamique (**Figure 2.8**). Dans ce modèle, contrairement au CP-HPRM dans lequel le risque correspond à l'écart par rapport à la valeur attendue, les risques sont modélisés sous la forme de deux types d'agents autonomes : les REs (identiques aux REs des RBSs et du MMRMP) et les facteurs de risque (Risk Factor, noté RF). Un RF est une situation ayant une influence sur l'occurrence d'un (ou plusieurs) RE(s). Le principe du modèle est que tout agent, en évoluant dans le système, peut modifier les RFs ayant eux-mêmes une influence sur la survenance des REs. Par exemple, un acteur peut décider d'augmenter la pression sur ses équipes pour qu'elles travaillent plus rapidement. Mais cela génère un RF *Cadence de travail élevée*, qui augmente la probabilité du RE *Accident de chantier*.

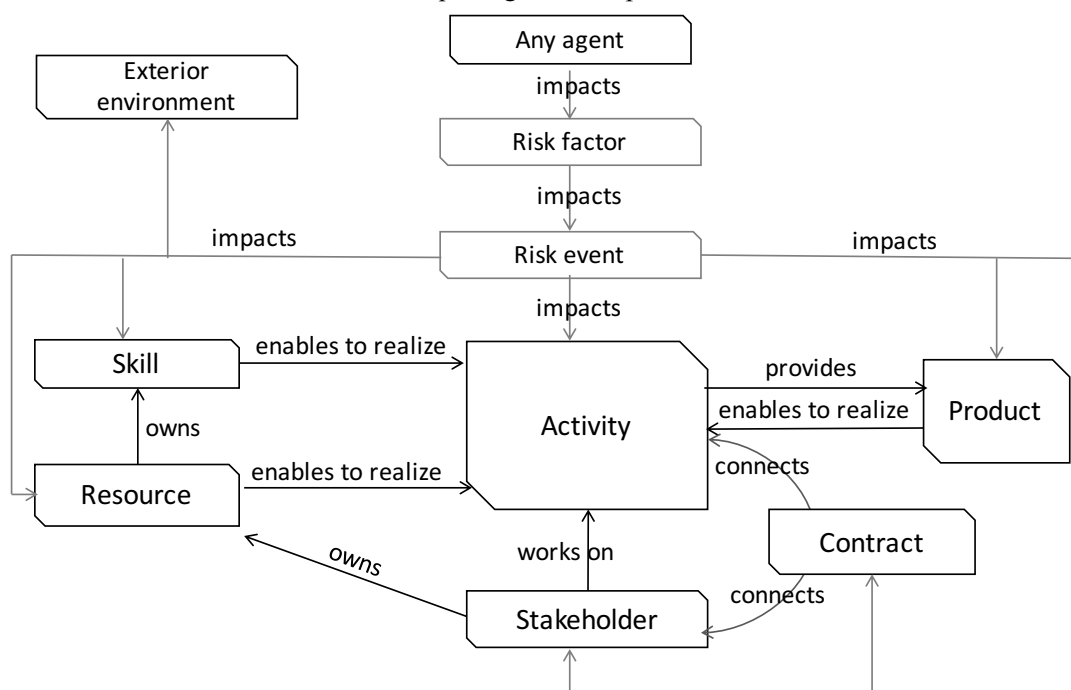


Fig 2.8. Agents dans SMACC2 (Taillandier, Taillandier et al. 2016)

Les ABMs simulent le fonctionnement du système en se basant sur une discrétisation du temps : à chaque pas de temps de la simulation, le modèle met à jour l'état du monde (ensemble des agents), en fonction du comportement des différents agents lors du pas de temps précédent. Dans SMACC2, le pas de temps correspond à 1 jour ouvrable. A chaque pas de la simulation (i.e. à chaque jour ouvrable), un processus similaire est reproduit (**Figure 2.9**).

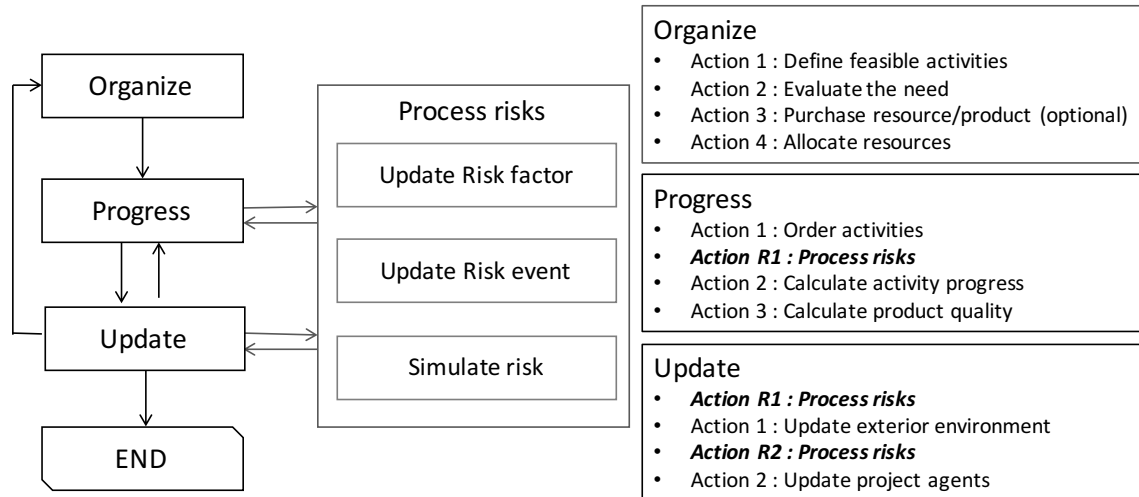


Fig 2.9. Dynamiques dans SMACC2 (Taillandier, Taillandier et al. 2016)

Les quatre phases (*Organize*, *Progress*, *Update* et *Process risks*) se déroulant lors de chaque pas de temps, sont décrites dans (Taillandier, Taillandier et al. 2016). La phase de risque intervient à plusieurs moments ; les REs peuvent altérer l'avancement d'activités (e.g. forte intempérie) pendant la phase *Progress*, impacter l'environnement (e.g. nouvelle réglementation) ou les autres agents (e.g. départ à la retraite d'un ingénieur) pendant la phase *Update*. L'aspect cognitif du processus (i.e. prise de décision des acteurs) se trouve dans la partie *Organize* : (a) les acteurs évaluent les besoins en termes de ressources pour faire avancer les activités sur lesquelles ils sont mobilisés, (b) à partir de cette évaluation et de leurs objectifs, ils peuvent se procurer des ressources (e.g. du béton, une équipe d'ouvriers) ou des produits (e.g. une dalle préfabriquée), et (c) les allouer aux activités concernées. Ces trois étapes seront aussi centrales dans le jeu sérieux Domego (voir **partie 6**). Le modèle cognitif est ici relativement simple et se base sur un vecteur de priorisation construit à partir de l'importance perçue des différentes activités réalisables, des moyens disponibles et des préférences (poids vis-à-vis de la rapidité, du coût et de la qualité) de l'acteur concerné. Le modèle ne propose pas, par exemple, de stratégie collective pour répondre à un problème. Ce point sera rediscuté dans le **Chapitre 5 partie 4.2**, où les bases de SMACC3 seront proposées.

5.2. Utilisation du SMACC2

SMACC2 a été implémenté sous la plateforme ABM GAMA (Grignard, Taillandier et al. 2013). GAMA propose un langage de programmation et un environnement dédiés aux ABMs ; il propose, en outre, un mode *batch* permettant de lancer un grand nombre de simulations, selon une logique de type Monte-Carlo, particulièrement utile pour SMACC. SMACC2 propose deux modes de simulation : (a) un mode *standard* avec une interface permettant de suivre, pas à pas, l'évolution d'une simulation (**Figure 2.10**) et (b) un mode *batch* sans interface, permettant d'effectuer un grand nombre de simulations. Le premier mode permet de vérifier la cohérence de la simulation et de comprendre son déroulement tout en ayant un suivi en temps réel des risques. Le deuxième mode permet d'effectuer une analyse statistique des résultats, indispensable en raison de la stochasticité du modèle.

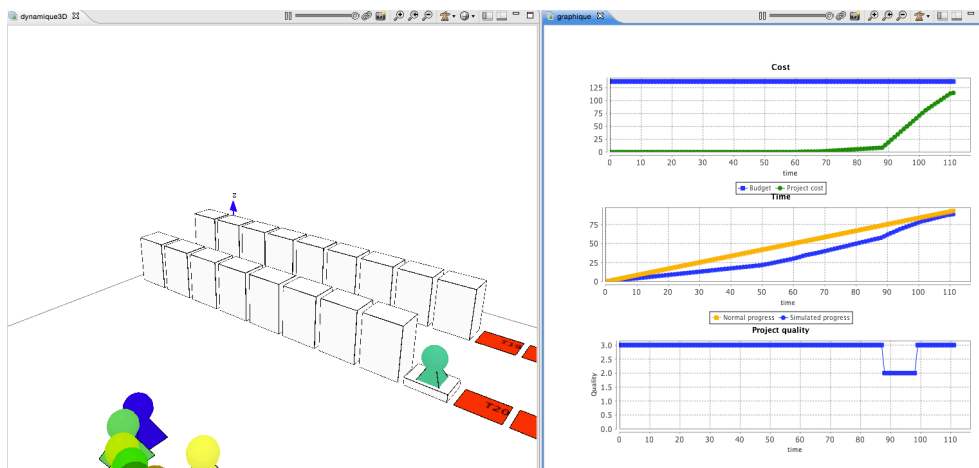


Fig 2.10. Interface de simulation de SMACC2 (Taillandier, Taillandier et al. 2016)

Pour appliquer le modèle à un projet réel, il est nécessaire d'instancier les agents. Cela nécessite de documenter des tables de données, décrivant les différents éléments du projet (acteurs, activités...). SMACC2 ne dispose pas d'une interface dédiée, ni de base de connaissances pour aider l'utilisateur à formaliser son projet et à définir les risques (REs et RCs) qui pourraient l'affecter. L'utilisateur peut s'appuyer sur les différents exemples de projet ayant déjà été instanciés, mais l'instanciation représente un vrai travail d'analyse, qui doit être conduit préalablement à la simulation ; ce point sera discuté dans la partie consacrée à SMACC3 (**Chapitre 5 partie 4.2**). A partir des données du projet, SMACC2 peut simuler le déroulement du projet en informant à tout moment l'utilisateur quant au coût, à la durée et à la qualité du projet ; il propose aussi différents indicateurs (e.g. équité entre les acteurs) et liste tous les REs qui se sont produits pendant la simulation (*registre de risque*). SMACC2 constitue donc une alternative à CP-HPRM en proposant un modèle se focalisant plus sur les différents acteurs. La **partie 7.3** est dédiée à la comparaison entre CP-HPRM et SMACC2.

6. Jeux sérieux : Domego

Les quatre modèles précédents sont destinés à des parties prenantes d'un projet de construction afin de les aider à analyser et gérer les risques liés à ce projet. Mais la connaissance des acteurs, des activités et des enjeux liés aux opérations de construction fait aussi partie des fondamentaux que tout étudiant en génie civil se doit d'apprendre pendant son cursus. En effet, quel que soit le métier auquel il se destine dans ce domaine (e.g. ingénieur d'études, assistant à la maîtrise d'ouvrage, maître d'œuvre, ingénieur travaux, etc.), il sera dans sa profession partie prenante d'une telle opération. L'apprentissage de ces connaissances est donc primordial. Cet apprentissage est cependant complexe : (a) il mobilise surtout de la connaissance théorique, (b) il est difficile de faire des travaux dirigés et encore plus des travaux pratiques sur ce sujet, et (c) il est difficile de faire comprendre les enjeux et les mécanismes sous-jacents (risques, équilibre entre les acteurs...). Souvent cette partie de l'enseignement est traitée sous la forme d'un cours magistral, mais de tels cours ont de plus en plus de mal à rencontrer un écho suffisant auprès des nouvelles générations d'étudiants (Baker, Matulich et al. 2007) i.e. la génération Z (naissance après l'an 2000 (Ozkan and Solmaz 2015)), tout comme la génération Y (naissance entre 1980 et 1999 (Lissitsa and Kol 2016)).

Une des réponses à ce problème est la ludification (ou *gamification*) de l'apprentissage, qui consiste à utiliser les mécanismes du jeu dans le cadre d'une activité (ici l'enseignement) afin de rendre celle-ci plus attractive (Hamari, Koivisto et al. 2014). Le recours aux jeux sérieux (*serious games*) s'intègre à cette approche. Un jeu sérieux est un jeu utilisé à d'autres fins que celle du seul divertissement (apprentissage, entraînement...) (Michael and Chen 2006). La littérature atteste de plusieurs avantages des jeux sérieux en termes de motivation, d'engagement, de représentation et

compréhension des connaissances, de leur mise en application et de leur apprentissage durable (Sauvé, Renaud et al. 2007, Crocco, Offenholley et al. 2016). Les jeux sérieux ont déjà été utilisés avec succès pour l'enseignement de la gestion des risques naturels (Taillandier and Adam 2018), de l'informatique (Oliveira, Cintra et al. 2013), de la sécurité incendie (Rüppel and Schatz 2011), etc. Mais il y a encore peu d'applications, à l'heure actuelle, dans le domaine du génie civil, et aucun jeu sérieux n'a été proposé, à ma connaissance, pour apprendre à des étudiants les enjeux d'un projet de construction.

Pour combler ce manque, j'ai créé Domego (« Bâtiment » en espéranto), un jeu sérieux visant à faire comprendre et apprendre aux étudiants les acteurs, les étapes et les enjeux d'un projet de construction. Domego est un jeu de plateau pour 2 à 6 joueurs dans lequel chaque joueur prend le rôle d'un acteur du projet. L'objectif des joueurs est double : collectivement, ils doivent faire en sorte que le projet se déroule au mieux et individuellement, ils doivent assurer la pérennité de leur activité en répondant à différents objectifs (faire des bénéfices, assurer leur renommée...). L'enjeu est de placer l'étudiant dans une position active d'acquisition du savoir (approche constructiviste) et d'utiliser la motivation induite par le côté ludique du jeu pour leur faire acquérir en profondeur des connaissances.

6.1. Présentation de Domego

Domego est un jeu de gestion de ressources, asymétrique, avec un double niveau d'objectif (local et global). Ce double niveau d'objectif permet de faire comprendre aux joueurs l'intérêt de la communication et de la mise en place d'une confiance partagée entre les différents acteurs.

Principe du jeu. Dans Domego, chaque joueur va prendre le rôle d'un acteur. Il reçoit ainsi en début de jeu une carte *Acteur*, parmi les six possibles (maitre d'ouvrage, maitre d'œuvre, bureau d'études...), précisant son rôle dans le projet, ses objectifs et son argent de départ. Le plateau de jeu est composé d'un ensemble de douze fiches *Activité* (exemple en **Figure 2.11**) ; elles sont au cœur de la mécanique de jeu. Elles sont numérotées de 1 à 12 et suivent le déroulement du projet de construction, depuis l'étude de faisabilité jusqu'à la livraison du bâtiment. Chaque tour de jeu prend la forme d'une fiche *Activité*. En plus de contenir une description de l'activité, celle-ci précise les acteurs concernés via un code couleur, les ressources nécessaires à sa réalisation, la durée de l'activité et le nombre potentiel de risques associés. Les ressources demandées peuvent appartenir à trois catégories : les ressources minimales demandées pour accomplir l'activité (symbolisées par une main tenant un sac), les ressources allouées à la gestion des risques (symbolisées par une personne chutant) et les ressources supplémentaires permettant de diminuer la durée de l'activité (symbolisées par un sablier). Les ressources déposées en plus du coût minimum nécessaire (i.e. de manière à réduire les risques et les délais) vont avoir un impact positif pour tous, mais représentent un coût que doit supporter le(s) acteur(s) en question.

Tous les tours de jeu (i.e. chaque fiche *Activité*) se déroulent selon le même ordre : (1) s'il y en a, on effectue les actions spéciales (*négociation & contractualisation* et *prévision de ressources*), (2) les acteurs concernés affectent des ressources à l'*Activité*, (3) on tire un nombre de cartes *Risque* équivalent au nombre donné par l'*Activité* (e.g. 4 sur la carte de la **Figure 2.11**) auquel on retranche les risques gérés par les joueurs, (4) on fait le bilan de l'activité (remise à jour du coût global, de la durée et de la qualité du projet). Si l'activité qui vient d'être réalisée est la dernière, on peut alors faire suivre ce bilan par le décompte final des points. Pour cela, chaque joueur calcule ses points de victoire en fonction de ses objectifs. L'ensemble des règles et du matériel de jeu est disponible sur : <https://www.i2m.u-bordeaux.fr/Projets/Autres-projets2/Domego>.

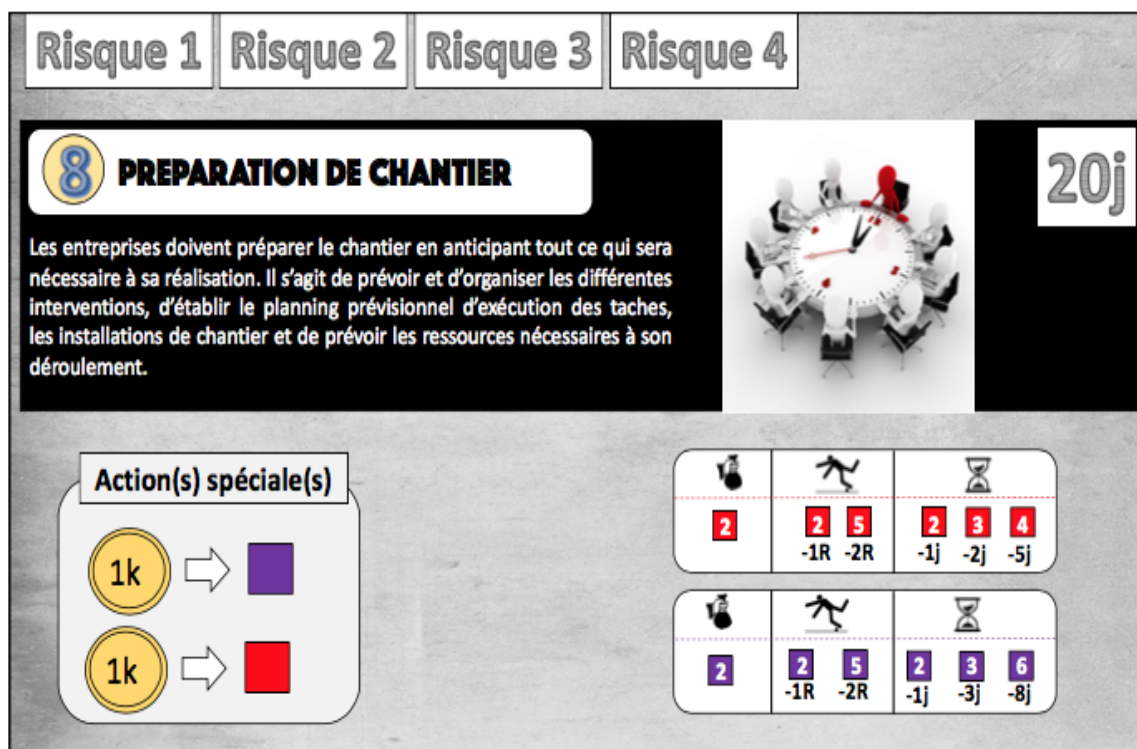


Fig 2.11. Exemple de fiche Activité issu de (Taillandier, Micolier et al. 2018)

6.2. Utiliser Domego dans l'enseignement

Domego vise à faire apprendre plusieurs notions aux étudiants : (a) les phases et les acteurs d'un projet de construction, (b) les enjeux associés à chaque acteur, (c) la conciliation entre intérêt personnel et collectif, l'importance (d) de la communication et de la concertation entre les acteurs, (e) de l'anticipation et de la préparation, de la gestion des risques et enfin (g) la propagation des défaillances d'une phase à l'autre. Tous ces aspects sont mis en jeu au travers des mécaniques retenues. Par exemple, si les joueurs décident de mettre peu de ressources dans les phases d'études en amont du projet, ils ont de grandes chances d'augmenter le nombre de risques dans les phases de chantier entraînant de grosses défaillances dans les dernières phases du chantier.

Domego a été conçu pour s'insérer dans une séquence pédagogique destinée à un groupe de 5 à 24 étudiants. Le jeu étant conçu pour 2 à 6 joueurs, à 24 joueurs, il faudra organiser 4 parties (successives ou en parallèle). Il est conseillé d'avoir un référent (enseignant ou assistant) par partie. Son rôle est d'assurer la bonne compréhension des règles, de gérer les bilans en fin d'activité, de veiller à ce que les étudiants lisent bien les cartes activités et d'expliquer les risques. Il doit aussi introduire durant le jeu des éléments de connaissances lorsque l'occasion se présente (e.g. expliquer pourquoi tel acteur intervient sur telle activité).

La séquence pédagogique est décomposée en quatre phases : (a) explication du contexte et des règles, (b) assignation et lecture des rôles, (c) partie de jeu, (d) débriefing. La durée d'une partie se situe entre 30 et 50 min. La phase de débriefing constitue un point central de l'apprentissage par un jeu sérieux (Crookall 2010). Il consiste à demander aux étudiants de raconter leur partie, la façon dont ils pensent qu'il aurait fallu qu'ils jouent pour maximiser leur score et enfin ce qu'ils ont compris des enseignements du jeu. L'enseignant profite de ces discussions pour exposer les concepts à apprendre (e.g. importance de la concertation) et les remettre en perspective par rapport aux expériences de jeu des étudiants. Le débriefing est prévu pour durer 30 minutes environ et la séquence pédagogique, dans sa totalité, est calibrée pour un créneau de 1h30.

Pour être efficace, la séquence pédagogique doit être combinée à un enseignement plus classique avec des supports de type polycopié/projection vidéo. En effet, les cours classiques permettent d’aller plus loin dans la quantité de connaissances délivrées alors que le jeu sérieux permet d’accroître la motivation et la compréhension des mécanismes profonds (Wouters, Spek et al. 2009). Les deux formes d’enseignement sont ainsi très complémentaires.

6.3. Expérimentation

Domego a été utilisé dans le cadre du cours de sensibilisation au génie civil destiné aux étudiants de Licence 2, parcours Sciences de l’ingénieur. 18 étudiants ont pu suivre la séquence pédagogique exposée précédemment. Quatre parties de jeu ont été organisées (2 en parallèle). Un référent enseignant était présent à chaque table de jeu et a pris part au jeu afin d’aider les joueurs et de renforcer l’immersion.

Lors du débriefing les étudiants ont été amenés à s’exprimer sur leur expérience de jeu, sur ce qu’ils pensaient avoir appris ou compris des connaissances apportées par le jeu et sur leur avis sur le jeu. Les réactions sur le jeu lors du débriefing se sont révélées très positives. Afin de consolider ces résultats, il a été demandé aux étudiants de remplir un questionnaire sur le jeu relatif à leur appréciation du jeu. Les questions étaient évaluées sur une échelle de 1 (très mauvais) à 10 (excellent) et portaient sur différents aspects ; les résultats sont présentés dans la **Figure 2.12**. Cela va dans le même sens que le débriefing et montre la très bonne réception du jeu par les étudiants.

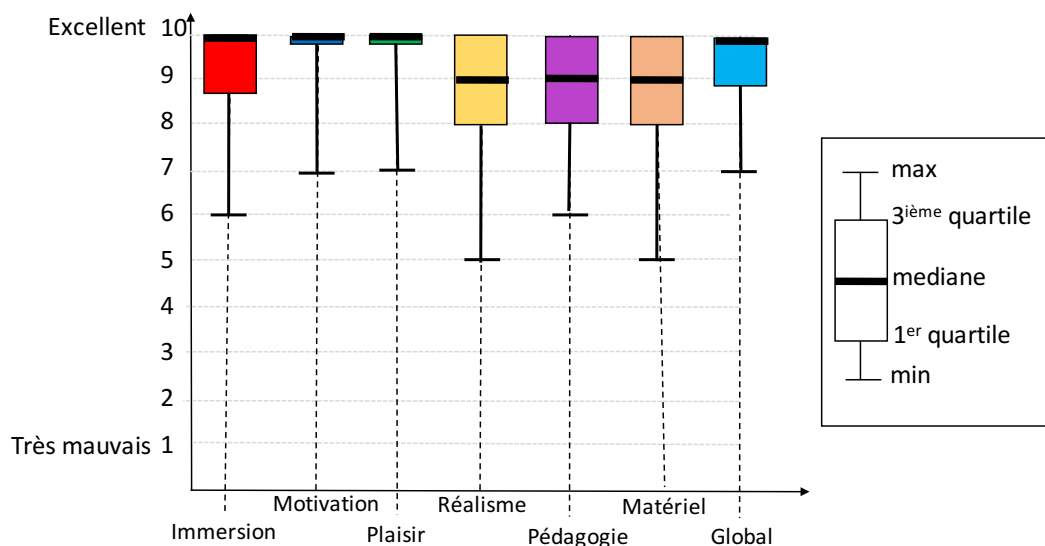


Fig 2.12. Résultats du questionnaire sur l’appréciation du jeu par les étudiants

Bien évidemment, les résultats exposés ne sauraient constituer à eux-seuls une validation de l’approche retenue. En effet, l’objectif premier de Domego était de permettre aux étudiants de mieux apprendre que par un cours classique. Or, les résultats ne permettent pas de le garantir. Ce point sera discuté dans la **partie 7.2**. Cependant, les résultats de l’expérimentation (i.e. retour des étudiants) sont très encourageants et Domego sera réutilisé dans les prochaines années pour ce même cours.

7. Discussion

Dans cette partie, je reviendrai sur plusieurs éléments abordés dans ce chapitre et qui méritent d’être plus largement discutés et développés. Je proposerai aussi, en **partie 7.1**, une lecture de la trajectoire de notre travail sur la modélisation des risques dans les projets de construction au travers de l’analyse de l’évolution des modèles ; le ‘nous’ renvoie ici à un travail d’équipe, incluant plusieurs chercheurs et doctorants.

7.1. Evolution des modèles

Les travaux que j'ai pu faire sur les projets de construction s'étalent sur plus de 8 ans (2010-2018). Ces travaux ont profité tout à la fois de l'évolution des méthodes et des approches dans les champs scientifiques abordés, que de mon évolution, tant en termes de positionnement que de méthodes. Ces travaux recouvrent les modèles présentés dans ce chapitre (T-RBS, MMRMP, SMACC, CP-HPRM et Domego), et d'autres travaux auxquels j'ai participé plus marginalement (e.g. Thèse d'Elodie Rodney sur les projets de construction dans le domaine des énergies renouvelables (Rodney 2016)). L'étude de cette évolution peut se faire selon quatre dimensions : (a) l'holisme, (b) les sources de connaissances, (c) l'introduction et la maîtrise de nouveaux modèles génériques, et (d) la maturation de la réflexion sur le domaine.

Ambition holistique. Les premiers travaux présentés dans ce chapitre (T-RBS), qui sont les plus anciens, se focalisaient sur les risques. Le projet en lui-même n'y était pas du tout modélisé, ni l'environnement du projet, pourtant indispensable pour s'inscrire dans la logique du système ouverte présentée au **Chapitre 1 partie 1**. Ces travaux proposaient une vision réduite du système, limitant la capacité du modèle à représenter le monde et la compréhension du lien entre projet et risques ; cela apparaissant comme une lacune majeure. Dès le deuxième modèle (MMRMP), le besoin de modéliser non seulement les risques, mais aussi le projet lui-même s'est fait ressentir pour mieux comprendre la dynamique du système et le processus de risque. Ce nouveau modèle a capitalisé les connaissances développées dans le modèle T-RBS (notamment la base de REs), tout en développant la dimension projet et en formalisant l'environnement du projet. De plus, nous avons introduit dans ce modèle la dimension multi-niveau, permettant de formaliser les concepts selon différentes granularités de description. Le MMRMP propose une représentation du système s'inscrivant dans une logique plus systémique et holistique. Cependant, le modèle développé restait limité par la vision qui l'a porté, celle d'une entreprise de construction. En effet, le modèle a été construit dans le cadre d'une thèse CIFRE portée par une entreprise de construction. C'est au travers de ce prisme que sont vus le projet et les risques inhérents. Cela a des conséquences sur le modèle et la base de connaissances liée. Par exemple, les phases amont (e.g. études d'impacts, de faisabilité, etc.) assurées par la maîtrise d'ouvrage ne sont pas intégrées dans la base de connaissances. Les modèles suivants (CP-HPRM et SMACC2) avaient une ambition de neutralité de vision, se positionnant vis-à-vis d'une entité virtuelle, le projet lui-même. En cela, ils ont une approche plus holistique que MMRMP. En termes de périmètre du système, ces deux modèles sont assez équivalents ; les concepts sont sensiblement différents (e.g. RE présent dans SMACC2 et non dans CP-HPRM, où les risques sont traités par les dépendances probabilistes), mais la limite de description du projet est traitée de la même façon. Ils abordent en tout cas, tous les deux, le système des projets de construction, en accord avec mon approche d'holisme mineur.

Source de connaissances. Le modèle de T-RBS est avant tout construit sur la base de la littérature scientifique. La structure de modèle et toute la base de connaissances sont issues d'une recherche bibliographique (étude de livres et d'articles). Les travaux sur le MMRMP étaient avant tout basés sur une connaissance opérationnelle et experte, et des études de cas apportées par l'entreprise partenaire (VCF). Bien évidemment, le MMRMP, postérieur à T-RBS a aussi puisé des connaissances issues de celui-ci. Ainsi, indirectement, il contient des connaissances issues de la littérature scientifique et technique. Mais la structure même du modèle est fortement marquée par la connaissance dont il est issu et par la volonté opérationnelle qui l'a portée. Les deux autres modèles de simulation (CP-HPRM et SMACC) ont bénéficié des connaissances issues des deux premiers modèles (scientifique, technique, opérationnelle et étude de cas). Ils ont pu aussi bénéficier de connaissances liées aux modèles génériques retenus (e.g. ABM (Rojas and Mukherjee 2006), réseaux bayésiens (Oliva, Weber et al. 2010)) et à une étude des ontologies développées dans le domaine des

projets de construction (e.g. (El-Diraby, Lima et al. 2005, Fidan, Dikmen et al. 2011, Zhong and Li 2015)). Enfin, à cela s'ajoute une expertise acquise au fil du temps par les chercheurs eux-mêmes qui a pu aussi se traduire sous la forme de connaissances expertes. Ces deux derniers modèles sont donc les plus riches et aboutis en termes de connaissances.

Modèle générique. Le recours à un modèle générique requiert que le chercheur le connaisse et le maîtrise. Cette connaissance portée par le chercheur peut fortement conditionner l'usage d'un modèle générique, d'autant plus lorsque l'on s'oriente vers des modèles génériques n'ayant pas (ou peu) fait l'objet d'applications dans le domaine. Le premier modèle générique (RBS) était déjà utilisé dans le domaine de la gestion des risques, il lui était même dédié. Son application aux projets de construction était naturelle. L'innovation venait, non de son usage, mais de développements méthodologiques et gnoséologiques autour du modèle générique. Le second (RMPMP) est basé sur une analyse systémique. Il n'est pas porté par un modèle générique clairement formalisé. C'est là l'une de ses faiblesses, car sans ce support, il était nécessaire de définir toutes les lois/règles intrinsèques du modèle. De ce fait, il a fallu souvent simplifier et limiter la richesse des règles pour en permettre la modélisation et la simulation dans un temps raisonnable. Ce dernier point était d'autant plus critique que l'implémentation sous Excel limitait les inférences possibles. CP-HPRM et SMACC, portés par des modèles génériques évolués (resp. HPRM et ABM) ont pu exploiter les forces de ces modèles génériques. Pour élaborer ces modèles, nous avons pu nous baser sur les réflexions apportées lors de la conception de RMPMP, et sur les travaux de thèse d'Elodie Rodney. E. Rodney est partie des concepts du RMPMP, mais elle a approfondi la question de la cohérence entre les niveaux de genericité du modèle, depuis un modèle applicable à tout type de projet à un modèle dédié à un type spécifique. Elle a ainsi travaillé sur la cohérence aussi bien au fil des phases des projets qu'entre les attributs définis sur des variables plus ou moins spécifiques. Ces réflexions sur la genericité et la structure du modèle ont été réutilisées dans CP-HPRM et SMACC. Ces deux derniers modèles ont pour avantage majeur, par rapport aux modèles antérieurs, leur capacité à formaliser les interdépendances et les dynamiques du système et notamment le processus de risque sans escamoter sa complexité. De plus, ces modèles de par leur expressivité (ABM) ou leur capacité d'inférences (HPRM) peuvent permettre à l'utilisateur de gagner en connaissances (voir **partie 7.4**). Une comparaison plus fine de ces deux derniers modèles est proposée en **partie 7.3**.

Progression du chercheur. Le dernier point traçant cette évolution se positionne au niveau *Chercheur* (voir **Introduction partie 4**). Cette évolution des modèles en suit une autre en parallèle, la mienne en tant que modélisateur, progressant, tant dans la connaissance du système que dans celle des modèles génériques. Cette progression m'a permis de mieux comprendre les enjeux du système et les verrous scientifiques liés à sa modélisation. Au travers d'une meilleure maîtrise des modèles génériques, j'ai pu proposer de nouvelles pistes de modélisation et aussi améliorer pour un même modèle générique la façon de modéliser le système. Cela a été le cas, par exemple, avec les deux itérations de SMACC, séparées de deux ans et qui m'ont permis de progresser sur ma maîtrise des ABMs. La création de SMACC2 était guidée par une volonté de mieux structurer les agents du système (amélioration de la connaissance) mais aussi de limiter le nombre de paramètres et de faciliter leur définition. Cela permet de faciliter l'utilisation et la validation du modèle (voir **partie 7.2**). Ma maîtrise des ABMs ayant encore progressé depuis SMACC2, au travers notamment du développement de nouveaux modèles (e.g. SPRITE (Taillandier and Adam 2018) et Li-BIM (Taillandier, Taillandier et al. 2017) présenté dans le **Chapitre 3 partie 3**), une nouvelle version de SMACC est en cours de préparation (**Chapitre 5 partie 4.2**).

7.2. Validation

Une question importante pour tous les modèles complexes est celle de leur validation. C'est une question difficile car elle demande de comprendre ce que représente le terme de validation et ce qui est peut-être validé. Au sens scientifique classique, la validation consiste à vérifier que les données en sorties du modèle sont proches de celles du monde, pour des jeux de données couvrant le domaine attendu de variation des données. Si cela peut avoir du sens dans un cadre de sciences expérimentales où il est possible de générer un grand nombre d'observations dans des conditions maîtrisées, il en est autrement pour les projets de construction. Comme l'indique la norme ISO 10006 (ISO 2003), un projet est un *processus unique*. Chaque projet est différent des autres, bien qu'il y ait évidemment des similitudes entre eux, induisant un déroulement à chaque fois unique. De plus, le déroulement du projet est teinté d'incertitudes (voir **partie 1**), avec des incertitudes tant épistémiques que stochastiques (voir **Chapitre 1 partie 4**). Cela rend le déroulement du projet fortement aléatoire limitant d'autant la possibilité de prédiction. Ainsi, ce type de validation classique, appelée validation externe par Amblard, Rouchier et al. (2006), n'est pas accessible dans ce contexte ; il faudrait pouvoir reproduire le même projet un très grand nombre de fois et vérifier que les distributions obtenues sont cohérentes avec celles produites par le modèle. Cela est bien sûr impossible. Par ailleurs, la validation externe n'est presque jamais possible pour les systèmes complexes et notamment pour ceux abordés dans le cadre de ce manuscrit. Ainsi, je me contenterai d'une validation interne pour l'ensemble de mes modèles. La validation interne intègre trois éléments (Amblard, Rouchier et al. 2006) : une vérification de la conformité entre la question de modélisation et la réponse apportée par le modèle, la cohérence interne systémique du modèle et une analyse de sensibilité pour explorer le modèle et vérifier la pertinence de sa réponse.

Pour tous les modèles présentés dans ce chapitre, la validation interne s'est faite en : (a) soumettant le modèle à des experts pour qu'ils évaluent la cohérence des concepts, des relations/interactions et des dynamiques, (b) explorant les modèles implémentés sur des cas tests pour lesquels on a fait varier les paramètres tout en vérifiant la cohérence des sorties obtenues, (c) instanciant les modèles sur des projets réels pour vérifier leur capacité à proposer des réponses cohérentes, (d) analysant leurs qualités et limites au regard de la question de modélisation posée. Une partie de ces éléments sont disponibles dans les articles sur les modèles et les manuscrits de thèse (voir **Annexes B et C**).

La question de la validation se pose un peu différemment pour les jeux sérieux comme l'est Domego. La validation interne intègre deux composantes : (a) la vérification des connaissances internes au jeu (e.g. description du rôle des acteurs, des activités...), et (b) le ressenti des étudiants (e.g. motivation à jouer, sentiment d'avoir compris les concepts...). Pour répondre au premier point, les connaissances ont été validées par l'enseignante en gestion de projet de construction, en charge du cours donné aux étudiants de L2 de Bordeaux. Pour le deuxième point, les résultats présentés dans la **partie 6.3** (i.e. retour sur le ressenti des étudiants lors du débriefing et questionnaire) permettent de répondre à cet élément de validation. Pour une validation externe, il aurait fallu comparer sur un examen, deux groupes d'étudiants, l'un apprenant avec Domego et l'autre avec un cours classique ; c'est la seule façon de pouvoir évaluer en quoi Domego peut être plus efficace qu'un cours classique pour l'apprentissage. En plus de la complexité de mise en œuvre, cela pose différents problèmes : taille des groupes pour limiter la variabilité interpersonnelle, formulation des questions de l'examen, temps entre le cours et l'examen (N.B. pour évaluer la pérennité de l'acquisition des connaissances), etc. Cette phase de validation n'a pas été menée et elle n'est pas prévue à l'heure actuelle. Ainsi, pour ce modèle aussi, je me contenterai de la validation interne.

7.3. PRM Vs ABM

J'ai présenté dans ce chapitre, plusieurs modèles ayant trait aux projets de construction. Parmi ceux-ci, et en excluant Domego qui a un objectif différent (enseignement), les deux plus avancés sont CP-HPRM (**partie 4**) et SMACC2 (**partie 5**). Ces deux modèles répondent à une même ambition : simuler les projets de construction dans leur complexité. Une question légitime est alors de savoir lequel des deux est le plus intéressant et propose les résultats les plus pertinents. Afin de répondre à cette question, ils ont été appliqués à un même projet de construction (projet réel), et les résultats comparés. Le projet, appelé 2BS, consiste en la rénovation d'une route et d'un pont à Hue (Vietnam). Le projet 2BS a été réalisé en 2013 ; il devait être réalisé en 10 mois et coûter 6,25 milliard de VND (dongs vietnamiens, soit environ 250 000 €). Mais différents événements qui se sont produits au cours du projet, ont induit des surcoûts (8%) et des retards (20%) : e.g. augmentation du salaire minimum des travailleurs, forte inflation, température plus élevée que la normale, tempête provoquant une inondation, etc.

J'ai instancié les deux modèles (CP-HPRM et SMACC2) vis-à-vis de ce projet afin d'évaluer leur capacité de prédiction. Considérant que les deux modèles ne disposent pas des mêmes entités (concepts, relations, paramètres...), la phase d'instanciation s'est faite avec pour point d'entrée le projet réel lui-même, sans chercher à homogénéiser les deux modèles instanciés. La **Figure 2.13** présente les résultats de simulation obtenus ainsi que la valeur du projet réel sur les 3 objectifs (coût, délai, qualité). Afin de pouvoir comparer les résultats, étant donné que CP-HPRM (contrairement à SMACC2) ne propose que des évaluations sur des échelles discrètes, tous les résultats ont été remis sur cette même échelle en considérant des bornes pour chaque catégorie (e.g. pour la durée, la catégorie *Negative* -N- correspond à un retard entre 10 et 30 jours). Pour SMACC2, les résultats obtenus sont construits sur la base de 5000 itérations (approche Monte-Carlo).

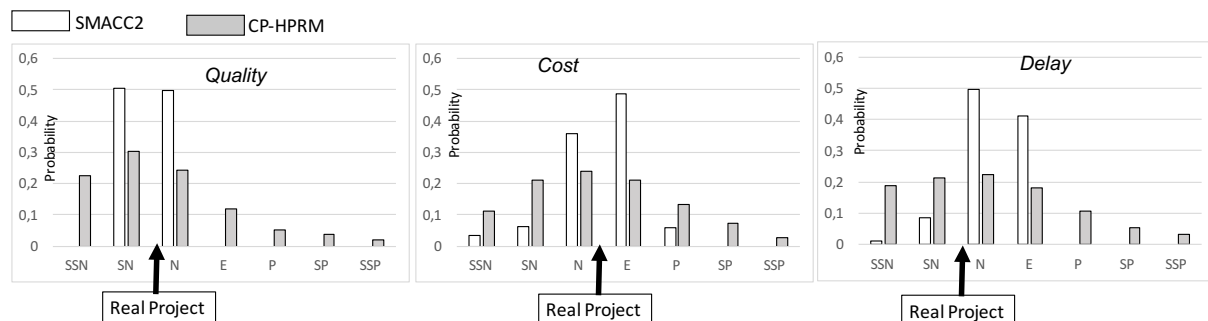


Fig 2.13. Résultats de la simulation du projet 2BS par SMACC2 et CP-HPRM

Les résultats donnés par les deux modèles sont cohérents et pertinents vis à vis de ceux du projet réel (validation interne). Mais ce n'est pas sur ce point que je chercherai à les comparer mais sur (a) ce qu'ils peuvent modéliser, (b) le type de sorties fournies et les connaissances qui peuvent être tirées des simulations, et (c) la capacité des deux modèles à être utilisés pour un projet dans un contexte opérationnel réel.

Modélisation. SMACC2 se concentre sur les acteurs et leur donne des capacités cognitives, ce qui permet de les modéliser de façon plus réaliste. Il peut notamment modéliser la rétroaction : un agent peut analyser son environnement et la situation actuelle, afin d'adapter dynamiquement son comportement. Par exemple, si un acteur du projet travaille sur une activité qui est en retard, en raison d'un manque de ressources (e.g. une équipe d'ouvriers mal dimensionnée), le modèle lui permet d'embaucher plus d'ouvriers afin de compenser ce retard. Ce type de rétroaction est difficile à modéliser avec CP-HPRM qui ne permet pas de modéliser les dépendances cycliques. Par exemple, il n'est pas possible d'avoir une ressource ayant un impact sur un acteur qui a lui-même un impact sur la

même ressource sans intégrer une dimension temporelle sur les attributs et/ou entités. La prise en compte des entités dépendantes du temps dans les HPRMs est théoriquement possible, mais ajoute une nouvelle complexité au modèle tout en rendant les inférences difficiles à résoudre dans un délai raisonnable ; le modèle CP-HPRM ne propose pas de modélisation temporelle.

Sorties. CP-HPRM a un avantage intéressant sur SMACC2 : la capacité à permettre les inférences inverses (*backward*). Par exemple, dans le cadre de l'application, le modèle peut être utilisé pour répondre à des questions de type : *Quelle devrait être la productivité du fournisseur afin d'avoir une qualité de construction meilleure que prévue ?* Ce type de requête n'est pas possible avec les ABMs (du moins pas directement) qui suivent l'avancement chronologique de l'évolution du système. Cette même limite est par ailleurs présente dans la plupart des modèles de gestion de projet de construction. Le CP-HPRM permet aussi de questionner le système sur n'importe quelle variable du système et d'ajouter rapidement de nouvelles observations et/ou suppositions. Il permet ainsi une manipulation plus facile des valeurs sur les attributs.

Expressivité. Si SMACC2 est plus limité en termes de type de requêtes possibles, il présente un avantage par rapport à CP-HPRM en fournissant une représentation explicite et intuitive du déroulement du projet, facilitant la compréhension du modèle et de la simulation. En mode standard, l'utilisateur peut suivre l'avancement du projet via l'interface qui l'aide à suivre et à comprendre l'impact des REs lorsque ceux-ci se produisent. SMACC2 repose également sur une modélisation plus réaliste des acteurs du projet, cherchant à reproduire leur comportement réel, ce qui facilite la projection des acteurs dans le modèle. CP-HPRM ne modélise que les dépendances et se base sur le formalisme probabiliste qui n'est pas toujours bien maîtrisé par les acteurs des projets de construction. En ce sens, SMACC2 dispose d'une capacité plus forte à faire comprendre et réfléchir les parties prenantes autour du modèle et de la simulation.

Conditions opérationnelles. CP-HPRM présente deux avantages principaux quant à son usage dans un cadre réel : (a) une base de connaissances et (b) le caractère générique de la base de connaissance. L'instanciation du modèle nécessite un ensemble limité de données/paramètres. Il permet à un chef de projet d'instancier rapidement un nouveau projet, ce qui le rend plus facile et plus simple à utiliser. De plus, la structure du modèle et les CPTs peuvent facilement être enrichies et mises à jour chaque fois qu'une nouvelle information est disponible. Une entreprise pourrait développer ses propres connaissances à partir d'une série de projets spécifiques et améliorer progressivement la pertinence du modèle. SMACC2 s'appuie également sur une représentation structurée du projet de construction permettant de définir rapidement les agents instanciés. Mais le modèle ne propose pas de base de connaissances pour faciliter leur évaluation (i.e. valeur affectée aux attributs de chaque instance d'agent), rendant cette tâche assez complexe et chronophage. L'instanciation de SMACC2 nécessite une bonne connaissance du projet et du modèle pour être en mesure de bien renseigner tous les champs. La principale difficulté consiste à définir les facteurs de risque (RFs) et les événements risqués (REs) car cela nécessite une analyse préalable des risques du projet. Une solution serait de s'appuyer sur la base de REs et la démarche d'identification des REs proposés pour le T-RBS ; cependant ce lien entre les deux modèles n'a pas encore été formalisé.

En conclusion, aucun des deux modèles ne domine l'autre. CP-HPRM et SMACC2 disposent chacun de leurs propres avantages et limites. C'est donc à l'utilisateur de choisir le modèle qui lui semble le plus pertinent (appréciation subjective) en fonction de ses connaissances, de sa perception, de ses objectifs et de ses préférences. Par exemple, un utilisateur préférant un modèle dans lequel l'instanciation sera rapide pourra privilégier le CP-HPRM, alors qu'un autre utilisateur privilégiant la compréhension du fonctionnement du modèle pourra préférer SMACC2.

7.4. Apprendre du et par le modèle

Parmi les différents modèles génériques utilisés, seul un avait pour objectif premier l'apprentissage (jeu sérieux avec Domego). Cependant, les cinq modèles présentés sont porteurs de connaissances. Ils proposent une connaissance globale sur les projets de construction et leurs risques. Cette connaissance est disséminée au travers de la structuration systémique des modèles (concepts en relation) et des bases de connaissances qui y sont liées. Par exemple, le modèle CP-HPRM propose déjà une description des entités (à plusieurs niveaux de granularité), de leurs relations (qualifiées sémantiquement), et des dépendances (ou indépendances) entre leurs attributs. Même sans instancier le modèle et sans faire de requêtes dessus, ce modèle est déjà riche de connaissances. Par exemple, il peut permettre à un utilisateur de comprendre comment un acteur peut impacter la réussite du projet de façon directe ou indirecte (à travers la structure du graphe). Il existe des modèles plus spécifiquement dédiés à ce type d'apprentissage, tels que les ontologies, permettant de faire des requêtes sur ces connaissances générales. Mais chacun des modèles proposés permet déjà, à son niveau, d'apprendre de ces connaissances développées sur et au travers du modèle.

Ces modèles proposent aussi de la connaissance locale propre à un projet de construction spécifique. Cette connaissance est accessible après instanciation du modèle et parfois après simulation. Par exemple, avec le modèle T-RBS, l'utilisateur peut acquérir une représentation des risques qui peuvent affecter son projet et une identification des risques critiques. Cette connaissance peut l'amener à mettre en œuvre une stratégie spécifique de gestion des risques. Les modèles permettant de simuler le projet (i.e. MMRMP, CP-HPRM, SMACC2) apportent de la connaissance supplémentaire en répondant à des questions de type *What...if*. Par exemple, SMACC1 avait été utilisé sur un projet réel pour explorer trois solutions alternatives de gestion des risques (« *sécurité élevée* », « *qualité élevée* » et « *standard* »), permettant à un utilisateur de connaître quelle serait la meilleure stratégie et surtout pourquoi elle serait avantageuse (Taillandier and Taillandier 2014). L'enjeu pour ces modèles, et notamment pour SMACC2 n'est pas simplement de pouvoir prédire ce qui pourrait se passer, mais aussi et surtout de faire comprendre à l'utilisateur pourquoi son projet pourrait bien ou mal se dérouler. La question du *pourquoi* est celle, selon moi, à privilégier dans la démarche de modélisation/simulation. Les modèles exposés permettent ainsi au travers de ces mécanismes d'acquérir une connaissance locale propre à un projet particulier.

Domego se positionne différemment sur le champ de l'apprentissage, car il est lui-même conçu comme un objet d'enseignement. Contrairement aux quatre autres modèles, il se destine non pas à des professionnels, mais à des étudiants en formation ayant peu de connaissances en génie civil et notamment sur les projets de construction. Les choix de modélisation, avant même son implémentation sous la forme d'un jeu de plateau, ont été faits pour répondre à cet objectif, vis-à-vis de ce public. Domego permet de simuler le déroulement d'un projet de construction ; une partie de jeu correspond au déroulement d'un projet. Les concepts utilisés (*Acteur*, *Activité*, *Risque*, etc.) ainsi que les dynamiques (achats et allocation de ressources, négociation et contractualisation, etc.) sont proches de ceux des autres modèles et notamment de SMACC. Cependant, les règles qui régissent les relations entre concepts et les dynamiques ont été simplifiées pour des soucis de *game design* (i.e. règles intra- et extra-jeu) afin de rendre le jeu fluide et agréable à jouer. Le jeu a aussi été conçu pour favoriser certains comportements des joueurs : la communication, l'anticipation, la construction d'une confiance partagée. Ces comportements sont récompensés, au travers des mécaniques de jeu, par de meilleurs scores. Ce point a été très notable lors de l'expérimentation, durant laquelle les équipes ayant bien collaboré ont réussi à mener à bien leur projet dans des temps et pour des coûts très bas.

Domego propose en plus de son mode d'apprentissage par le jeu classique, un deuxième mode, que l'on pourrait qualifier de méta-jeu. Domego propose une structure de jeu sur laquelle il est possible de proposer de nouveaux scénarios. J'appelle scénario dans le cadre de ce jeu, une succession

d'*Activités*, sur lesquelles les *Acteurs* doivent travailler et pouvant être affectées par des *Risques*. Le scénario de base (i.e. celui qui a été joué) consiste en la construction d'un bâtiment résidentiel. Ce scénario a été conçu par deux étudiants de Licence en stage recherche sous ma direction. Pour concevoir ce scénario, ils ont dû réfléchir sur ce qu'était un projet de construction et faire des recherches pour apporter la connaissance nécessaire à sa réalisation. Ils ont par-là pu acquérir une réelle connaissance des projets de construction, sûrement supérieure, même, à celle des joueurs ayant joué le jeu. Cette forme d'apprentissage se positionne dans une démarche de type ComMod (Barreteau, Antona et al. 2003), où l'utilisateur final (ici les étudiants) participe à la création du modèle. Elle pourrait être reproduite, amenant de nouveaux étudiants à concevoir de nouveaux scénarios (e.g. construction d'un pont, d'un stade, etc.). Elle est en tout cas extrêmement prometteuse.

8. Conclusion

J'ai présenté dans cette partie, différents modèles portant sur la gestion des projets de construction et de leurs risques. Parmi ceux-ci, quatre (T-RBS, MMRMP, CP-HPRM et SMACC) avaient pour ambition de simuler/représenter le projet et/ou ses risques afin de permettre à des utilisateurs de mieux appréhender les risques liés à leur projet et ainsi en tirer des leçons pour sa gestion. Ces quatre modèles ont été décrits et les points innovants pour chacun d'entre eux ont été mis en avant. Ces quatre modèles décrivent une trajectoire qui a été discutée dans la **partie 7.1**. Le dernier modèle, Domego, est un jeu sérieux, destiné à faire apprendre à des étudiants en génie civil quels sont les acteurs, les phases et les enjeux d'un projet de construction.

Choisir ce système avait un quadruple intérêt. De prime abord, c'est un système sur lequel j'ai largement travaillé comme en témoignent les nombreuses publications (6 publications dans des revues internationales, 20 publications dans des conférences). D'autre part, j'ai pu utiliser sur ce système, différents types de paradigmes permettant de mettre en avant une variété d'approches avec des avantages et des limites que j'ai cherché à mettre en avant, notamment au travers de la comparaison CP-HPRM et SMACC. Ce point est intéressant, car il fonde une part de la philosophie de mon travail. Il n'existe pas un paradigme ou un modèle générique dominant tous les autres et qui serait celui à retenir quel que soit le système. Chaque paradigme apporte un nouvel éclairage permettant d'enrichir la compréhension du système. C'est en cela que proposer plusieurs approches pour un même système peut être extrêmement enrichissant. En revanche, il est absolument nécessaire de bien connaître le domaine d'application et les limites de chaque modèle générique. S'il n'existe pas de modèle générique s'imposant pour décrire un système, certains peuvent en revanche se révéler inadaptés, du moins dans l'optique qui est la mienne (i.e. en considérant le système dans sa complexité). Par exemple, le choix des RBSs pouvait se comprendre en point d'entrée dans le domaine des risques de projet de construction, mais il est trop pauvre pour répondre réellement à la problématique et à mon positionnement face au système et à sa complexité. Malgré tout, même malgré ses limites, le modèle T-RBS, comme tous les autres modèles présentés dans ce chapitre, permet à son utilisateur d'enrichir sa compréhension et sa connaissance du système, que ce soit à un niveau global ou local.

Les prochains systèmes seront abordés avec la même philosophie et avec le même regard. Les chapitres suivants s'intéresseront notamment aux modèles pour l'aide à la décision, qui n'ont pas été abordés dans ce chapitre. C'est ainsi que nous nous intéresserons dans le **Chapitre 3** au système bâtiment et dans le **Chapitre 4** au système parc immobilier, qui sont tous les deux riches en termes de complexité, et notamment en termes de décisions complexes.

CHAPITRE 3

Vers des bâtiments durables -Simuler, faire réfléchir et aider à décider-

Modèles présentés

Modèle	Modèle générique	Problématique	Aspects remarquables
Li-BIM	ABM - BDI	Simulation du comportement des habitants d'un bâtiment	<ul style="list-style-type: none">• Modèle cognitif BDI pour le comportement des occupants,• Modèle relationnel entre les occupants,• Intégration du BIM,• Modèle flexible et pouvant être interfacé avec des modèles physiques,• Multidimensionnel (thermique, acoustique, etc.).
ARD-Fourmi	MCDA	Aide à la décision pour la rénovation thermique d'une maison	<ul style="list-style-type: none">• MCDA basée sur ELECTRE III,• Modélisation avec experts et utilisateurs finaux,• Outil conçu pour aider les propriétaires à réfléchir à leur projet de rénovation,• Participe au développement d'une culture pro-environnementale.
ECO2D2	Optimisation multi-objectif	Aide à la décision pour le choix d'une stratégie de démolition d'un bâtiment	<ul style="list-style-type: none">• Modèle d'optimisation multi-objectif considérant les dimensions économiques, temporelles et environnementales,• Modélisation en partenariat avec l'utilisateur final,• Comparaison de plusieurs métaheuristiques (NSGA2, DBEA, OMOPSO...) pour effectuer l'optimisation.

Où il sera discuté de :

*Choix du paradigme et du modèle générique,
L'humain dans et face aux modèles,
Temps d'après.*

Chapitre 3

Vers des bâtiments durables

-Simuler, faire réfléchir et aider à décider-

1. Introduction

Dans le **Chapitre 2**, je me suis intéressé aux projets de construction et à leurs risques. On a pu voir qu'ils constituaient des systèmes complexes nécessitant le recours à des modèles capables de prendre en compte cette complexité (i.e. prise en compte des interactions entre éléments, des incertitudes, etc.). Mais la complexité ne se limite pas aux projets : l'ouvrage, une fois livré, constitue aussi un système complexe (voir **Chapitre 1 partie 3**). Il l'est déjà en tant qu'objet technique (e.g. multi-niveau, multi-technique, nombreux éléments en interaction, etc.) ; il l'est encore davantage dès lors que l'on ajoute l'humain dans le système, qu'il soit concepteur, propriétaire ou utilisateur. Or considérer l'humain en interaction avec l'ouvrage est ce qui fonde l'originalité de mon travail et qui permet de le placer dans une perspective holistique (voir **Chapitre 1 partie 5.2**).

Les ouvrages, qu'ils soient bâtiments, réseaux et voiries, ouvrages d'art, sont confrontés à de nombreux enjeux, dont celui de leur impact environnemental. Le domaine de la construction est un secteur clef pour l'environnement : en France, il représente 44% de la consommation d'énergie et 21% des émissions totales de gaz à effet de serre (CGDD 2012). Parallèlement, il est responsable d'environ la moitié de l'extraction des ressources primaires, d'un tiers de la consommation d'eau et d'un tiers des déchets de l'Union européenne (EC 2014). Minimiser les impacts environnementaux des ouvrages bâtis est un enjeu majeur, mais cela ne peut se concevoir que dans une vision plus large, intégrant aussi les dimensions économiques (pour assurer la faisabilité des solutions) et sociales (i.e. l'humain), induisant une perspective de développement durable (Shealy 2016). Je m'intéresserai dans ce chapitre plus particulièrement aux bâtiments, bien qu'évidemment des problématiques identiques puissent s'exprimer aussi pour les ouvrages d'art et les infrastructures. La question est alors de savoir comment améliorer la durabilité (au sens de développement durable) des bâtiments. Cela présuppose de faire face à la complexité du système *bâtiment* en intégrant les trois dimensions du développement durable. Les enjeux de durabilité et par association, la complexité, vont se retrouver à plusieurs étapes du cycle de vie de l'ouvrage : en phase de conception, en phase d'exploitation (utilisation), en phase de maintenance/réhabilitation et en phase de démolition.

La conception des bâtiments est porteuse d'enjeux variés, qu'ils soient environnementaux (consommation énergétique, potentiel de changement climatique, etc.), sociaux (confort, qualité d'usage, etc.) ou économiques (coût d'investissement, coût d'exploitation, etc.). Pour répondre à ces enjeux, de nombreux travaux de recherche se sont attachés à améliorer les dispositifs techniques (matériaux, équipement, etc.) et les paramètres situationnels (volume, orientation, etc.) ; e.g. (Bamdad, Cholette et al. 2017, Wu, Mavromatidis et al. 2017, Harkouss, Fardoun et al. 2018, Kheiri 2018). Mais cela n'est pas suffisant pour assurer des performances optimales pour les bâtiments. En effet, le fonctionnement des bâtiments ne peut se concevoir qu'en lien avec l'usager, qui a un fort impact sur ses performances. Ainsi, un enjeu émergent de la conception de bâtiment est la meilleure prise en compte de l'usager, qu'il soit locataire ou propriétaire dans un immeuble résidentiel, ou employé dans un immeuble de bureaux. Pour répondre à cet enjeu, j'ai participé au développement du modèle Li-BIM, présenté dans la **partie 2**, qui permet de simuler le comportement d'occupants dans un bâtiment.

Les enjeux de durabilité, et notamment ceux liés à l'énergie, ne sauraient se résumer à la seule conception des bâtiments. Le taux de remplacement annuel des bâtiments étant inférieur à 1% (Pelletier 2008), il est indispensable d'améliorer aussi les bâtiments existants par des opérations de

rénovation et de réhabilitation. Dans la pratique, la rénovation se heurte à deux barrières (Itard, Meijer et al. 2008) : (a) le manque de connaissances des propriétaires et gestionnaires et (b) le manque de rentabilité financière de ces opérations et les difficultés à les faire financer. Je m'intéresserai particulièrement au premier point, c'est à dire au problème de la connaissance. La difficulté provient essentiellement de la complexité d'analyse de la situation et des impacts des solutions possibles de rénovation en vue d'en choisir une. Le choix d'un projet de rénovation est en effet un problème de décision complexe du fait : (a) du grand nombre, voire de l'infinité, de solutions de rénovation possibles, (b) des nombreux critères et contraintes pouvant intervenir pour le choix d'une solution, (c) des nombreuses incertitudes, (d) de la variété des préférences des occupants, etc. (voir **Chapitre 1 partie 3**). C'est dans cette perspective que j'ai développé une approche et un outil d'aide à la décision, appelé ARD-Fourmi, destinés à des propriétaires de maison individuelle, afin de les aider à choisir une solution de rénovation (**partie 3**).

Parmi les enjeux environnementaux majeurs du domaine du génie civil, on rencontre aussi celui de la gestion des déchets, qu'ils soient issus de la réhabilitation ou de la démolition. Ces activités génèrent environ 35 millions de tonnes de déchets en France par an (Koesten 2015). Afin d'encourager une meilleure gestion des déchets de construction, l'Union Européenne s'est fixée comme objectif d'atteindre un taux de valorisation minimal de 70% (en masse) pour les déchets du bâtiment et des travaux publics d'ici à 2020 (EC 2008). Si techniquement l'atteinte de cet objectif ne pose pas de problème, elle se heurte souvent aux réalités opérationnelles. Déconstruire plutôt que démolir (i.e. démanteler les éléments par type en suivant l'ordre inverse de la construction), trier plutôt que d'envoyer tout en décharge, sont vus comme des activités coûteuses et chronophages par les entreprises du secteur (Ecorys 2016). Pourtant, en dehors même des considérations environnementales, trier les déchets permet de les valoriser (revente pour réutilisation, recyclage...). Les défauts de connaissances et la difficulté à bien appréhender ce système complexe limitent les entreprises dans leur capacité à proposer des stratégies de déconstruction efficaces tout à la fois sur les plans environnementaux et économiques. C'est pour répondre à ce besoin que j'ai participé au développement d'un modèle et d'un outil d'aide à la décision destinés aux entreprises de démolition, leur permettant d'optimiser leur stratégie de démolition. Ce modèle, ECO2D2 (du nom du projet qui a conduit à sa conception), est présenté dans la **partie 4**.

Dans ce chapitre je présenterai ainsi des travaux relatifs au système bâtiment vis-à-vis des enjeux du développement durable, à trois étapes de son cycle de vie : conception, rénovation et démolition. Ces trois travaux auront recours à trois modèles génériques : (a) les ABMs (modèle Agent) pour la simulation du comportement des occupants (**partie 2**), (b) les MCDAs (méthodes d'aide à la décision multicritère) pour le choix d'une solution de rénovation (**partie 3**), et (c) l'OMO (optimisation multi-objectif) pour le choix d'une stratégie de démolition (**partie 4**). Je justifierai le choix de chacun de ces paradigmes et des modèles génériques retenus, j'exposerai les grandes lignes des modèles construits et je proposerai, pour chacun d'entre eux, une illustration sur un cas d'application réel.

2. ABM : Li-BIM

Comme je l'ai présenté dans la **partie 1**, l'un des enjeux de la conception des bâtiments est la meilleure prise en compte de l'occupant dans les modèles de simulation (e.g. simulation thermique, acoustique...). Cet enjeu se retrouve dans différents domaines techniques liés à la conception de bâtiments : qualité de l'air (Andersen, Fabi et al. 2016), éclairage (Heydarian, Pantazis et al. 2016), etc. Dans le domaine énergétique, la question de l'occupant est particulièrement cruciale : de nombreuses études (Calì, Osterhage et al. 2016) ont démontré qu'il existait un écart important entre la consommation énergétique simulée par les modèles physiques classiques et celle réellement mesurée, en raison, en grande partie, du comportement des occupants (Hoes, Hensen et al. 2009).

2.1. Etat de l'art

Afin d'améliorer la prise en compte du comportement des occupants dans les simulations de consommation énergétique, différents modèles de comportement des occupants pouvant s'interfacer avec des outils de simulation thermique ont été proposés. Parmi ceux-ci, on peut citer les modèles basés sur des approches probabilistes (Jang and Kang 2016), des ABMs (Klein, Kwak et al. 2012), des analyses statistiques (Peng, Yan et al. 2012) ou sur la fouille de données (D'Oca and Hong 2015). L'utilisation des ABMs me semble l'approche la plus prometteuse pour simuler le comportement des occupants d'un bâtiment (Langevin, Wen et al. 2015) en raison de : leur clarté, leur versatilité, leur capacité à modéliser les dynamiques complexes et les systèmes sociaux. En effet, les ABMs permettent une modélisation intuitive et naturelle se positionnant en interface entre différents champs d'expertise technique et sociale (e.g. thermicien, chimiste, psychologue, etc.). Les ABMs sont capables de modéliser une grande variété de phénomènes, qu'ils soient physiques ou psychologiques. De plus, ils sont particulièrement adaptés à la modélisation des systèmes complexes dynamiques, et notamment des systèmes humains avec de forte capacité d'adaptation, de réaction et d'interaction induisant de l'émergence (Seidita and Chella 2017).

Si des modèles basés sur les ABMs ont déjà été développés pour modéliser le comportement d'occupants de bâtiments (Azar and Menassa Carol 2012, Anderson, Lee et al. 2014, Lee and Malkawi 2014, Langevin, Wen et al. 2015), ceux-ci restent limités. D'une part, les modèles cognitifs des occupants y sont souvent assez pauvres (seulement des modèles réactifs, voir **Chapitre 1 partie 5.4**). Par ailleurs, les modèles proposés sont généralement dédiés à un seul usage spécifique (e.g. uniquement l'aspect thermique). Cela limite la compréhension de certains types de comportement. Par exemple, l'ouverture et la fermeture d'une fenêtre résultent souvent d'un compromis entre confort thermique, consommation énergétique, qualité d'air intérieur (odeur, humidité, etc.) et confort acoustique. De plus, leur structure peu flexible ne permet pas de les interfacer avec des modèles physiques existants (e.g. modèle de qualité d'air intérieur). Enfin, leur utilisation est délicate pour les utilisateurs finaux, car des efforts importants sont nécessaires pour les instancier ; cette étape se fait, généralement, sans interface dédiée. Pour répondre à tous ces points, nous avons développé, dans le cadre de la thèse d'Alice Micolier (voir **Annexe B**), le modèle Agent Li-BIM (*Life in Building Information Model*), permettant de simuler le comportement d'occupants dans un bâtiment. Ce modèle et son implémentation sont exposés dans les parties suivantes.

2.2. Description générale du modèle

Li-BIM a été conçu afin de répondre à trois enjeux : disposer d'un modèle cognitif avancé, assurer l'interopérabilité avec des outils métier et être accessible aux non informaticiens. Pour cela, il est structuré autour d'un ABM (**Figure 3.1**) intégrant une représentation BIM du bâtiment et une architecture BDI (*Belief-Desire-Intention*) pour la modélisation cognitive des occupants.

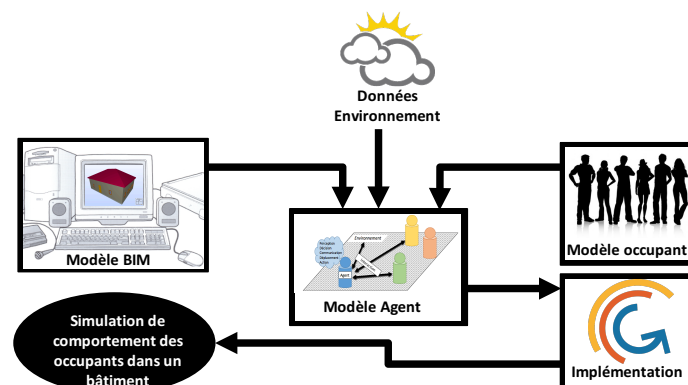


Fig 3.1. Positionnement de Li-BIM

BIM. Le modèle d'informations du bâtiment (plus souvent appelé *maquette numérique*), i.e. le BIM (*Building Information Model*), renvoie à deux choses : un modèle générique et une démarche de gestion de la construction. En termes de modèle, c'est une représentation numérique des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un ouvrage, partagée entre les différentes parties prenantes (Leite, Akcamete et al. 2011). Je n'utilise pour ma part pas le terme de maquette numérique, car il est porteur d'une ambiguïté, renvoyant le modèle d'informations à une simple représentation en 3D du bâtiment. Or le BIM est plus largement un modèle orienté objet de connaissances, qui contient (ou devrait contenir) toutes les informations liées à l'ouvrage afin de mener à bien sa conception, sa construction, son exploitation et sa fin de vie. Les données BIM, via des fichiers standardisés (N.B le plus répandu étant le format IFC), peuvent être utilisées directement dans un nombre croissant d'outils métier (calcul mécanique, thermique, analyse de cycle de vie, etc.), permettant d'assurer une meilleure interopérabilité. Le BIM est en plein essor depuis une dizaine d'années car il présente un fort potentiel pour faciliter la coordination entre les différents acteurs et le suivi de l'ouvrage (Volk, Stengel et al. 2014). Nous avons fait le choix d'utiliser les fichiers BIM au format IFC comme source d'informations sur le bâtiment dans Li-BIM. Un utilisateur, e.g. un architecte ou un bureau d'études, peut concevoir un bâtiment sous un outil classique BIM (e.g. Revit©, Allplan©, etc.) et importer directement le fichier IFC obtenu sous Li-BIM.

BDI. L'architecture BDI est un modèle générique dédié à la formalisation du comportement humain, particulièrement efficace pour modéliser des comportements cognitifs complexes dans les ABMs (Caillou, Gaudou et al. 2017). L'architecture BDI repose sur trois bases de données (*Croyance*, *Désir* et *Intention*) définies pour chaque agent et simulant sa cognition. La base de *croyances* désigne ce que l'agent sait. Ces connaissances peuvent être justes ou fausses, voire contradictoires. La base de *désirs* correspond à ses objectifs, à ce qu'il souhaite. Enfin, la base d'*intentions* correspond à ce que l'agent compte faire pour assouvir son désir et atteindre ses objectifs. Toutes ces bases évoluent dynamiquement en fonction de l'environnement de l'agent, de ce qu'il en perçoit et de ses actions. En plus de ces bases de données, l'agent possède des raisonnements internes, gérés par des règles, qui lui permettent de créer lui-même des pensées, sans qu'il ne les extraie directement de son environnement. Ces trois bases de données couplées aux règles, permettent à l'agent de construire des raisonnements complexes pour atteindre ses objectifs. Cela permet de simuler des comportements réalistes pour les agents.

Modèle social. Les occupants du bâtiment peuvent interagir les uns avec les autres. Le modèle générique utilisé pour décrire les relations sociales entre les occupants est basé sur les travaux de Bourgeois, Taillandier et al. (2018). Il repose sur les quatre dimensions des relations interpersonnelles de Svennevig (2000) : l'appréciation, la domination, la solidarité et la familiarité. Ces dimensions se traduisent par un vecteur orienté reliant deux occupants ; le vecteur contient, pour chacune de ces dimensions la force de la relation qui peut être positive ou négative. Il est à noter que les valeurs des relations entre deux agents ne sont pas nécessairement symétriques ; e.g. la relation adulte-enfant, pour laquelle, par exemple, la domination a une valeur plus élevée de l'adulte à l'enfant que dans l'autre sens. Ce modèle social est utilisé dans Li-BIM pour modéliser différentes actions : (a) convaincre une autre personne de prendre une décision (domination, solidarité et appréciation), (b) proposer à une autre personne de faire quelque chose (appréciation et familiarité), (c) effectuer des tâches collectives (solidarité et domination), et (d) communiquer et échanger des informations (familiarité et appréciation). Ces actions sont basées sur des règles utilisant les vecteurs sociaux et sont détaillées dans (Micolier, Taillandier et al. 2018).

Modèles physiques. Afin de simuler le comportement physique du bâtiment et de son environnement, Li-BIM peut, au choix du modélisateur, utiliser des modèles internes ou des modèles externes. Les modèles internes sont des modèles physiques simples qui ont été directement

implémentés sous Li-BIM ; e.g. pour le calcul des températures internes, le modèle développé par (Belazi, Ouldboukhitine et al. 2018) a été implémenté. Si le modélisateur souhaite utiliser des modèles physiques plus performants ou touchant de nouveaux domaines, il peut avoir recours à des modèles externes. Li-BIM et le modèle externe échangent alors des informations à chaque pas de temps via des fichiers CSV, Li-BIM se positionnant en modèle maître. Cette deuxième option permet d'avoir des phénomènes physiques plus finement modélisés mais augmente aussi, et parfois de façon très sensible, le temps de simulation.

2.3. Agents du modèle

Le modèle Li-BIM contient deux familles d'agent : les occupants et le bâtiment. Tous les objets composant le bâtiment dans le fichier IFC sont transformés en agents. Ils disposent des attributs établis dans le BIM ; e.g. un objet *Mur* est transformé en agent *Mur*, disposant de la même épaisseur, de la même composition, etc. La **partie 2.7** revient sur le passage de l'IFC au modèle Agent. Les agents du bâtiment peuvent être statiques (e.g. les murs, les planchers) ou dynamiques (e.g. le système de chauffage, de ventilation). Ils sont souvent, au plus, uniquement réactifs (régulation) bien qu'il soit possible de leur octroyer des capacités cognitives dans une perspective de modélisation du bâtiment intelligent.

Les agents *Occupant* reposent sur une architecture BDI. Ils disposent d'attributs les caractérisant (travail, fumeur, température idéale, etc.) et d'attributs relatifs à leur état selon plusieurs domaines (confort, fatigue, faim, etc.). Ces attributs, qui évoluent constamment durant la simulation, vont nourrir leur base de croyances ; par exemple si l'état de forme est inférieur à 20% alors l'occupant acquiert la croyance *Je suis fatigué*. Si, de plus, l'occupant a la croyance *Il est l'heure d'aller me coucher*, il acquiert alors le désir *Aller se coucher*. Il compare la priorité de ce désir par rapport à ses autres éventuels désirs (e.g. *Manger*, *Travailler*, etc.). S'il juge ce désir prioritaire alors, *Aller se coucher* est ajouté à la base d'intentions et il va effectuer le plan *Dormir*. Le modèle intègre aussi des interactions entre les occupants et les équipements du bâtiment (e.g. en cas de *Sensation de froid*, l'occupant peut allumer le chauffage) ou avec les autres occupants (e.g. si deux personnes ont des opinions différentes sur le chauffage, l'une peut convaincre l'autre du bien-fondé de l'allumer). Ces interactions justifient le recours à un ABM pour simuler la vie des occupants en intégrant leurs capacités cognitives. Afin de prendre en compte la variabilité intra-personnelle (e.g. on ne dort pas tous les jours le même nombre d'heures), les règles, qu'elles soient liées au comportement individuel ou aux relations entre occupants, sont teintées d'incertitudes par l'utilisation de variables aléatoires.

2.4. Dynamiques du modèle

La durée d'un pas de simulation est définie par l'utilisateur en fonction de la précision souhaitée (e.g. 5 minutes, 10 minutes). Chaque pas de simulation suit le même processus (**Figure 3.2**). Tout d'abord, le modèle met à jour les données environnementales (température extérieure, humidité, etc.) importées sous forme de fichiers CSV, puis les paramètres du bâtiment (e.g. température intérieure, qualité d'air) sont mis à jour. Différents modèles physiques peuvent être utilisés pour calculer les nouvelles valeurs de ces paramètres. Par exemple, les températures intérieures peuvent être calculées par un modèle thermique grâce aux données environnementales (e.g. températures extérieures), aux caractéristiques du bâtiment obtenues via l'IFC (e.g. conductivité thermique et épaisseur des isolants, résistance thermique des fenêtres, etc.) et en fonction du comportement des occupants (e.g. allumage du chauffage, ouverture de fenêtres, etc.). Ensuite, les attributs des occupants (niveau de confort, de forme, de satiété, etc.) sont mis à jour. Ils peuvent alors agir.

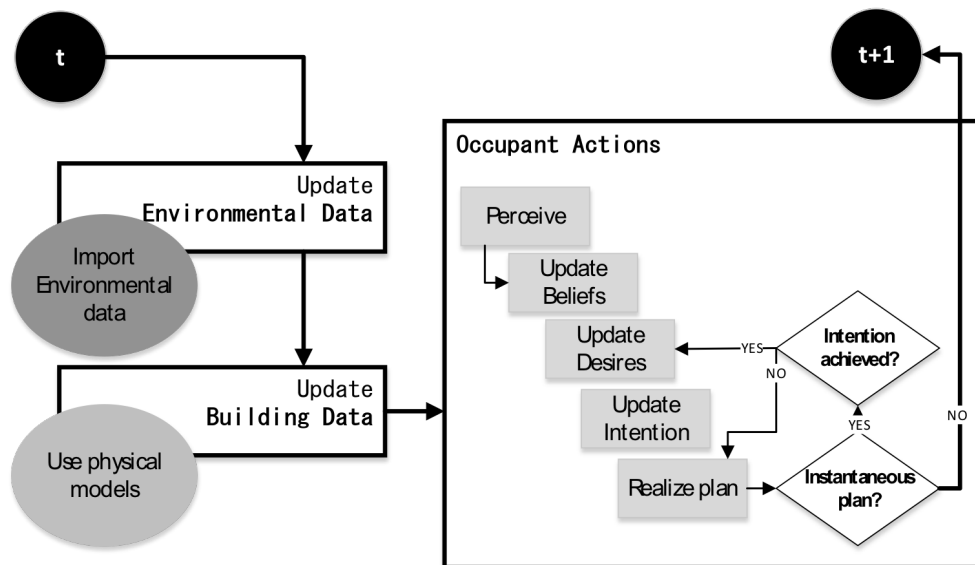


Fig 3.2. Dynamique de Li-BIM (Micolier, Taillandier et al. 2018)

Les occupants, à partir de la perception de leurs attributs et leur environnement, mettent à jour leurs croyances, puis leurs désirs et enfin leur intention. Ces processus de mise à jour passent par des règles et des algorithmes (e.g. confort perçu) qui sont détaillés dans l'article (Micolier, Taillandier et al. 2018). Les occupants mettent à exécution leur intention par un plan. Certains plans peuvent durer plus d'un pas de simulation ; l'occupant gardera alors la même intention pour plusieurs pas de simulation. Si l'intention est atteinte, alors la base de désirs est mise à jour et l'occupant choisit une nouvelle intention correspondant au désir ayant maintenant la priorité la plus élevée, et exécute le plan le plus approprié pour réaliser cette intention. Il est à noter qu'un plan peut être composé de plusieurs actions et certaines actions peuvent être instantanées (e.g. allumer le chauffage) ou peuvent être simultanées (e.g. discuter avec un autre occupant et se relaxer).

2.5. Implémentation et simulation

Le modèle a été implémenté sous la plateforme agent GAMA (Grignard, Taillandier et al. 2013) qui possède une intégration native de l'architecture BDI (Taillandier, Bourgeois et al. 2016). Afin de pouvoir intégrer les données BIM dans Li-BIM, nous avons créé un plug-in (i.e. module d'extension pour un programme informatique) permettant d'importer des fichiers IFC dans GAMA. Cette plateforme se voulant un logiciel ouvert, ce nouveau plug-in est disponible pour tout nouveau modèle sous GAMA.

Li-BIM propose deux modes de simulation : un mode avec visualisation graphique 3D et un mode *batch* effectuant plusieurs simulations à la suite. Le mode 3D propose de suivre en temps réel le déroulement de la simulation. Dans ce mode graphique, plusieurs variables évoluant à chaque étape de simulation sont affichées dans différents panneaux (**Figure 3.3**) : modèle 3D (maison, occupants...), diagramme radar (état de chaque occupant), graphique d'activité (activité de chaque occupant), courbes d'indicateurs (température intérieure et extérieure, plage de confort thermique de chaque utilisateur...). Ces fenêtres permettent de percevoir et de comprendre facilement le déroulement de la simulation. Le mode *batch* propose d'exécuter des simulations sans interface graphique afin d'augmenter la vitesse de simulation. Ce mode permet d'obtenir plus rapidement les résultats sur une année, ce qui est considéré comme une période représentative pour analyser le comportement des occupants, et de lancer plusieurs simulations à la suite. Un fichier CSV est généré à la fin de la simulation proposant différentes variables d'intérêt (consommations énergétiques, températures intérieures moyennes, etc.).

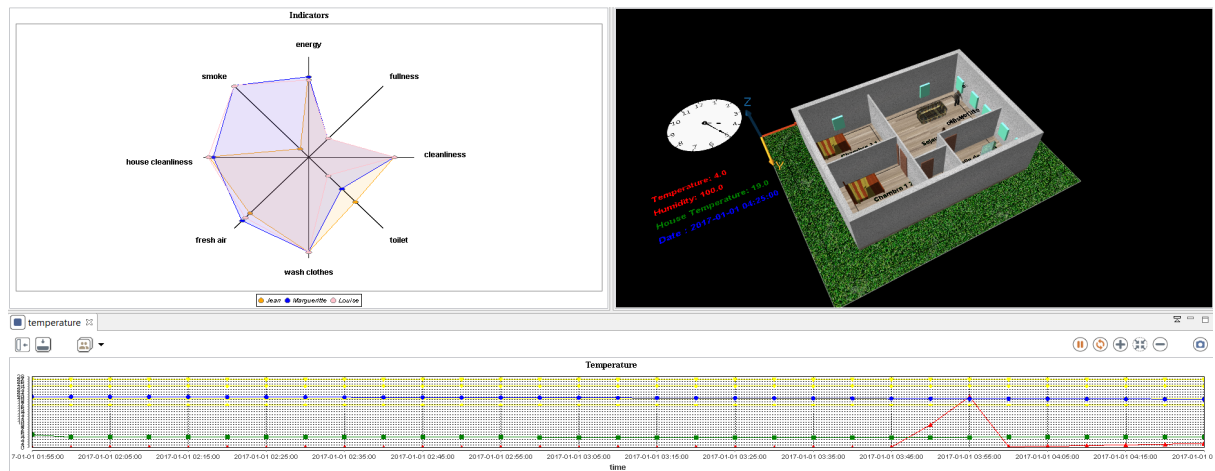


Fig 3.3. Interface de Li-BIM en mode visualisation 3D

2.6. Application

Li-BIM a été utilisé sur un cas d'application réel : il s'agit d'une maison située à La Riche (nord-est de la France) habitée par une famille de trois personnes (M. X., 64 ans, Mme X., 60 ans, et Mlle X. leur fille de 20 ans). Nous avons bénéficié pour ce cas d'études, de données mesurées *in situ* par le *Cabinet Hacsé* (bureau d'ingénierie) : chaque appareil électrique a été instrumenté et la température mesurée pour une année complète, de mai 2015 à mai 2016 avec un pas horaire. De plus, une enquête, sous forme d'entretiens individuels, a permis d'analyser la sensibilisation des occupants aux questions d'économie d'énergie. Le modèle BIM a été développé avec Revit© (Autodesk) sur la base du plan final de mise en œuvre de la maison. Les paramètres des occupants dans Li-BIM ont été définis grâce aux entretiens.

Résultats. Les résultats de consommation d'énergie de mai 2015 à mai 2016 obtenus grâce à Li-BIM sont comparés dans la **Figure 3.4** avec les données recueillies *in situ* ainsi qu'avec les résultats simulés avec le logiciel de simulation thermique Graitec© (considéré comme une référence en termes d'outil métier pour la simulation thermique). Les valeurs de consommation de chauffage obtenues grâce à Li-BIM sont globalement cohérentes avec les mesures *in situ*, et avec les entretiens, confirmant un comportement des occupants particulièrement économe. La différence observée de 7% entre la consommation de chauffage simulée avec Li-BIM et les données *in situ* peut trouver deux explications. Li-BIM utilise un modèle thermique mono-zone ne permettant pas de représenter des stratégies de chauffage par zone (e.g. consigne de température plus élevée dans les pièces à vivre que dans les chambres). De plus, le calendrier des vacances qui n'était pas précisément connu, nous a obligé à faire des hypothèses quant à ce point.

La consommation finale de chauffage obtenue par Li-BIM est toutefois très proche de la consommation mesurée. A l'inverse, la consommation de chauffage simulée par Graitec© est plus du double de la valeur mesurée *in situ*. Cela s'explique par l'incapacité de ce logiciel à prendre en compte la variabilité des modes de vie des ménages car il utilise un profil d'occupation standard, comme la plupart des logiciels de cette catégorie. A l'inverse, Li-BIM a la capacité de prendre en compte les singularités issues du contexte sociologique et des habitudes ou simplement des particularités de chacun. D'autres résultats liés aux températures intérieures et aux durées des activités sont présentés dans l'article (Micolier, Taillandier et al. 2018) mais ne seront pas abordés ici. Les tendances sont les mêmes que pour les consommations énergétiques et démontrent l'intérêt d'utiliser un modèle capable de mieux prendre en compte la variabilité des comportements des occupants.

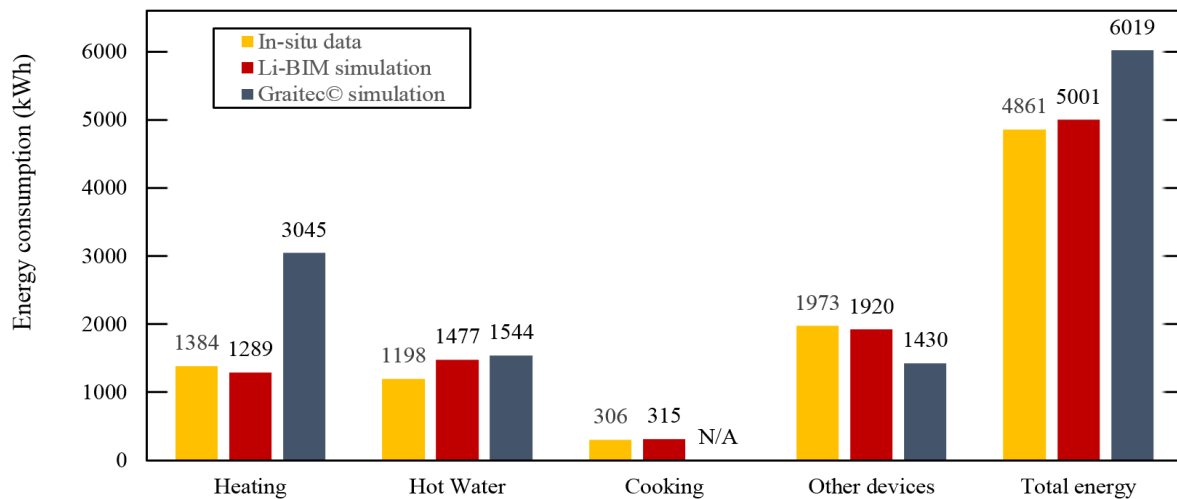


Fig 3.4. *Consommation énergétique annuelle par poste (Micolier, Taillandier et al. 2018)*

Comparaison de scénarios. En plus des résultats précédents, un scénario alternatif a été étudié, soulignant la capacité de Li-BIM à mesurer l'impact de différents scénarios de simulation. La question testée ici est : *Et si cette famille avait une conscience écologique plus élevée et une bonne connaissance des stratégies énergétiques ?* Nous pouvons modéliser cette hypothèse au travers des attributs des occupants (i.e. attributs *Conscience écologique* et *Connaissance du bâtiment*). Les familles ayant une conscience écologique plus élevée sont plus réticentes à allumer le chauffage lorsque la température est un peu froide ; elles sont donc prêtes à diminuer un peu leur confort pour économiser de l'énergie. La bonne connaissance des stratégies énergétiques permet aux occupants de savoir comment optimiser les apports solaires (e.g. fermeture des volets) et le rafraîchissement (ouverture des fenêtres) afin d'assurer un bon niveau de confort sans dépenser plus d'énergie. Nous avons lancé un jeu de simulations avec ce nouveau scénario (i.e. *Conscience écologique* et *Connaissance du bâtiment* fortes). Il en résulte une température intérieure moyenne inférieure (20,2°C contre 21,2°C avec le scénario précédent), et ainsi une consommation énergétique réduite de 20%, mais un niveau de confort moyen de niveau égal (confort d'hiver plus faible mais confort d'été plus élevé). Ce type de simulation permet de quantifier l'intérêt pour la promotion de la conscience écologique. Cependant, cela reste théorique et soulève au moins deux questions : (1) quel sens donner concrètement à une forte conscience écologique et (2) comment assurer un tel comportement aux habitants. Si Li-BIM ne répond pas à ces questions, il fournit une motivation pour trouver des réponses. Dans la **partie 3**, la question du comportement écologique des occupants et de leur connaissance du bâtiment sera de nouveau abordée, mais sous un angle différent.

2.7. Discussion

Je reviendrais dans cette partie sur plusieurs points de discussion relatifs au modèles Li-BIM. Ils permettront de mieux évaluer les limites du modèle et les perspectives de modélisation que cela soulève.

Validation. L'application qui a été présentée ne saurait être suffisante pour une validation externe de notre modèle (**Chapitre 2 partie 7.2**), car il aurait fallu comparer les résultats pour un grand nombre de bâtiments différents en intégrant divers profils d'habitants et la variabilité interannuelle sur les données météorologiques. Cependant, elle démontre que Li-BIM est opérationnel et constitue un apport significatif par rapport aux approches traditionnelles de simulation thermique. Pour nous en assurer, nous avons réalisé différentes tâches de validation interne. Li-BIM est basé sur des modèles génériques et des règles validés par la littérature scientifique (e.g. modèles de confort, cognitif, social). En plus de cette validité conceptuelle, nous avons exploré chaque partie du modèle

(modèle thermique, de confort, d'activité, etc.) afin de s'assurer de leur cohérence. Une autre étape de validation a consisté à analyser les résultats de plusieurs études de cas et à vérifier la cohérence des résultats. Aucune valeur aberrante n'a été remarquée à travers les différentes simulations. En raison de la grande variété des comportements des occupants réels, il est difficile d'assurer la capacité du modèle Li-BIM à saisir la réalité et à produire des prévisions précises dans tous les cas. Cependant, Li-BIM ne prétend pas prédire la consommation d'énergie réelle, mais permet de fiabiliser les études thermiques et constitue une approche prometteuse pour effectuer une analyse de scénarios basée sur la comparaison de choix de conception.

Définition de l'occupant. La qualité des résultats avec Li-BIM dépend des données d'entrée ; si les données BIM et environnementales peuvent être considérées comme suffisamment fiables (si toutes les données requises sont correctement informées dans le BIM), les données concernant l'occupant sont plus difficiles à justifier. Pourtant, le comportement de l'agent *occupant* sera fortement influencé par ces valeurs. La question est alors de savoir comment trouver les bonnes données sur les occupants. Nous proposons trois solutions : (a) directement si l'on connaît les (futurs) occupants, (b) en utilisant une typologie d'occupants ou (c) en utilisant un outil de génération de populations synthétiques. La solution (a) est pertinente, par exemple, lorsqu'une entreprise de construction de maisons vend une maison à des acheteurs identifiés. A ce moment, l'entreprise peut demander aux acheteurs de remplir un questionnaire pour recueillir les bonnes informations et simuler de manière pertinente leur comportement. La solution (b) peut bénéficier de travaux antérieurs tels que (Bona 2016) qui proposent des typologies d'occupants aux caractéristiques identifiées. Le concepteur de maison connaît souvent le type de population ciblée (étudiant, famille, retraité...). Dans le cas contraire, les enquêtes sociales locales peuvent fournir des informations sur la typologie de la population (e.g. en utilisant OMPHALE (INSEE 2008)). La dernière solution proposée (solution (c)) consiste à utiliser un outil de génération de populations synthétiques comme SPEW (Gallagher, Richardson et al. 2017). L'idée est d'utiliser les données statistiques disponibles (données de recensement, échantillon de la population...) pour peupler automatiquement les bâtiments avec des occupants représentatifs de la population cible (travailleurs, retraités, étudiants, etc.). L'intégration d'un tel outil faciliterait encore plus l'utilisation de Li-BIM.

Plateforme GAMA. La plateforme GAMA s'est montrée particulièrement adaptée à Li-BIM. Li-BIM est basé sur une architecture cognitive BDI déjà intégrée dans la plateforme GAMA. Cette architecture cognitive est le résultat du projet ANR ACTEUR (Taillandier, Daudé et al. 2015), qui vise à aider à la modélisation des agents cognitifs et de leurs émotions dans GAMA. Le projet est en cours, et l'architecture cognitive de GAMA bénéficie en continu de nouvelles améliorations, dont pourra profiter Li-BIM. L'importation de fichiers IFC est un apport important de Li-BIM. Le plug-in spécialement développé pour le modèle est maintenant disponible pour tous dans GAMA. Il permet d'importer les principaux composants IFC avec leurs attributs. Il est opérationnel, bien que des difficultés puissent exister avec les composants ayant des géométries 3D complexes. Un travail est en cours pour son amélioration, afin de lui permettre de mieux gérer tous les composants IFC.

Modèles physiques. Une qualité importante de Li-BIM est sa flexibilité. Le modèle permet au modélisateur d'implémenter facilement une grande variété de phénomènes suivant son objectif (e.g. énergie, qualité de l'air, acoustique...). L'ensemble des actions réalisables par les occupants, déjà implémentées, couvrent une bonne variété de domaines (e.g. fumer pour la qualité de l'air, se doucher pour la consommation d'eau...), mais il est possible de l'enrichir si nécessaire. L'architecture BDI permet d'ajouter de nouveaux comportements sans altérer la structure du modèle. Dans la même optique, l'interfaçage de Li-BIM avec des modèles physiques externes permet à l'utilisateur d'ajouter des calculs de comportement physique avec peu d'efforts. Cependant, le recours à de tels modèles peut conduire à des temps de simulation très longs selon la finesse de modélisation et les pas de temps

requis. Lorsqu'une longue période de temps doit être simulée, il est important de réfléchir préalablement à la précision des données souhaitées afin d'utiliser les modèles physiques adéquats, voire de les intégrer directement dans Li-BIM s'ils ne sont pas trop complexes.

2.8. Conclusion

J'ai présenté dans cette partie Li-BIM, un ABM qui simule le comportement d'occupants dans un bâtiment. L'utilisation de Li-BIM peut aider le maître d'œuvre à calculer des indicateurs de durabilité en fonction de l'ensemble des solutions technologiques proposées tout en plaçant les occupants au centre du processus de conception. Li-BIM permet d'importer directement les fichiers IFC des bâtiments, ce qui facilite son utilisation et son interopérabilité. Grâce à l'utilisation d'une architecture BDI et d'un modèle de relations sociales, il offre une représentation crédible des comportements des occupants. Son application à un cas réel a permis de démontrer son intérêt et la cohérence des résultats obtenus. Li-BIM, dans son implémentation actuelle, se concentre sur les bâtiments résidentiels individuels face aux enjeux de consommation énergétique. Le modèle devrait être prochainement étendu : (a) à une plus large typologie de bâtiments (résidentiels collectifs et tertiaires), et (b) à de nouveaux domaines. Vis-à-vis du second point, Li-BIM a été structuré afin de permettre une grande flexibilité, facilitant l'adaptation du modèle à une grande variété de domaines. Dans cette perspective, il sera utilisé dans un projet visant à développer un outil d'aide à la décision pour la conception de bâtiments à haute performance thermique tout en assurant une bonne qualité d'air intérieur.

3. Aide à la décision multicritère : ARD-Fourmi

Dans la partie précédente, j'ai présenté Li-BIM qui vise à simuler le comportement d'occupants dans un bâtiment. Ce modèle avait pour ambition, notamment, de mieux prendre en compte la diversité des comportements vis-à-vis des enjeux énergétiques afin de guider les choix de conception. Mais les enjeux énergétiques se posent aussi au niveau de la rénovation des bâtiments. C'est dans ce contexte que se place le projet Fourminergie. Le projet s'intéresse à l'amélioration thermique des maisons du quartier de Malartic à Gradignan (proche de Bordeaux). Le quartier est composé de maisons ayant été construites pour un budget très faible dans les années 70 et qui sont particulièrement défectueuses sur le plan thermique. Depuis 2006, une association de quartier (*Des fourmis dans le compteur*) réfléchit à la mutualisation de moyens et de connaissances pour la rénovation énergétique des maisons. L'association dénombre plus de 70 adhérents représentant 40 maisons dans le quartier de Malartic. Le projet Fourminergie (2012-2016) a associé les adhérents de l'association, des économistes de la construction, des spécialistes en thermique et énergétique et des chercheurs en aide à la décision. Il présentait trois enjeux : (1) le développement de méthodes et de modèles pour l'instrumentation et la simulation des maisons existantes, (2) la proposition d'une méthode d'aide à la décision pour le choix de solutions de rénovation et (3) la création d'un système de mutualisation des moyens permettant une action au niveau du quartier. Le travail présenté dans cette partie se positionne sur le deuxième enjeu : la proposition d'une approche d'aide à la décision. La question posée est d'identifier, pour une maison et des propriétaires donnés, la solution de rénovation (i.e. le bouquet de travaux), la plus pertinente.

3.1. Etat de l'art

La littérature scientifique a proposé de nombreux outils, méthodes et approches pour répondre à la problématique de l'aide à la décision pour la rénovation thermique de bâtiments. Nielsen, Jensen et al. (2016) ont identifié 43 outils d'aide à la décision pour sélectionner des projets de rénovation de bâtiments. Ces outils constituent un corpus intéressant et pertinent pour de nombreux contextes d'aide à la décision en matière de rénovation. Cependant, seuls certains de ces outils sont réellement utilisables pour d'autres études de cas que celles sur lesquels ils sont appliqués, en raison de leur indisponibilité ou d'un manque de mise à jour de leurs bases de données (Nielsen, Jensen et al. 2016).

De plus, peu de ces outils sont adaptés ou adaptables à notre contexte spécifique (i.e. rénovation de maisons en France).

Cette liste d'outils peut être complétée par différents modèles proposés dans la littérature scientifique pour la rénovation thermique : système expert (Taillandier, Aries et al. 2013), optimisation (Juan, Gao et al. 2010, Gram-Hanssen 2014, Xu, Kim et al. 2015), analyse coûts-bénéfices (Friedman, Becker et al. 2014), etc. Ces approches, bien qu'intéressantes, ne répondent pas complètement à notre problématique. En effet, beaucoup partagent les mêmes inconvénients, ne prenant pas en compte : (a) les contraintes techniques (e.g. action non réalisable dans la maison, particularités du site, etc.), (b) les différents critères possibles (e.g. énergie, confort, coût d'investissement, etc.), (c) les préférences et contraintes du propriétaire (e.g. budget, conscience écologique, etc.) et (d) les incertitudes (sur la maison, les actions possibles, etc.). De plus, ces modèles, s'ils sont pertinents d'un point de vue technique, ont une limitation majeure qui diminue leur intérêt dans un contexte réel : ils ne considèrent pas (ou peu) la place du propriétaire et/ou de l'occupant dans un processus global, qui couvre une large période, de l'envie première de rénovation à la vie quotidienne après les travaux. Comme je l'ai exposé dans la **partie 2**, de nombreuses études démontrent qu'il existe un écart important entre l'évaluation prévisionnelle de la consommation d'énergie après rénovation et la consommation réelle en raison du comportement des occupants. Idéalement, la stratégie de rénovation devrait agir simultanément sur le système technique et sur le comportement du propriétaire, afin de réduire la consommation d'énergie.

Différentes approches ont été développées pour prédire ou améliorer les comportements et les pratiques pro-environnementales des occupants (e.g. Attitude-Behaviour-Context (Guagnano, Stern et al. 1995), Motivation-Opportunity-Ability (Thøgersen 1995), etc.). Mais leur efficacité réelle pour induire un changement de comportement durable est discutée : un inconvénient majeur est leur focalisation sur l'individu et la faible prise en compte du contexte (Moezzi and Lutzenhi 2010, Shove 2010). L'utilisation d'une stratégie qui considère non seulement l'individu, mais aussi une amélioration plus globale de la culture pro-environnementale en agissant sur des structures sociales plus larges, apparaît comme plus efficace qu'une approche centrée sur l'individu (Jugert, Greenaway et al. 2016). Gram-Hanssen (2014) propose d'utiliser les projets communautaires, le dialogue entre les propriétaires et différents types de processus d'apprentissage social. Le processus doit impliquer directement le propriétaire avant et après la rénovation, lui donner les informations pertinentes (Desmedt, Vekemans et al. 2009), le guider tout au long du processus et structurer une communauté partageant une culture pro-environnementale. C'est dans cette perspective que s'inscrit ce travail, en incluant l'outil développé dans le processus global de rénovation et en s'appuyant sur l'association *Des fourmis dans le compteur* en tant que réseau local d'acteurs.

J'ai proposé un outil appelé ARD-Fourmi (*Aide à la Réflexion et à la Décision*) qui a été conçu comme un support pour l'analyse, le partage d'informations et la prise de décision. Structurée autour d'un modèle multicritère d'aide à la décision (MCDA), l'approche proposée intègre fortement les propriétaires afin d'accroître leur compréhension et leur désir d'actions de rénovation, et de leur permettre de partager leurs connaissances avec les autres occupants. Les prochaines parties détailleront le fonctionnement de l'outil ARD-Fourmi.

3.2. Approche

L'approche de modélisation utilisée dans ARD-Fourmi visait à réunir des experts de différents domaines et les habitants de Malartic au travers de l'association *Des fourmis dans le compteur*. Au lieu d'identifier une solution unique qui pourrait être proposée pour l'ensemble des maisons, l'outil d'aide à la décision permet : (a) de fournir des solutions de rénovation pertinentes au cas par cas, (b) d'intégrer explicitement les préférences des propriétaires et (c) de proposer une approche et un résultat

qui peuvent être facilement compris par le propriétaire. Ces trois attentes nous ont conduit à une méthodologie de développement logiciel de type *Agile* (Abrahamson, Salo et al. 2002) : les utilisateurs finaux, i.e. les habitants de Malartic, ont été impliqués dans le processus de développement de l'outil, via un processus itératif de construction de l'outil comprenant de nombreux échanges avec les différentes parties prenantes (experts et habitants) (**Figure 3.5**).

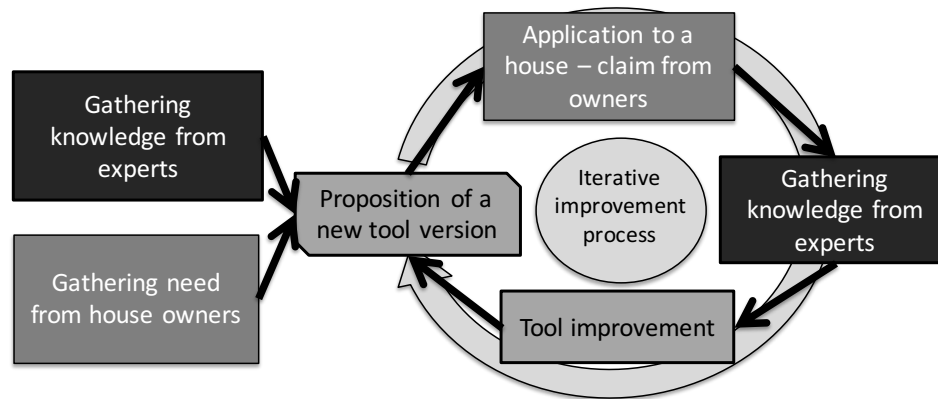


Fig 3.5. *Approche de conception d'ARD-Fourmi (Taillandier, Mora et al. 2016)*

L'approche utilise une base de connaissances qui a été construite à partir de la littérature scientifique et technique, de l'équipe d'experts et des habitants de Malartic. Comme j'ai pu l'exposer dans le **Chapitre 1 partie 6.3**, aucune technique unique de recueil de connaissance ne saurait être adaptée à toutes les sources de connaissances, rendant nécessaire le recours à différentes méthodes en fonction du type de connaissances et de ses sources (littérature, expert et habitants du quartier) :

Littérature. Les données et les informations proviennent, ici, de la lecture classique de thèses, d'articles et de rapports de projets.

Experts. Pour acquérir des connaissances auprès d'experts, un ensemble d'entretiens semi-dirigés a été effectué et des questionnaires ont été envoyés pour compléter les données. Plusieurs experts ont contribué à l'outil : un consultant en conception thermique, des chercheurs en thermique du bâtiment, en mécanique, une architecte et un économiste de la construction. Ces experts ont été sélectionnés en fonction de leur niveau d'expertise, de leur intérêt pour le projet, de leur motivation et de leur disponibilité.

Habitants. Les habitants de Malartic ont été consultés au travers de l'association *Des fourmis dans le compteur*. Pour obtenir des données et informations opérationnelles, une combinaison de questionnaires et d'entrevues semi-dirigées a été utilisée dans un premier temps. Les questionnaires ont permis de révéler les tendances en obtenant les résultats d'un grand nombre de personnes. Des entretiens semi-dirigés ont été nécessaires pour une analyse approfondie des pratiques. Ces deux approches sont complémentaires. De plus, une série d'études de cas réels a été réalisée afin d'améliorer l'outil (approche *Agile*).

Par ailleurs, plusieurs réunions ont été organisées réunissant des experts, des membres actifs de l'association et des habitants de Malartic afin de permettre une communication directe et de favoriser les échanges entre ces différents publics. De même, certains des experts ont été impliqués dans les études de cas réels, ce qui leur a permis de comprendre le fonctionnement et l'intérêt de l'outil comme support de réflexion et de répondre à des questions très précises que pouvaient se poser les habitants. Par exemple, l'ensemble des critères retenus résulte de nombreux allers-retours entre les différentes parties prenantes pour confronter les opinions, les préférences et les objectifs des habitants avec la capacité des experts à fournir des données pertinentes sur les critères souhaités. Le processus utilisé pour obtenir l'ensemble des critères est développé dans la **partie 3.3**.

Le recueil de connaissances, la modélisation et l'implémentation du modèle se sont faits en continu et de façon itérative, tel qu'exposé dans la **Figure 3.5**. L'outil ARD-Fourmi combine une interface via un tableur (Excel®) déjà connue et utilisée par la plupart des habitants, et un moteur de calcul en Java. Ce choix a été fait en fonction de la volonté d'assurer l'utilité et l'utilisabilité (Davis, Bagozzi et al. 1989) de l'outil et de l'approche globale. Les sections suivantes exposeront le fonctionnement de la méthode et discuteront de sa dimension didactique.

3.3. Formalisation du modèle décisionnel

J'ai présenté dans le **Chapitre 1 partie 6.4**, la démarche de modélisation d'un problème décisionnel. La conception itérative de l'outil (**Figure 3.5**) s'intègre dans cette démarche. Dans un premier temps, j'ai cherché à comprendre les enjeux décisionnels : quelles sont les options possibles, quels sont les critères et les contraintes, quelle est la vision des décideurs (propriétaires) sur le processus de décision... Au travers des entretiens, des réunions et des recherches bibliographiques, j'ai pu répondre à ces questions. Je ne détaillerai ici que les aspects qui me paraissent les plus importants, davantage d'informations pouvant être trouvées dans l'article (Taillandier, Mora et al. 2016).

Problématique. Plusieurs questions se posaient pour les propriétaires ; certaines étaient relatives au problème décisionnel en tant que tel (e.g. *quels travaux devrais-je faire pour rénover ma maison ?*) et d'autres à des aspects d'informations autour du problème (e.g. *Quelles sont les aides financières auxquelles je pourrais avoir droit pour la rénovation de ma maison ?*). A la sortie des entretiens, deux enjeux décisionnels nous ont semblé importants : (a) le choix d'un bouquet de travaux adapté à la maison et aux souhaits et préférences du propriétaire, et (b) le choix des matériaux d'isolation. Pour ce deuxième point, certains propriétaires se posaient la question de l'intérêt de payer un supplément pour l'utilisation d'isolants naturels (e.g. fibre de bois, ouate de cellulose, etc.) plutôt que d'isolants classiques (e.g. laine de verre, polystyrène, etc.). Afin de répondre à ces deux enjeux, j'ai proposé un processus en deux phases, appelées respectivement *Macro* et *Micro*. Dans la phase *Macro*, on s'intéresse au choix d'un ensemble de travaux cohérents, et dans la phase *Micro*, on spécifie la solution retenue en phase *Macro*, en précisant les matériaux utilisés. Selon que l'on utilise une isolation par l'intérieur, par l'extérieur, en façade, en toiture, les isolants possibles ne sont pas les mêmes. Ce choix de décomposer le problème en deux phases a été fait afin de guider la discussion avec les propriétaires lors de l'utilisation de l'outil (voir **partie 3.4**).

Options. La définition des options (i.e. des bouquets de travaux possibles) est un point particulièrement important dans le cadre d'un problème de rénovation de bâtiment. Pour la phase *Macro*, une stratégie possible pour les définir consiste à construire toutes les solutions possibles : une solution pourrait être d'isoler un seul mur, une autre pourrait ne différer que par l'épaisseur de l'isolant, etc. Cependant, parmi toutes ces solutions théoriques, beaucoup ne sont pas pertinentes, car irréalisables dans le monde réel (e.g. l'isolation est souvent disponible dans des épaisseurs prédéfinies) ou inefficaces (e.g. isoler le sol et non les murs et le toit n'a qu'un faible intérêt). Nous avons choisi de faire construire par les experts, des ensembles de travaux cohérents plutôt que de travailler sur des actions individuelles. Cela permet d'éviter une explosion combinatoire quant au nombre d'options possibles et de limiter l'espace des solutions à des stratégies qui soient globalement pertinentes et cohérentes. Ces solutions ont été construites selon une approche classique où l'expert propose en premier lieu des solutions peu onéreuses et ajoute progressivement de nouveaux travaux en cohérence avec les précédents ; e.g. (1) ventilation mécanique, (2) ventilation mécanique et isolation de la toiture, (3) ventilation mécanique, isolation de la toiture et des murs... La liste contient 27 solutions auxquels j'ai ajouté la stratégie consistant à ne faire aucun travaux –*statu quo*– (utile comme point de comparaison). Pour la phase *Micro*, une liste de 16 types d'isolants a été construite en tenant compte de la zone géographique, de la volonté des propriétaires et des propositions des experts.

Critères. Le choix des critères est basé sur la combinaison de l'analyse de la littérature, de l'avis des experts et des habitants. Le point de départ est la volonté de s'inscrire dans une logique de développement durable. Les critères ont donc été identifiés en fonction de cet objectif et appartiennent aux trois piliers du développement durable (i.e. environnement, économie et social). La construction de la liste de critères s'est faite par processus incrémental : (a) définition des objectifs principaux, (b) entrevues semi-dirigées avec des habitants pour comprendre leurs attentes et ce qui leur semblait important, (c) croisement de ces attentes avec la littérature scientifique afin d'établir une première liste de critères, (d) rencontre avec des experts afin d'avoir leur avis sur la liste des critères et leur capacité à les évaluer, (e) échange avec les habitants sur cette liste et utilisation d'un questionnaire anonyme pour obtenir leur opinion (avec une première évaluation des préférences entre les critères), (f) mise à jour de la liste des critères et nouvelle discussion avec des experts et (g) expérimentation de l'outil. La liste de critères a évolué tout au long de ce processus. Par exemple, au cours de l'expérimentation, un critère a été ajouté (complexité administrative) afin de prendre en compte un aspect qui semblait important pour le propriétaire et un autre a été reformulé : on a distingué le confort d'été et le confort d'hiver. La liste finale contient 10 critères en phase *Macro* (e.g. énergie économisée, coût d'investissement, opportunité, etc.) et 8 en phase *Micro* (e.g. surcoût, énergie grise, performance au feu, etc.). La liste complète ainsi que les fonctions et méthodes utilisées pour les évaluer sont détaillées dans (Taillandier, Mora et al. 2016).

Choix d'un paradigme et d'un modèle générique. L'analyse du problème décisionnel a conduit au constat suivant : (a) il y a une liste raisonnable d'options (une vingtaine par phase) et (b) de critères (une quinzaine par phase), (c) le décideur est bien identifié (i.e. le(s) propriétaire(s)) et (d) il est largement impliqué dans la décision (capacité de décision, conséquence pour lui, implication émotionnelle et affective, etc.). Le paradigme de l'aide à la décision multicritère (MCDA) est particulièrement adapté à ce type de contexte (ce point sera plus largement discuté dans la **partie 7.1**). La question qui se pose alors est celle du choix d'un modèle générique parmi les nombreux disponibles. Cette question est d'autant plus importante que ce choix peut avoir un impact fort sur le résultat (Zanakis, Solomon et al. 1998). J'ai choisi de baser le processus d'aide à la décision d'ARD-Fourmi sur ELECTRE III stochastique (Roy 1990, Taillandier and Taillandier 2012) qui permet de comparer différentes solutions et de les hiérarchiser en prenant en compte les incertitudes. ELECTRE est un modèle générique classique, largement éprouvé (Govindan and Jepsen 2016) et qui me semblait très adapté à ce problème décisionnel. Ce choix est plus largement discuté dans la **partie 3.6**.

Robustesse. Un aspect important des méthodes d'aide à la décision est la robustesse de la méthode, c'est-à-dire sa capacité à donner un résultat insensible aux variations locales (incertitudes) des données ou des paramètres (Roy 2010). En effet, les méthodes multicritères utilisent différents paramètres comme des poids et des seuils qui peuvent avoir un impact majeur sur le résultat. Afin d'assurer la robustesse des résultats, j'ai choisi d'utiliser la version stochastique d'ELECTRE III (Taillandier and Taillandier 2012), dans laquelle la méthode ELECTRE est couplée à des simulations Monte-Carlo. Dans cette version, le classement avec ELECTRE est établi un grand nombre de fois par simulations Monte-Carlo, en utilisant pour les données d'entrée, un tirage aléatoire selon des lois de distribution prédéfinies (détaillées (Taillandier, Mora et al. 2016)). Ce processus permet d'évaluer la sensibilité des résultats à l'incertitude des données d'entrée (i.e. évaluation sur les critères) et des paramètres. Les résultats finaux de la hiérarchisation proviennent de l'analyse de la distribution des résultats.

3.4. Utilisation d'ARD-Fourmi

L'utilisation de l'outil prend le temps d'une réunion (environ deux heures). La **partie 3.5** détaille, sur un cas d'application le déroulement de cette séance. Une grande partie de la réunion est consacrée à la discussion. Normalement, l'utilisation de l'outil doit conduire à approfondir la discussion et à poser de nouvelles questions ; c'est là que le rôle du facilitateur est primordial. Il n'est pas qu'un opérateur d'outil, mais il doit guider le processus de discussion, l'outil n'étant qu'un support.

L'utilisation de l'outil s'inscrit dans un processus plus large. Il intervient généralement dans le début de ce processus, alors que le propriétaire a fait connaître à l'association *Des fourmis dans le compteur* son envie, son intérêt ou simplement une curiosité pour la rénovation de sa maison. Après la réunion avec l'outil, un temps de maturation est alors généralement nécessaire. Les étapes suivantes (recherche d'informations, discussion avec d'autres habitants, etc.) vont conduire le propriétaire à affirmer son projet et à lui donner une dimension plus concrète jusqu'à sa réalisation. Le processus, depuis la volonté du propriétaire de faire des travaux ou l'expression d'une curiosité à ce sujet, jusqu'à la fin des travaux, est assez long : il a duré environ deux ans pour les premiers propriétaires qui ont achevé les travaux. L'ensemble du processus implique d'autres acteurs tels qu'une architecte qui a participé à la construction de l'outil et qui assure le rôle de maître d'œuvre pour les travaux de rénovation (si le propriétaire le souhaite). L'association dispose également d'une liste d'entreprises recommandées qui ont déjà travaillé avec des coopérateurs. Ces entreprises n'ont pas été impliquées dans l'élaboration de l'outil afin d'éviter les conflits d'intérêts : en effet, certaines d'entre elles pourraient favoriser des solutions particulières (par exemple, plusieurs entreprises n'emploient pas de matériaux d'isolation naturels). Elles n'agissent que dans les dernières étapes du processus global, mais connaissent l'outil grâce aux membres de l'association avec qui elles ont travaillé. Je reviendrai dans **la partie 3.6** sur l'importance du processus global.

3.5. Application

Présentation des études de cas. Afin d'exposer la façon dont j'ai utilisé ARD-Fourmi dans le processus décisionnel, je présenterai son utilisation avec l'une des propriétaires du quartier de Malartic. L'expérimentation a consisté en une rencontre avec la propriétaire de la maison, en présence de deux membres actifs de l'association *Des fourmis dans le compteur*, et d'un facilitateur (j'ai assuré cette fonction) en charge de guider la réunion et d'utiliser l'outil. La propriétaire en était au début du processus de rénovation (témoignage d'intérêt pour la rénovation). La réunion commence par une présentation de l'objectif de la réunion, puis de l'outil ARD-Fourmi. Le facilitateur doit ensuite interroger le propriétaire afin qu'il fournisse différentes informations nécessaires pour les calculs : le type de maison, l'année de construction, les travaux déjà réalisés, etc. L'interface Excel© d'ARD-Fourmi permet au facilitateur de rentrer les données dans l'outil tout en les exposant au propriétaire afin que celui-ci puisse les valider directement. L'outil fournit des valeurs par défaut pour la plupart des valeurs relatives à la maison (caractéristiques dimensionnelles de la maison, consommation d'énergie...) à partir de sa typologie. Évidemment, si le propriétaire dispose d'informations plus précises concernant sa maison, il peut mettre à jour les valeurs par défaut. La maison de l'expérimentation était de type Castille T5. Datant de 1975, avec une surface habitable de 118m², elle avait une consommation initiale de 169 kWh/m².an. Elle a été partiellement rénovée en 2010 lorsque les fenêtres d'origine ont été remplacées par des fenêtres à double vitrage sur la façade nord. Le facilitateur pose ensuite au propriétaire des questions afin d'évaluer les critères sociaux (e.g. gêne des travaux, confort, etc.). Par exemple, pour cette propriétaire, l'exécution des travaux à l'intérieur de la maison posait problème, même si elle n'était pas complètement opposée à cette option. La maison n'a pas de mitoyenneté et la propriétaire n'avait aucune préoccupation particulière vis-à-vis du voisinage. Elle a aussi fait remonter des problèmes de confort en hiver dus à un manque

d'homogénéité des températures entre les pièces. Comme pour la première étape, le formulaire Excel© permet de guider la démarche et de noter au fur et à mesure les réponses données par le propriétaire.

Enfin, il est nécessaire de fixer les poids associés à chaque critère. Dans notre cas, la propriétaire voulait mettre l'accent sur les aspects environnementaux, mais elle était également soucieuse du confort. A partir de ces préférences exprimées, l'outil propose un poids pour chaque critère. La construction du poids se fait à partir de règles basées sur ce qu'a exprimé la propriétaire ; e.g. un avis du type *je suis beaucoup plus soucieuse de l'environnement que de la gêne occasionnée par les travaux* se traduira par un poids beaucoup plus fort pour le critère d'économie d'énergie que pour celui de gêne de travaux. Les poids peuvent être modifiés par le facilitateur afin de mieux appréhender l'opinion du propriétaire. Il est à noter que les valeurs des poids retenus ne sont pas données au propriétaire, car ils n'ont de sens qu'au regard du modèle générique utilisé (ici ELECTRE III). La même démarche est appliquée pour les seuils et les autres paramètres de la méthode. Le facilitateur a sur ce point un rôle clef : il doit donc bien connaître le fonctionnement d'ELECTRE mais aussi bien comprendre les préférences du propriétaire. Parallèlement, l'outil dispose d'un jeu de paramètres par défaut correspondant à des profils type (*Promotion environnementale, Limitation des risques financiers*, etc.). Le propriétaire peut les utiliser pour tester d'autres pondérations et voir l'influence des poids sur le résultat final.

Dans cette application, deux solutions (S24 et S25) ont été disqualifiées en raison de l'impossibilité technique pour cette maison de les mettre en œuvre à un coût raisonnable. Ces deux solutions proposent une isolation de la dalle, or cette maison a été construite sur une dalle rigide, assurant le rôle de fondation. Une isolation par le dessous de la dalle n'est donc pas possible et une isolation par l'intérieur poserait d'importants problèmes constructifs (e.g. refaire tous les sols, modifier les ouvrants de porte, etc.).

Résultats. A partir des données de la maison, des réponses au questionnaire de la propriétaire et de l'expression de ses préférences, ARD-Fourmi a évalué les solutions et a proposé les solutions les plus pertinentes. Pour les deux phases, 10 000 simulations ont été effectuées (tirages Monte-Carlo). Pour chaque simulation, les solutions sont hiérarchisées ; le rang 1 correspond à la solution la mieux classée. La **Figure 3.6** présente le diagramme moustache (*boxplot*) des résultats de la phase *Macro*. Afin de guider sa lecture, je précise que les solutions ont été classées par ordre d'importance des travaux : la solution S0 consiste à ne rien faire, et la solution S26 correspond à une rénovation globale de la maison. Les trois solutions *Macro* recommandées par l'outil (i.e. celles qui ont le rang le plus bas) sont : (a) S26 - Isolation du plancher haut (toit) par l'extérieur, remplacement des fenêtres et des portes, isolation des murs par l'extérieur et ventilation mécanique hygroréglable, (b) S11 - Isolation des murs par l'extérieur, remplacement de toutes les fenêtres et portes et ventilation mécanique hygroréglable, et (c) S3 - Isolation des murs par l'extérieur et ventilation mécanique hygroréglable.

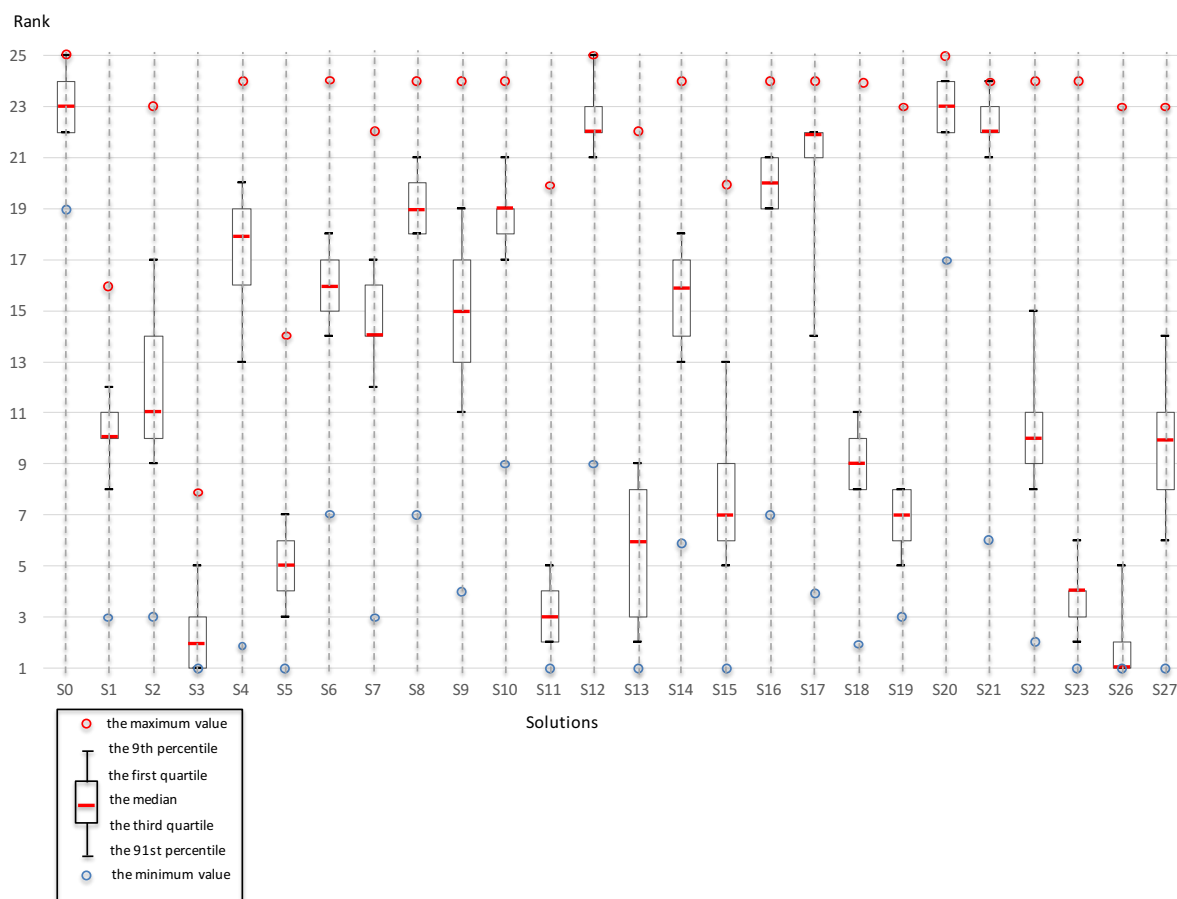


Fig 3.6. Diagramme moustache des résultats de la phase Macro (Taillandier, Mora et al. 2016)

A partir de ces résultats, la propriétaire a décidé de retenir la solution S26 (rénovation globale). A partir de cette solution, ARD-Fourmi a proposé un ensemble de solutions *Micro* correspondant au choix du type d'isolation pour le plancher haut et les murs. A partir des 16 types d'isolation de la base de données et en tenant compte de l'impossibilité d'utiliser certains types d'isolation pour l'isolation des murs ou du toit par l'extérieur, 36 solutions *Micro* ont été proposées. Les trois solutions retenues par l'outil sont : (a) le liège pour les murs et le toit, (b) le liège pour les murs et les panneaux de fibres de bois pour le toit et (c) le liège pour les murs et la laine de cellulose pour le toit. La propriétaire a choisi dans une première approche de retenir la solution proposant du liège pour les murs et le toit mais elle aimerait avoir des informations plus précises sur les panneaux de liège et de fibres de bois (utilisés dans la deuxième solution du classement) pour confirmer ou changer sa première décision.

Lors de la réunion, ce ne sont pas les diagrammes moustache qui sont exposés aux propriétaires, mais directement une hiérarchisation des solutions construite à partir des valeurs moyennes des rangs. De plus, ces résultats sont expliqués par le facilitateur et discutés avec le propriétaire. Afin d'aider à cette discussion, différents types de résultats sont proposés : comparaison des solutions pour chaque critère, des diagrammes radar, etc. Ils permettent aux propriétaires de bien comprendre les résultats et leur sont envoyés après la réunion dans un rapport. Enfin, sont présents lors de la réunion des membres de l'association qui peuvent intervenir pour discuter certains points en s'appuyant sur leurs propres expériences. Pour cette expérimentation, les deux membres avaient déjà entrepris des travaux dans leur propre maison et avaient déjà des retours d'expériences sur leur efficacité ou les difficultés rencontrées. La plus grosse partie de la réunion à consister en des discussions ; ce sont elles, plus que les résultats, qui ont vocation à enrichir la réflexion du propriétaire.

3.6. Discussion

Choix du modèle générique. J'ai choisi d'utiliser ELECTRE III pour ce problème d'aide à la décision, bien que AHP (Saaty 1980) soit la méthode la plus utilisée pour la rénovation de bâtiments (Nielsen, Jensen et al. 2016). ELECTRE présente plusieurs inconvénients par rapport à AHP : (a) il est plus complexe à utiliser, (b) il y a plus de paramètres à définir et (c) il présente des problèmes d'inversion de rang (*rank reverse*) (Cinelli, Coles et al. 2014). Cependant, plusieurs auteurs (Arroyo 2014, Cinelli, Coles et al. 2014) ont montré les limites de l'AHP dans un contexte lié au développement durable, notamment en raison de son haut degré de compensation parmi les critères : un score très bas sur un critère peut être compensé par un score élevé sur un autre critère (e.g. une option mauvaise sur la dimension environnementale peut être bien classée si elle est excellente sur l'aspect économique). Cela va à l'encontre des principes du développement durable qui présuppose un équilibre entre les différentes dimensions ; cela limite l'intérêt de AHP dans un tel contexte.

Chaque modèle générique d'aide à la décision multicritère a ses inconvénients et avantages ; aucun ne saurait être pertinent pour répondre à tous les problèmes décisionnels. La question est alors : *comment choisir le bon ?* Il n'existe aucune approche ou aucun outil pour sélectionner le meilleur modèle générique de MCDA (Ishizaka and Nemery 2013), mais Guitouni and Martel (1998) suggèrent différents points à étudier pour en choisir un adapté à un contexte donné : le nombre de décideurs, les préférences des décideurs entre évaluation directe et comparaison par paires, la quantité et la qualité des données disponibles, le degré de compensation, le respect des hypothèses du modèle et le support proposé. Dans notre contexte, le processus naturel utilisé par la plupart des propriétaires consiste à comparer par paires les différentes solutions. La notion de *veto* est aussi souvent utilisée par le décideur. Par exemple, dans l'une des expérimentations où le coût de la solution était très important pour le propriétaire (en raison de son budget limité), j'ai retenu la combinaison d'un poids fort pour le critère *Coût d'investissement* et d'un seuil de veto restrictif (comme le permet ELECTRE III), pénalisant la solution avec un coût dépassant le budget ; cet exemple illustre le problème que poserait une méthode très compensatoire comme AHP. Par ailleurs, la complexité plus élevée d'ELECTRE par rapport à AHP et son nombre plus élevé de paramètres n'est pas un inconvénient majeur dans le contexte considéré, car le nombre élevé de paramètres est nécessaire pour décrire l'opinion du propriétaire (e.g. les seuils de préférence de *veto*, etc.). De plus, l'application de la méthode est assurée par le facilitateur qui a en charge de traduire les opinions des propriétaires sous la forme de valeurs de paramètres. Enfin, la version d'ELECTRE stochastique (Tervonen, Figueira et al. 2009, Taillandier and Taillandier 2012), en considérant les incertitudes sur les données et les paramètres, permet de qualifier la robustesse des choix. Par conséquent, la méthode ELECTRE III stochastique s'avère très adaptée à ce contexte décisionnel.

Apport de connaissances. L'apport d'ARD-Fourmi ne se limite pas à la prescription d'une solution : il a surtout été conçu pour susciter des questions de la part du propriétaire, qu'il n'avait pas nécessairement à l'esprit au début. L'outil enrichit sa réflexion, comme nous l'avons expérimenté au cours des nombreux ateliers avec les habitants du quartier et les membres de l'association. Il n'a pas pour but de fournir des réponses directes au propriétaire, mais de l'aider à construire et à mûrir son projet de rénovation. Il a aussi vocation à être un objet de transmission de connaissances en tant que support de discussion. Les compétences et les connaissances des membres de l'association et plus généralement des propriétaires des maisons de Malartic sont fortement hétérogènes. Plusieurs membres sont réellement actifs dans le domaine environnemental et ont joué un rôle majeur dans la structuration de l'outil ; ils transmettent les valeurs de l'association (promotion environnementale) et attachent de l'importance au partage des compétences et des connaissances. Certains membres ont déjà une bonne connaissance des enjeux liés à la consommation d'énergie et des actions de rénovation, et ils ont parfois déjà mûri leur projet de rénovation ; ils n'ont pas besoin d'une aide à la décision, mais

pourraient trouver dans l'outil une confirmation de leur choix. La plupart des nouveaux coopérateurs ont cependant une faible connaissance des travaux de rénovation et ont beaucoup de questions à ce sujet. L'outil est une première étape qui leur permet de commencer à réfléchir à leur projet de rénovation.

Modifier le comportement. Le projet Fourminergie ne se limitait pas à créer un outil d'aide à la décision, mais avait aussi pour enjeu de fédérer une communauté locale (i.e. l'association) autour de questions environnementales. L'outil est un « produit d'appel », qui peut motiver de nouveaux membres ou des habitants à venir à la rencontre des membres de l'association et à échanger autour des projets de rénovation. L'utilisation de l'outil est l'occasion d'échanges et de discussions, mais cela ne suffit pas à faire changer les mentalités et les comportements. Par contre, en tant qu'objet de structuration de connaissances et d'échanges, il permet de renforcer les liens de la communauté. C'est l'appartenance à cette communauté et le travail de l'association qui, pas à pas, peut faire changer les mentalités, en diffusant des informations (e.g. *quels sont les gestes pour économiser de l'énergie ? quel est l'impact de la température de chauffage ?*), en partageant des expériences, etc. En ce sens, ARD-Fourmi peut avoir un impact à long terme particulièrement intéressant. Je reviendrai sur ce point dans **la partie 5.3**.

3.7. Conclusion et perspectives

J'ai présenté dans cette partie un modèle et un outil permettant d'aider un propriétaire à choisir une solution de rénovation afin d'améliorer les performances thermiques de sa maison. Le développement du modèle s'est fait dans un souci de combiner des ambitions scientifiques et une attention constante aux besoins des utilisateurs finaux et aux spécificités du contexte d'application. Un outil a été développé et appliqué à différents cas réels (4 cas d'étude à ce jour) au cours d'une phase d'expérimentation.

Une question importante est la capacité de l'outil à être utilisé dans un nouveau contexte. Dans un contexte proche, cela ne poserait pas de réels soucis. Par exemple, il est envisagé de l'utiliser pour un autre quartier proche de Malartic qui partage la même problématique et une typologie voisine pour le bâti et les propriétaires. Pour des contextes très différents (e.g. une autre zone géographique, un autre pays, etc.), il serait nécessaire de faire une nouvelle version de l'outil afin de répondre réellement aux préoccupations des habitants. La démarche resterait identique à celles présentée ici, mais il faudrait établir de nouveaux jeux d'options, de nouveaux critères, etc. Cela rentre dans la logique qui a porté l'élaboration d'ARD-Fourmi, en proposant une co-construction du modèle et un partage de connaissances, qui chemin faisant, a permis de fédérer une communauté. Dans cette perspective, l'association *Des Fourmis dans le compteur* joue un rôle majeur en transformant l'initiative individuelle en un projet de partage pour le quartier Malartic.

4. Optimisation multi-objectif : ECO2D2

La démolition de bâtiments présente, tout comme la rénovation et la conception, de forts enjeux environnementaux (voir **partie 1**). Face à ce constat, l'Union Européenne s'est dotée d'une législation renforçant la nécessité de mieux valoriser les déchets de démolition en fixant un taux minimal de valorisation à 70% (en masse). Parallèlement, de plus en plus de maîtres d'ouvrages, soucieux des impacts environnementaux de leurs ouvrages, même en fin de vie, ont la volonté de considérer cet aspect comme un critère de sélection pour le choix d'une entreprise de démolition. C'est dans cette perspective que l'entreprise bordelaise de démolition BDS a souhaité développer un outil d'aide à la décision pour la démolition. Cet outil avait pour objectif d'aider leurs chargés d'études à mieux évaluer les impacts environnementaux des opérations de démolition et à identifier et développer des stratégies associant performances environnementales et économiques. La problématique pour

l'entreprise était de savoir s'il était possible de proposer des stratégies de démolition minimisant les impacts pour l'environnement sans trop augmenter le prix de leur prestation.

4.1. Etat de l'art

Afin d'atteindre l'objectif de valorisation fixé par l'Union Européenne, différents outils ont été créés pour aider au traitement des déchets de construction. La plupart des outils évaluent la quantité de déchets et les impacts liés au transport et au traitement des déchets (Dumont, Jacquet et al. 2004, Li and Zhang 2013), y compris, parfois, à l'aide de données géographiques quant aux sites de traitement (Buhler, Buhe et al. 2007, Baniyas, Achillas et al. 2011). D'autres outils consistent en un registre des sites de traitement, guidant l'utilisateur vers les sociétés appropriées en fonction de la localisation et du type de déchets concerné (FFB 2016). Tous ces outils ont un point commun : ils partent directement des déchets sans prendre en compte toute la phase de démolition (i.e. du bâtiment à détruire aux déchets générés). Cela constitue une limite importante car la gestion des déchets dépend de l'ensemble du processus de démolition : la façon de démolir influence le traitement des déchets. Par exemple, si les matériaux composant un mur (structure, isolation, revêtement) ne sont pas séparés et triés, il n'est pas possible de les recycler. Or, trier préalablement les déchets requiert des dispositifs particuliers impactant le choix des machines utilisées et les modes de démolition. De plus, le choix d'une stratégie de démolition ne peut se faire qu'en considérant aussi les enjeux économiques, la durée du chantier et les déchets réellement présents.

Peu d'outils proposent d'aider les entreprises de démolition pour le choix de stratégie de démolition. Buhler, Buhe et al. (2007) se focalisent sur le traitement des déchets pour lesquels ils proposent de choisir parmi plusieurs niveaux de tri. Schultmann, Pitzini-Duée et al. (1998) proposent un outil permettant de calculer la quantité de déchets à partir des éléments du bâtiment qui sont saisis dans les plans architecturaux. Avec ces données, l'outil recueille les déchets par type et l'utilisateur doit déterminer le traitement qu'il souhaite pour chaque famille de déchets afin d'obtenir le coût de leur traitement. Les outils disponibles dans la littérature s'intéressent donc plus à l'évaluation qu'à l'aide à la décision, laissant l'utilisateur saisir le volume, la masse, la densité des déchets qu'il a identifiés, les prix des sites de traitement identifiés, puis choisir les traitements pour chaque chantier, en se basant sur son expertise. A notre connaissance, aucun outil ne considère la problématique dans son ensemble depuis l'ouvrage à démolir jusqu'au traitement des déchets, et aucun ne propose un vrai support pour l'aide à la décision.

Nous avons élaboré dans le cadre de la thèse d'Eva Queheille (voir **Annexe D**), financée par BDS, le modèle ECO2D2. Il vise à aider un chargé d'études à construire une stratégie de démolition, couvrant tout le processus de démolition ainsi que les enjeux environnementaux et économiques.

4.2. Modélisation de la déconstruction en tant que problème multi-objectif

Description du contexte. Traditionnellement, les bâtiments en fin de vie sont simplement démolis. Les matériaux le composant sont réduits en morceaux de tailles suffisamment petites pour être mis en bennes et transportés. Les différents matériaux sont alors mélangés, limitant la possibilité de valoriser les différents matériaux. Pour pouvoir atteindre des hauts niveaux de valorisation, une autre approche est nécessaire, il s'agit de la déconstruction. La déconstruction peut être vue comme un processus opérant dans un ordre inverse de la construction : le dernier élément installé lors de la construction d'un bâtiment est le premier élément retiré lors de sa déconstruction. La déconstruction est réalisée par phases successives : installation, curage, évacuation des déchets de curage, démolition de la structure, évacuation des déchets de structure et nettoyage. La première phase, l'installation, consiste à préparer le site avant les travaux de déconstruction. Elle comprend l'installation de clôtures, de barrières, d'électricité et d'eau... L'étape de curage peut alors commencer. Les ouvriers, à l'aide ou non de

machines (e.g. mini-pelles), enlèvent les matériaux à l'intérieur du bâtiment, comme les meubles, les cloisons, les fenêtres, les portes, les équipements électriques... Les matériaux sont évacués dans des conteneurs (bennes) qui sont chargés par des travailleurs directement ou à l'aide de chargeurs. Le nombre et le type de conteneurs dépend du volume et du type de déchets et de la volonté plus ou moins importante de trier directement sur site. Pour certains projets de démolition, en fonction du bâtiment et du site, l'étape de curage peut être supprimée : le bâtiment est directement démoli sans curage préalable, ce qui est plus rapide mais limite largement la possibilité de tri. Lorsque l'étape de curage est achevée, une pelle démolit la partie structurelle du bâtiment, du haut (le toit) vers le bas (les fondations). Ensuite, la pelle charge les déchets dans des conteneurs ou directement dans des camions. Les travaux de déconstruction s'achèvent lorsque le site est nettoyé et que tous les déchets ont été évacués vers leurs sites de traitement. Différents traitements sont possibles pour les déchets, selon leur nature et les possibilités offertes par le site de traitement : par ordre de valeur ajoutée, on peut citer : (a) réemploi-réutilisation, (b) recyclage, (c) autre valorisation matière ou énergétique, (d) stockage.

Analyse du problème décisionnel et modèle générique. Comme pour toute approche d'aide à la décision, il faut dans un premier temps analyser le problème décisionnel (voir **Chapitre 1 partie 6.4**). Dans ce problème, il y a un unique décideur, le chargé d'études, qui doit pouvoir mener à bien son étude dans un temps relativement court ; en général le chargé d'études traite plusieurs études par jour. Il doit se baser, autant que faire se peut, sur des critères objectifs, sans exprimer trop fortement ses préférences personnelles : il doit porter la vision de l'entreprise. Les options (i.e. stratégie de démolition) possibles peuvent être en très grand nombre. En effet, une option doit préciser le nombre d'ouvriers mobilisés à chaque phase, l'utilisation ou non de machines, le type et le nombre de conteneurs, le traitement pour chaque type de déchets, etc. On peut ainsi construire des milliards de stratégies possibles pour chaque chantier. Par ailleurs, dans ce problème décisionnel, il nous faut considérer plusieurs critères (points de vue contradictoires) : coût, délai, impact environnemental, etc. Nous avons choisi, pour répondre à ce problème décisionnel, de faire appel à l'optimisation multi-objectif. Ce modèle générique est particulièrement adapté lorsque l'on a : (a) plusieurs critères/objectifs contradictoires, (b) un très grand nombre (voire une infinité) d'options, (c) une faible implication personnelle (enjeux techniques), (d) pas de préférences fortes vis-à-vis des critères. Ce point est plus largement discuté dans la **partie 5.1**.

Objectifs. La première étape de la modélisation d'un problème multi-objectif consiste à déterminer les objectifs. Comme nous l'avons exposé dans l'introduction, ces objectifs ont été définis du point de vue d'une entreprise de démolition. Sur la base d'une discussion entre les parties prenantes de l'entreprise (chef d'entreprise, chargé d'études) et les chercheurs, trois objectifs ont été fixés dans une première itération : (a) la durée du chantier (nombre de jours), (b) les coûts de l'opération de déconstruction pour la société de déconstruction (euros), y compris le traitement des déchets (pouvant conduire à des gains), et (c) le taux de valorisation (pourcentage massique). Les objectifs de coût et de durée sont classiques dans tout projet. Le taux de valorisation a été retenu afin de comparer les stratégies avec l'objectif fixé par l'Union Européenne (i.e. valorisation en masse des déchets de 70%). Il est à noter que ce taux de valorisation ne couvre que très partiellement les enjeux environnementaux liés à la déconstruction. Ce point est discuté dans la **partie 4.5**.

Variables. Après avoir défini les objectifs, il nous faut définir les variables qui seront intégrées dans le modèle. On distingue trois types de variables : les variables de décision, les variables de connaissances et les variables d'étude. Les variables de décisions sont toutes celles sur lesquelles le chargé d'études va pouvoir agir pour construire sa stratégie (e.g. nombre d'ouvriers, type de traitement, etc.). Elles sont au cœur de l'aide à la décision et leur valeur conditionne largement les performances. Dans cette version du modèle, 17 variables de décision sont utilisées pour calculer les fonctions objectif (ce point est discuté dans la **partie 4.5**). Les variables de connaissances rassemblent

toutes les données nécessaires à l'exécution du calcul des fonctions objectif. Elles peuvent être incertaines (i.e. plus ou moins précisément connues) mais sont *a priori* constantes dans un contexte donné. Les variables de connaissances concernent, par exemple, les rendements pour l'exécution des tâches (e.g. chargement des déchets, démolition d'un voile en béton armé, etc.), les coûts unitaires des matériaux et matériels, les emplacements des sites de traitement avec les coûts associés... Ces valeurs sont nécessaires pour estimer la durée du chantier, le coût global et le taux de valorisation (e.g. valorisation moyenne selon le type de déchet et le type de traitement). Elles sont adaptées à un contexte donné, et doivent être réévaluées pour un nouveau contexte (e.g. chantier dans un autre pays). Les variables d'étude dépendent du bâtiment à démolir et sont caractéristiques du projet. Elles rassemblent, par exemple, des données liées aux quantités de matériaux (e.g. surface de voiles en béton armé, surface de dalle, nombre de fenêtres, etc.) des bâtiments à démolir.

Contraintes. Afin de construire des stratégies qui peuvent être réellement mises en œuvre, plusieurs contraintes ont été modélisées. La première concerne le choix du traitement du déchet vis-à-vis du mode de déconstruction retenu : par exemple, certains déchets ne peuvent pas être triés si la démolition s'est effectuée sans curage préalable. Une deuxième contrainte porte sur la composition des équipes : un nombre minimum d'ouvriers peut être nécessaire pour effectuer certaines tâches (e.g. curage), et chaque équipe doit comporter un ou plusieurs chefs d'équipe selon la taille de l'équipe d'ouvriers. Enfin, selon l'étendue du chantier, le recours aux machines peut être limité.

Fonctions objectif. La modélisation d'un problème décisionnel sous la forme d'une optimisation multi-objectif nécessite de formaliser les fonctions objectifs. Les fonctions objectifs sont des fonctions mathématiques ou des algorithmes faisant le lien entre les variables et les objectifs : elles expriment la valeur d'un objectif selon les valeurs des variables de décision. Une étape intermédiaire, qui peut se révéler intéressante, consiste à modéliser, les dépendances entre les variables et les objectifs sous la forme d'un graphe (e.g. carte causale). J'en ai donné une illustration au **Chapitre 1 Figure 1.9.a**. Cette représentation qualitative permet de clarifier les dépendances entre variables avant de formaliser mathématiquement (ou sous forme d'algorithme) ces dépendances.

La formalisation des fonctions objectifs représente l'enjeu principal de tout problème d'optimisation ; cette étape doit donc être réalisée avec un soin tout particulier. Nous avons utilisé ici une démarche itérative. A partir d'un outil métier développé en interne (feuille de calcul Excel©) dont se servait le chargé d'études, nous avons construit une première version des fonctions objectifs ; le document contenant déjà des formules d'évaluation des coûts et des délais. Nous avons testé cette première version et l'avons présenté aux chargés d'études (utilisateurs finaux). Suite à ces tests, nous avons modifié les fonctions afin de mieux répondre aux enjeux du système et avons ajouté la fonction relative à la valorisation des déchets. Nous avons resoumis cette nouvelle version à des tests et à une évaluation par des chargés d'études, puis amélioré ces fonctions sur la base des retours. Plusieurs aller-retours ont été nécessaires pour fixer des fonctions jugées satisfaisantes par les chargés d'études. Les fonctions objectifs sont détaillées dans (Queheille, Taillandier et al. 2018). Il est à noter que selon le type de traitement et le type de déchet, l'opération de traitement des déchets peut être un coût (e.g. mise en décharge de déchets dangereux) ou un gain (e.g. revente de matériaux recyclables). C'est grâce à cela, que le surcoût dû au tri peut être rentabilisé sur l'ensemble du processus de déconstruction.

4.3. Méthode d'optimisation

Principe. Si l'on considère les 17 variables de décision et les valeurs que chacune d'entre elles peuvent prendre, plus de 55 milliards de stratégies peuvent être construites. Une exploration complète de l'espace de solutions n'est pas possible compte tenu de l'ensemble des équations et des données requises. Pour répondre au problème combinatoire, nous avons eu recours à des métaheuristiques pour

rechercher des solutions optimales. Une métaheuristique est une technique générique de résolution de problème difficile, qui s'apparente en optimisation, à une stratégie de fouille de l'espace des solutions. Les métaheuristicques font partie des méthodes d'optimisation approchées : elles ne permettent pas de garantir de trouver la(es) vraie(s) solution(s) optimales. Toutefois, face à un problème décisionnel complexe, comme l'est celui de la déconstruction (nombreuses variables de nature variée et en interaction, fonctions objectifs non linéaires...), le recours à une méthode exacte n'est pas possible dans un temps raisonnable (pas de convergence vers la solution). Dans le cadre de l'optimisation multi-objectif, les solutions optimales au sens de Pareto, sont toutes les solutions qui ne sont pas dominées ; i.e. une solution est dominée au sens de Pareto, s'il existe une (ou plusieurs) solution, au moins aussi bonne sur l'ensemble des objectifs, et meilleure sur au moins un. Afin d'optimiser le processus, le modèle a été implémenté en Java, en utilisant la bibliothèque MOEA (Hadka 2017). Cette bibliothèque en opensource, propose de nombreux algorithmes (i.e. métaheuristique) d'optimisation multi-objectifs permettant de pouvoir en tester plusieurs pour le même problème décisionnel.

Sélection de l'algorithme. De nombreux algorithmes d'optimisation multi-objectifs ont été proposés dans la littérature. Le choix de l'algorithme est une question classique dans les problèmes d'optimisation. Comme pour les approches multicritères, aucun algorithme n'est meilleur que tous les autres pour l'ensemble des problèmes d'optimisation (le '*No free lunch theorem*' tel qu'énoncé par (Wolpert and Macready 1997)). Nous avons choisi une solution pragmatique en évaluant, sur notre problème, huit algorithmes classiques et dont la performance est attestée par la littérature : NSGA-II (Deb, Agrawal et al. 2000), OMOPSO (Sierra and Coello Coello 2005), CMA-ES (Igel, Hansen et al. 2007), PAES (Knowles and Corne 1999), SPEA2 (Kim, Hiroyasu et al. 2004), DBEA (Asafuddoula, Ray et al. 2013), MOEA/D (Li and Zhang 2009) et VEGA (Talbi 2009). Une description synthétique de chacun de ces algorithmes se trouve dans (Queheille, Taillandier et al. 2018) ; une description plus détaillée peut être trouvée dans les références accompagnant la liste des algorithmes.

Critères de comparaison de l'algorithme. Afin de définir l'algorithme le plus pertinent par rapport à notre problématique, nous avons défini quatre critères : le nombre de solutions optimales trouvées, la variété des solutions quant aux variables de décision, le pourcentage de solutions qui respectent la réglementation européenne (taux minimum de valorisation de 70%), et le temps de calcul. Pour le premier critère (i.e. nombre de solutions optimales), nous avons considéré les solutions optimales trouvées après avoir supprimé celles qui étaient dominées par des solutions obtenues par un autre algorithme. Cela revient à ne considérer comme optimales que les solutions non dominées, parmi l'ensemble des solutions identifiées par les différents algorithmes. Plus un algorithme trouve un grand nombre de ces solutions optimales, plus l'algorithme est considéré comme approprié. Le deuxième critère (variété de solutions) est calculé par la somme normalisée de l'écart-type sur les variables de décision. Pour les variables de décision qui étaient discrètes (et notamment pour les variables non ordinales), une échelle de proximité a été préconstruite sur laquelle les différentes valeurs possibles ont été positionnées. Nous considérons que plus l'algorithme apporte des solutions diverses, plus il offre des possibilités de choix pour le décideur. Le troisième critère (i.e. valorisation) est un simple rapport entre le nombre de solutions qui ont au moins 70% de taux de valorisation et le nombre total de solutions optimales données par l'algorithme. Le dernier critère (i.e. temps de calcul) est obtenu en mesurant le temps pris par le calcul sur un ordinateur identique. Le nombre de solutions optimales obtenues et le temps de calcul sont des critères classiques pour comparer les algorithmes. Le pourcentage de solutions optimales qui atteignent au moins 70% du taux de valorisation est un critère intéressant au regard du contexte réglementaire européen ; c'est aussi un souhait de BDS. Cependant, ce taux n'a pas été fixé en tant que contrainte d'algorithme car : (a) pour certains chantiers, il n'est pas possible de l'atteindre, (b) parfois il induit des coûts trop importants. Le taux de

valorisation est donc plus une préférence qu'une contrainte pour le décideur. La variété des solutions peut être considérée comme intéressante ou non, selon le problème d'optimisation. Ici, il s'agissait d'une demande de BDS afin de fournir un ensemble de solutions suffisamment variées pour faire réfléchir l'ingénieur d'études quant aux différentes stratégies possibles.

4.4. Application

Afin de tester le modèle développé, un cas d'application a été choisi parmi les études de BDS. Le cas consiste en la déconstruction totale de sept bâtiments voisins dans le centre-ville d'une commune en Gironde.

Stratégie proposée par l'ingénieur d'études. Le cas d'application est une étude réelle pour laquelle l'ingénieur d'études a proposé une stratégie de démolition, en s'appuyant sur son expérience et son expertise. Il a proposé une stratégie de déconstruction d'une durée de 29 jours avec un coût de 89k€. Avec cette stratégie, le taux de valorisation atteint 80 %. L'objectif environnemental respecte donc la réglementation européenne. Ce taux est très satisfaisant, mais deux questions se posaient alors : *Peut-on atteindre un taux de valorisation plus élevé ? et Peut-on diminuer, pour le même taux, la durée et le coût du chantier ?*

Résultats. Afin de répondre à ces deux questions, nous avons instancié le modèle ECO2D2 en utilisant les données du cas d'application ; i.e. nous avons rempli la table des valeurs des variables d'étude. Nous avons alors lancé les calculs via l'outil en Java, en utilisant les huit algorithmes préalablement présentés. Afin de pouvoir comparer les algorithmes, nous avons utilisé des valeurs de paramètres identiques pour chacun d'entre eux : 5 répétitions (i.e. on relance 5 fois l'algorithme), 50 individus (i.e. taille de la population initiale ; e.g. nombre de particules dans PSO), 50000 opérations (i.e. calculs réalisés par l'algorithme). Faire plusieurs répétitions pour chaque algorithme permet de limiter l'influence du tirage de la population initiale (aléatoire). La taille de la population (ici 50), est un paramètre important pour la plupart des algorithmes, car elle est reliée à sa capacité à explorer l'espace. La valeur de 50 individus a été retenue après plusieurs tests avec ces différents algorithmes et résulte d'un compromis jugé satisfaisant entre temps de calcul et convergence vers les solutions optimales. Le nombre d'opérations définit la condition d'arrêt de l'optimisation : lorsque l'algorithme a effectué toutes les opérations définies, il s'arrête. La valeur de 50000 a été retenue empiriquement en se basant sur une série de tests. Cette valeur conduisait à des calculs d'une dizaine de minutes et permettait une convergence suffisante des résultats (i.e. peu de nouvelles solutions optimales étaient trouvées en prolongeant le calcul).

La **Figure 3.7** donne les résultats des optimisations, rapportés à chaque couple d'objectifs. Ce mode de représentation ne permet pas de mesurer l'intérêt global de chaque solution (qui doit se comprendre au regard de l'ensemble des trois objectifs), mais permet de voir la gamme de variation des solutions optimales sur les objectifs, notamment, vis-à-vis des différents algorithmes. De plus cela permet de voir comment se positionne la stratégie proposée par le chargé d'études (solution en rouge) par rapport à celles obtenues par les algorithmes ; pour rappel, cette dernière a pour valeurs : coût de 89k€, durée de 29 jours et taux de non-valorisation de 20% (i.e. 80% de valorisation).

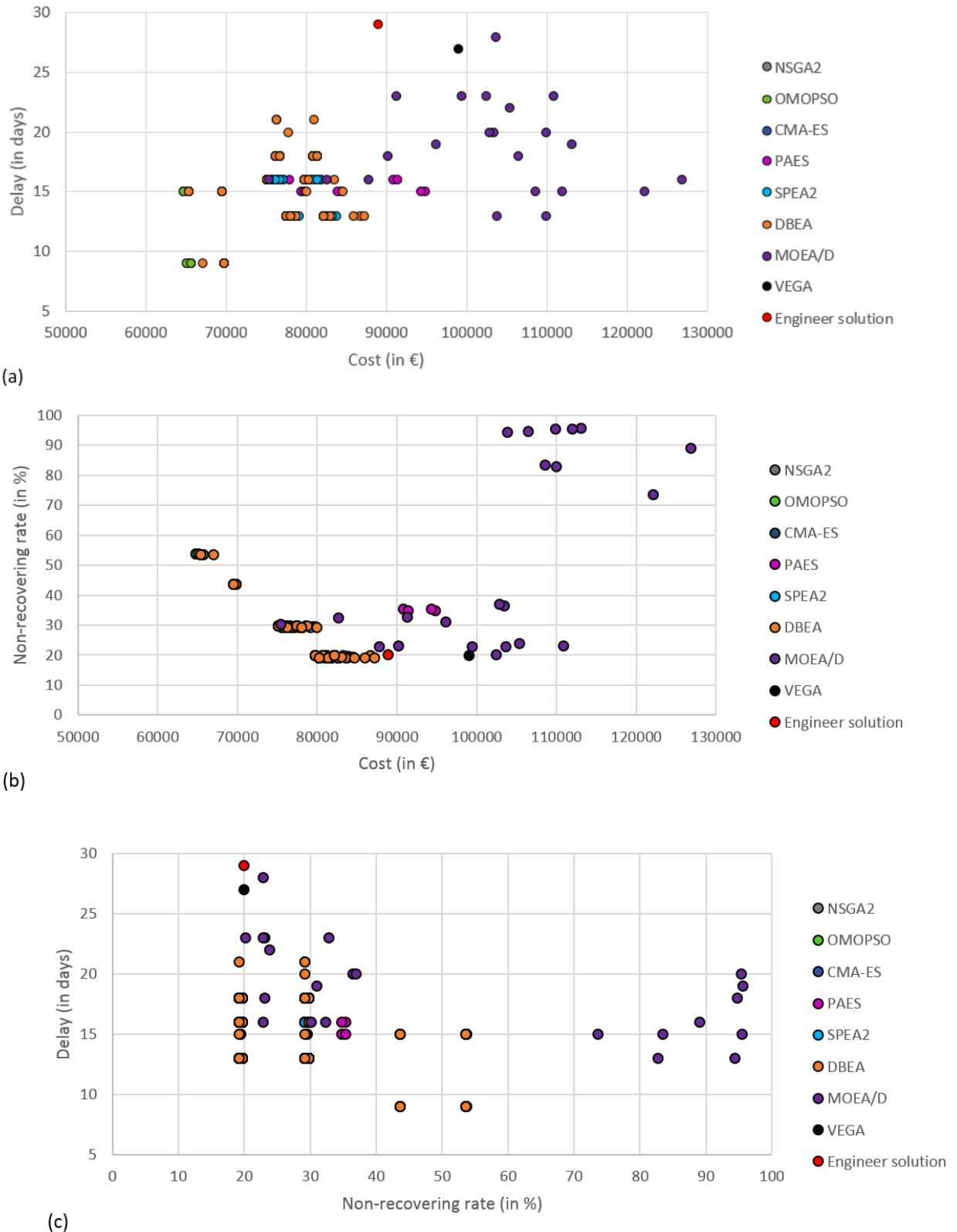


Fig 3.7. Résultats de l'optimisation sur le cas d'application (Queheille, Taillandier et al. 2018)

4.5. Discussion

L'objectif de cette application est double : (a) démontrer la capacité de l'outil à fournir des résultats pertinents et, si possible, meilleurs que la solution trouvée par l'ingénieur de l'entreprise, et (b) tester différents algorithmes pour sélectionner le(s) plus efficace(s) face à ce problème décisionnel.

Résultats. Les algorithmes ont permis de trouver un ensemble de 290 solutions non-dominées ; N.B. je rappelle qu'il n'y a pas de garantie que ces solutions soient réellement optimales car les métaheuristiques ne parcourent qu'une partie de l'espace de solutions. Parmi ces 290 solutions, 100 sont vis-à-vis de cet ensemble de solutions trouvées. Les 190 autres solutions sont dominées ou identiques (i.e. même valeurs sur les variables de décision) à celles données par un autre algorithme. Seules ces 100 solutions optimales sont retenues pour la suite et analysées. Le coût de ces solutions va de 65k€ à 87k€, avec une durée de chantier variant entre 9 et 21 jours et un taux de valorisation de 46% à 81%. Parmi les 100 solutions optimales, 83 solutions respectent le taux de valorisation visé (70%). Cette performance environnementale est obtenue grâce la mise en œuvre d'une phase de curage et à une faible utilisation de la mise en décharge pour le traitement des déchets. En moyenne, ces solutions durent 16 jours pour 80k€ et proposent un taux de valorisation de 76%. La solution médiane propose 9 ouvriers et 2 mini-pelles pour le curage, ainsi que 3 ouvriers pour le chargement des déchets. Parmi les solutions optimales, 23 solutions ont obtenu le meilleur taux de valorisation possible, soit 81% pour ce cas d'application. Cela requiert que, pour chaque déchet, le meilleur traitement soit toujours choisi. Cela représente un coût moyen de 82k€ pour 17 jours de travail. A l'inverse, 17 solutions optimales ne permettent pas d'atteindre les 70% de valorisation. Elles présentent le plus souvent le coût le plus bas (médiane à 70k€) et le délai le plus court (moins de 15 jours de travail). Un aspect intéressant de ce travail est de montrer que respecter le taux de valorisation de 70%, et même atteindre 80% n'induit pas forcément des surcoûts et des délais beaucoup plus importants.

Comparaison par rapport à la stratégie experte. Par rapport à la stratégie définie par le chargé d'études, de façon experte, et qui a été réellement mise en œuvre, 17 solutions donnent le même taux de valorisation (80%), mais avec un coût (7k€ de moins en moyenne) et un délai (14 jours de moins en moyenne) plus faibles. Les solutions avec un taux de valorisation de 81% sont également meilleures que la solution du chargé d'études : 6k€ et 13 jours de moins. La solution experte n'est en fait pas Pareto optimale. Le modèle a permis de trouver des solutions plus intéressantes en termes de coûts, de délais et d'environnement. Ces solutions ont été montrées au chargé d'études pour qu'il exprime son avis. Bien évidemment, étant donné sa position, il était difficile pour lui d'affirmer que sa solution n'était pas très optimale (i.e. qu'il aurait pu trouver mieux). Pour lui, les solutions les plus pertinentes sont d'abord celles qui obtiennent au moins 70% de valorisation, rendant nécessaire le curage. Pour ce chantier, en raison de la diversité des bâtiments à démolir et de la difficulté pour un chef de chantier de le gérer, il a jugé, de plus, que le recours à deux mini-pelles en même temps n'était pas souhaitable et que le nombre d'ouvriers et d'engins pour le chargement des déchets devait être limité. Parmi les solutions respectant ces conditions, il a relevé une solution lui paraissant particulièrement pertinente : avec une durée de 22 jours, un coût de 81k€ et un taux de valorisation de 80%, elle aurait pu offrir une alternative intéressante et réalisable à sa stratégie initiale.

Discussion sur les algorithmes d'optimisation. La **Table 3.1** expose les performances de chaque algorithme vis-à-vis des quatre critères de comparaison retenus (voir **partie 4.3**). Les temps de calcul des différents algorithmes sont assez proches ; ce critère n'est pas pertinent pour les comparer. NSGA-II, SPEA2 et DBEA sont les algorithmes qui fournissent le plus grand nombre de solutions optimales alors que VEGA et MOEA/D, avec respectivement 0 et 1 solution, ne sont pas adaptés pour résoudre ce problème. La contre-performance des algorithmes MOEA/D et VEGA peut être due à trois raisons : (a) ces algorithmes ne sont réellement pas adaptés pour traiter ce problème décisionnel, (b) les paramètres utilisés ne sont pas adaptés à ce problème (N.B. dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur la comparaison entre plusieurs algorithmes et non sur l'impact des paramètres pour chaque algorithme), (c) ils ne sont pas bien implémentés dans la bibliothèque utilisée (Hadka 2017). NSGA-II, SPEA2 et DBEA sont les algorithmes qui fournissent le plus grand nombre de solutions.

Tab 3.1. Comparaison des métaheuristiques pour le problème de démolition

Algorithme	Nombre de solutions optimales	Variété des solutions (écarts-type)	Temps de calcul (en min)	% de solution atteignant 70% de valorisation
NSGA-II	21	0.55	10	76%
OMOPSO	14	0.58	11	57%
CMA-ES	6	0.08	12	100%
PAES	10	0.33	11	100%
SPEA2	23	0.27	12	100%
DBEA	25	0.53	12	84%
MOEA/D	1	-	12	0%
VEGA	0	-	11	-

Pour la diversité des solutions, NSGA-II, OMOPSO et DBEA obtiennent les meilleurs résultats. Enfin, PAES, CMA-ES et SPEA2 fournissent le pourcentage le plus élevé de solutions respectant le taux de valorisation souhaité ; évidemment, ce taux est à mettre au regard du nombre de solutions trouvées. Sur la base de ces premiers essais, les trois algorithmes NSGA-II, DBEA et SPEA2 apparaissent comme les plus pertinents pour le problème de déconstruction. Afin de les départager, nous avons choisi de faire appel au chargé d'études. Il a été invité à sélectionner le meilleur ensemble de solutions (chaque ensemble correspondant à un algorithme) entre ceux donnés par NSGA-II, DBEA et SPEA2. En raison de la plus grande diversité des solutions données par DBEA pour cette étude de cas, il a préféré l'ensemble de solution donné par cet algorithme. En effet, de son point de vue, il est préférable d'obtenir des solutions avec différentes propositions de composition d'équipes et de choix de matériels. Cela permet de mettre en évidence le potentiel des différentes stratégies et d'avoir plus de choix pour sélectionner celle qu'il juge la plus pertinente au regard de la spécificité de chaque étude.

Intégration des préférences. Dans l'approche que nous avons choisie, le résultat de l'optimisation est directement le front de Pareto. Cependant, une seule solution parmi celle du front pourra être réellement mise en œuvre. Nous avons laissé le chargé d'études choisir lui-même une solution parmi celles du front de Pareto. Cela est suffisant dans une première étape, mais il est aussi possible d'aller plus loin dans l'aide à la décision. Pour cela, trois approches sont proposées dans la littérature (Jozefowicz 2013) : agrégation *a priori*, *a posteriori* ou interactive (aussi appelée progressive). L'approche *a priori* consiste à agréger les fonctions objectifs en une seule fonction ; on se ramène alors à une optimisation mono-objectif. Cette approche permet de simplifier le problème et peut avoir du sens pour une optimisation dans laquelle on veut automatiser la décision. Cependant, le rôle du décideur est alors très limité, au risque qu'il soit dépossédé de ses prérogatives de décision, ce qui n'est pas souhaitable. Le chargé d'études souhaite participer au choix de la stratégie et non que tout se fasse de façon automatique. La démarche *a posteriori* consiste à utiliser une méthode d'aide à la décision multicritère pour aider le décideur à choisir une solution parmi les solutions optimales. Cette démarche est intéressante mais nécessite le recours à un deuxième processus d'aide à la décision pour lequel il faut faire appel à un facilitateur. Pour ce problème décisionnel, le chargé d'étude doit être en mesure de réaliser plusieurs études par jour ; rajouter de la complexité en ajoutant une approche supplémentaire n'est pas souhaitable. Les méthodes *interactives* consistent à faire

construire, pendant le processus d'optimisation, les préférences du décideur afin de guider le processus d'optimisation. Ce type d'approche pourrait être bien adapté à ce problème décisionnel. Intégrer des aspects interactifs pourrait constituer une amélioration intéressante pour notre approche. Dans une prochaine version du modèle, nous testerons la méthode RNSEA (Hoballah 2018) qui est particulièrement adaptée à l'approche interactive. Cependant, même en laissant le chargé d'études analyser seul les fronts de Pareto, nous avons vu que le modèle développé constituait déjà une aide à la décision précieuse.

Objectifs environnementaux. La réglementation européenne qui a servi de base pour l'un des objectifs, fixe un taux de valorisation minimale à respecter. Mais on pourrait se demander si respecter ce taux induit forcément un gain environnemental. En effet, certains procédés de recyclage peuvent être particulièrement polluants, ou parfois la pollution due au transport du chantier jusqu'au centre de traitement peut supprimer tous les avantages d'une valorisation du déchet et conduire à des impacts négatifs. Ces exemples illustrent les lacunes de cet indicateur pour qualifier l'impact environnemental d'une stratégie de démolition. Afin de pouvoir améliorer le modèle ECO2D2 sur ce point, et de pouvoir réellement évaluer l'impact environnemental des stratégies de déconstruction, nous avons prévu d'utiliser l'analyse de cycle de vie (ACV) (ISO 2006). L'ACV est une méthode d'évaluation permettant de procéder à un bilan environnemental multicritère (pollution, consommation de ressources, d'énergie, etc.) d'un système. Elle développe une vision holistique des impacts environnementaux permettant de limiter les problèmes de report d'impacts (on améliore un critère mais on en dégrade un ou plusieurs autres). Dans la prochaine version d'ECO2D2, des objectifs relatifs aux critères de l'ACV seront ajoutés.

Affiner le modèle. Le modèle exposé dans cette partie n'était qu'un premier pas. J'ai indiqué qu'il était lacunaire en termes d'évaluation environnementale, mais il l'est aussi quant aux variables de décision. Le modèle ne considérerait pas tous les déchets possibles sur un chantier, ni tous les types de machines utilisables sur le chantier. Dans une prochaine version du modèle, on redéfinira de nouvelles catégories de déchets avec les traitements associés. Il est aussi prévu de proposer une plus grande variété de machines. Finalement, il est prévu d'ajouter des aspects géographiques liés aux centres de traitement et au chantier, afin de pouvoir calculer automatiquement l'impact du transport (e.g. apporter les machines sur chantier, transport des déchets au centre de tri, etc.).

4.6. Conclusion

J'ai proposé dans cette partie, un modèle, ECO2D2, pour optimiser la stratégie de déconstruction des bâtiments. Ce problème décisionnel complexe a été formalisé comme un problème d'optimisation multi-objectif. Une étude de cas a été utilisée pour illustrer l'intérêt de l'outil et sa capacité à traiter des projets réels. Les solutions optimales trouvées par ce modèle ont été comparées à la solution réellement mise en œuvre. Ces stratégies se sont révélées être plus optimales que celle trouvée par le chargé d'études de BDS, démontrant la capacité de notre modèle à proposer des stratégies pertinentes. Le modèle a permis de trouver une stratégie réalisable, présentant un fort taux de valorisation des déchets, tout en limitant le coût et la durée, démontrant que le curage, et donc la déconstruction, était une alternative viable à la démolition. Nous avons testé plusieurs métaheuristiques pour répondre au problème décisionnel. Parmi tous les algorithmes testés, trois algorithmes (NGSA-II, DBEA et SPEA2) sont apparus comme les plus efficaces. Entre ces trois algorithmes, DBEA a proposé l'ensemble des solutions qui a été préféré par le chargé d'études de BDS.

L'entreprise de déconstruction BDS intégrera bientôt l'utilisation d'ECO2D2 dans ses études. Mais le modèle a été créé aussi afin de pouvoir être utilisé dans un contexte différent ou par une autre entreprise de démolition, en modifiant les variables de connaissances. Je discuterai de ce point dans la **partie 5.3**.

5. Discussion

Dans cette partie, je reviendrai sur plusieurs éléments abordés dans ce chapitre et qui méritent d'être plus largement discutés et développés. Je discuterai notamment du choix du paradigme d'aide à la décision, en exposant ma vision de cette phase importante de l'aide à la décision. Je reviendrai ensuite sur la place de l'humain dans les modèles exposés dans cette partie. Je m'intéresserai enfin à l'utilisation au long cours des modèles et à la difficulté de positionnement du *Chercheur* par rapport à cette question.

5.1. Du choix du paradigme

Une question qui se pose dans la conception de l'ensemble des modèles présentés dans ce document est celle du choix du paradigme et du modèle générique qui vont porter les modèles. Cette question était présente dans le **Chapitre 2**, relativement à la modélisation des projets de construction, et notamment se posait la question du choix entre les HPRMs et les ABMs (**Chapitre 2 partie 7.3**). *In fine*, j'ai conclu que ces deux modèles génériques avaient leurs intérêts propres et que le choix de l'un ou l'autre revenait à l'utilisateur. Dans ce chapitre, les problématiques étaient différentes (simulation de comportement d'occupants, aide à la décision pour la rénovation et pour la démolition), mais l'on peut rapprocher les deux modèles d'aide à la décision (ARD-Fourmi et ECO2D2). Pour ces deux cas, j'ai choisi de faire appel à deux paradigmes différents : l'aide à la décision multicritère pour la rénovation de maisons et l'optimisation multi-objectif pour la démolition.

L'aide à la décision est un domaine riche dans lequel plusieurs paradigmes, portés par plusieurs écoles s'affrontent. Certains ont une vision plus prescriptive de l'aide à la décision et d'autre une vision plus portée vers la réflexion personnelle. Pour les premiers, le résultat du processus d'aide à la décision doit être directement une décision (i.e. solution préconisée). Pour les seconds, le résultat n'est pas tant dans la décision que dans le processus qui a conduit jusqu'à la décision. On peut retrouver cette double orientation dans les deux paradigmes choisis : pour ARD-Fourmi, qui reposait sur de l'aide à la décision multicritère (MCDA), le principal résultat mis en avant était la discussion et la réflexion suscitée, alors que pour ECO2D2, reposant sur de l'optimisation multi-objectif (OMO), le principal résultat consistait en l'identification de solutions performantes vis-à-vis de plusieurs objectifs. Ainsi, la MCDA est une approche favorisant la discussion et l'échange autour des solutions alors que la OMO permet de trouver des solutions à des problèmes très complexes par le recours à des algorithmes de recherche.

J'aurais pu répondre à ces deux problèmes décisionnels avec la même approche. Par exemple, le problème de rénovation de bâtiment est souvent traité avec des modèles OMO (voir **partie 3.1**), tout comme l'on trouve des modèles MCDA pour la démolition ou le choix de traitement de déchets (Abdullah and Anumba 2002, Roussat, Dujet et al. 2009). Mais cela n'aurait apporté qu'une réponse partielle aux problèmes décisionnels, soit en automatisant trop le processus (pour la rénovation), soit en devant simplifier le problème (pour la démolition). Car ces deux paradigmes diffèrent par plusieurs aspects : la définition des options, la formalisation des préférences et des contraintes, le domaine d'utilisation, l'implication du décideur et l'apport pour la réflexion du décideur (**Table 3.2**).

Concernant les options, les modèles MCDA nécessitent que le jeu des options soit préalablement construit et idéalement qu'il ne soit pas trop important en termes de taille (au maximum une centaine d'options). Les modèles OMO, au contraire, sont pertinents lorsque le jeu des options est très important, voire infini, puisqu'ils proposent une exploration de l'espace des solutions.

Tab 3.2. Comparaison entre aide à la décision multicritère et optimisation multi-objectif

	<i>Aide à la décision multicritère (MCDA)</i>	<i>Optimisation multi-objectif (OMO)</i>
Options	Jeu limité	Très grand nombre, voire une infinité
Préférences	Construction des préférences au centre de la démarche	En dehors de l'optimisation (sauf en optimisation interactive)
Contraintes	Intégrées dans les préférences (vision subjective)	Réduction de l'espace des solutions (vision technique)
Domaines d'application privilégiés	Tous	Technico-économique
Implication du décideur	Grande disponibilité et implication forte des décideurs	Faible disponibilité et implication faible des décideurs
Apport pour la réflexion personnelle du décideur	Fort	Modéré
Autonomie d'utilisation	Nécessite un facilitateur	Peut être utilisé en autonomie

Les préférences et les contraintes sont gérées différemment dans les deux paradigmes. La formalisation des préférences du décideur, permettant de construire un compromis entre les critères, est l'un des grands enjeux en MCDA. En OMO, c'est souvent un problème géré en dehors de l'approche elle-même ; c'est le cas des approches *a priori* et *a posteriori* (voir **partie 4.5**). Seule l'approche interactive intègre, lors de l'optimisation, la formalisation des préférences du décideur. Mais cette construction est le plus souvent réduite à un échange entre le machine et le décideur, et n'a pas vocation à nourrir des réflexions chez le décideur. La gestion des contraintes est là aussi de nature différente : elle est basée sur une réflexion qui se traduit par des paramètres dans MCDA et par des limites de l'espace exploré dans OMO. Cela ramène souvent les contraintes à un niveau plus technique en OMO, où les contraintes sont formalisées mathématiquement, qu'en MCDA, où les contraintes doivent être traitées par le facilitateur.

Concernant l'implication du décideur, comme j'ai pu l'exprimer au travers de la présentation des modèles, le niveau d'exigence n'est pas le même. L'approche MCDA impose une grande disponibilité et une implication importante du décideur, puisque c'est ses préférences que l'on va chercher à modéliser. L'approche OMO, par contre, demande une implication plus limitée. Au plus, le décideur devra répondre à des questions posées lors de l'optimisation (e.g. choisir une solution préférée parmi un jeu limité de solutions, hiérarchiser un ensemble de solutions, etc.) afin de guider la recherche (approche interactive) ou choisir une solution parmi celles du front de Pareto (si aucune agrégation n'a été faite). Nos deux contextes décisionnels différaient énormément sur ce point ; c'est ce contexte qui a porté en grande partie le choix d'un paradigme. Pour l'entreprise de démolition, le choix d'une stratégie de démolition par le chargé d'études est une décision banale, faisant partie de son activité ; il réalise plusieurs études par jour et donc il n'y a pas d'implication forte du décideur face à cette prise de décision. Pour les propriétaires essayant de choisir une solution de rénovation pour leur maison, l'implication dans la décision est beaucoup plus forte. C'est un choix personnel qui va fortement affecter leur vie quotidienne, et qui touche des enjeux affectifs et émotionnels. Il est donc normal d'avoir pour le premier une approche plus automatique et pour le second une approche plus manuelle. Il est tout de même à noter que de nombreux articles proposent pour les MCDAs une orientation qui ne me paraît pas légitime, en cherchant à les automatiser, à éluder le recours à un facilitateur,

supprimant la démarche d'échanges et de réflexions qui y est attachée. Cela tend, pour moi, à dégrader cette approche, lui retirant une grande part de sa légitimité.

Au regard de ces différents points qui différencient nettement ces deux paradigmes, les choix faits pour ARD-Fourmi et ECO2D2, apparaissent plus clairement. Chacun de ces paradigmes apporte des réponses différentes. Il incombe donc au modélisateur de bien comprendre la problématique auquel le modèle doit répondre, et, tout en connaissant bien les qualités et défauts de chaque paradigme, de choisir le plus pertinent.

J'ai pour l'instant mentionné surtout de ce qui différencie ces deux paradigmes, mais ils partagent une valeur commune, celle du *multi-*. Les deux paradigmes entrent dans ma logique holistique mineure (**Chapitre 1 partie 5.2**) en considérant plusieurs dimensions, plusieurs points de vue contradictoires. Pour autant, je ne nie pas que le paradigme *mono-* (critère ou objectif) peut avoir son intérêt lorsque l'on ne souhaite considérer qu'une seule dimension ou des dimensions non contradictoires (e.g. choisir une stratégie commerciale pour une banque). Mais, dans les deux cas abordés, ce n'est pas le cas : par exemple, on intègre des enjeux de coût et d'environnement qui sont contradictoires. Il y a donc intérêt à opter pour des paradigmes orientés *multi-*. Un autre élément qui rapproche ces deux paradigmes est l'implication des utilisateurs finaux dans la construction des modèles. J'ai insisté sur la plus faible implication du décideur lors de l'utilisation du modèle avec OMO par rapport à MCDA. Cependant, cela n'induit pas que l'implication des différents acteurs dans le processus de modélisation soit moindre. Comme je l'ai évoqué dans le **Chapitre 1 partie 6.1**, mon idéal de modélisation est de tendre vers une co-construction du modèle ; cela a du sens tant pour l'approche MCDA que pour l'approche OMO. Ce point sera plus largement abordé dans la **partie 5.2**. Pour conclure quant au choix du paradigme, je dirai simplement que OMO et MCDA, chacun à leur façon, sont deux paradigmes particulièrement adaptés aux problèmes décisionnels complexes.

5.2. L'humain dans et face aux modèles

J'ai placé l'humain au centre de mon travail. Ce chapitre a permis de l'aborder sous un double positionnement, celui d'acteur du système (occupant de la maison) et celui de décideur (choix d'une solution de rénovation ou de démolition). Les modèles génériques présentés dans ce chapitre diffèrent en termes de positionnement (simulation et décision), pourtant ils ne sont pas forcément si éloignés et il est possible de relier la position de l'humain dans ces trois modèles.

Li-BIM s'intéressait à la meilleure prise en compte de l'occupant dès la conception des bâtiments. Cela avait pour objectif, plus ou moins directement, de répondre à deux questions : *quel est l'impact de l'occupant et de son comportement sur le fonctionnement du bâtiment ? et quels sont les choix de conception qui permettent d'améliorer le fonctionnement du bâtiment (impact environnemental, satisfaction de l'utilisateur, etc.) tout en prenant en compte le comportement de l'occupant ?* La première question était l'enjeu central du modèle présenté. Li-BIM avait l'ambition de modéliser de façon plus réaliste que dans les modèles classiques, le comportement des humains, tout à la fois de façon individuelle (BDI) et collective (relations interpersonnelles). Bien évidemment, ce modèle ne prétend pas, comme pourraient chercher à le faire des modèles cognitifs évolués, saisir véritablement comment se comporte l'humain (j'évoquais déjà ce point au **Chapitre 1 partie 5.4**). Il propose cependant une évolution notable par rapport aux scénarios d'usage classiques utilisés dans les modèles de simulation, en parvenant à capter une partie de la variabilité intra-personnelle et des mécanismes sociaux.

Il y a d'autres façons de prendre en compte cette variabilité et de modéliser l'influence du comportement humain (voir **partie 2.1** et **Chapitre 1 partie 5.4**). Dans le domaine énergétique notamment, les modèles génériques apprenants à partir de données (*deep learning, machine learning, etc.*) font l'objet d'un grand nombre d'articles ; à titre de comparaison, sur Scopus, depuis 2017, 703

articles évoquant le sujet sont référencés contre seulement 97 pour les ABMs. Les modèles apprenants bénéficient de la diminution du prix des capteurs, permettant leur multiplication, et avec eux, celle des données. Ces approches sont parfois vues comme une panacée devant supplanter les paradigmes plus classiques, reposant sur une formalisation des éléments physiques (ou non) du système. Ils disposent en effet d'avantages conséquents : ils ne nécessitent pas de connaissances du système (juste des données), ils peuvent s'appliquer à toutes les situations, et peuvent, si le jeu de données est suffisant, fournir des résultats de prédiction extrêmement justes. Les algorithmes d'apprentissage ont en effet atteint un niveau de maturité conséquent ; AlphaGo, par exemple, en est une démonstration remarquable. Si l'on estime, de plus, qu'avec le développement de la domotique, la quantité de données liées aux bâtiments et aux comportements des occupants va exploser dans les prochaines années, à quoi bon, dès lors, continuer à développer des modèles rendant vraiment compte du comportement du système ?

Je peux apporter au moins trois arguments pour défendre les modèles classiques vis-à-vis des modèles apprenants à partir de données : (a) leur capacité à simuler de nouveaux scénarios, (b) la connaissance induite par leur logique interne, et (c) leur capacité à être co-construit. Pour le premier argument (i.e. nouveaux scénarios), cela renvoie à une limite des modèles génériques d'apprentissage : ils n'apprennent que sur la base de ce qu'on leur donne. Si l'on dispose de données relatives à des contextes proches, on peut certainement simuler de façon convaincante de nouveaux cas ; e.g. simuler la consommation énergétique d'occupants d'un bâtiment à partir de données issues d'un grand nombre d'habitants et de bâtiments. En revanche, dès lors que l'on souhaite simuler un scénario inédit, disruptif ou qui ne s'inscrit pas dans une moyenne sur laquelle on aurait beaucoup de données, le modèle apprenant sera inopérant, incapable d'apprendre. C'est par exemple le cas de la gestion des risques extrêmes (e.g. simuler le comportement de personnes face à un incident nucléaire majeur), pour lesquels les probabilités d'occurrence sont très faibles et ainsi les données disponibles. De la même façon, les modèles apprenants ne peuvent rien nous dire de l'impact de l'arrivée des voitures autonomes dans nos villes. Les deuxièmes (connaissances induites) et troisièmes (co-construction) arguments sont liés, puisque le troisième nécessite le deuxième. Dans un modèle apprenant, il n'y a pas de logique interne ; il s'agit juste d'une boîte noire reliant des entrées et des sorties. Le modèle utilise différents opérateurs pour construire le modèle en fonction des données, sans chercher à répondre à une quelconque réalité physique. Voir et analyser le modèle dans ce cas ne permet pas de comprendre quoi que ce soit du système ; le modèle est issu de l'apprentissage, mais il ne génère par lui-même aucune connaissance. Son intérêt n'émerge que par son utilisation, ramenant le modélisateur, ou toute autre partie prenante, à un simple rôle d'utilisateur. La modélisation elle-même est laissée à la charge du modèle : il n'y a plus de possibilité de placer le modèle et sa construction en tant que centre d'échanges, de discussions et de réflexions.

Dans mon approche de la modélisation, l'humain n'est pas réduit à un rôle d'utilisateur et le modèle à sa capacité de prédiction. Le modèle est avant tout une source de réflexion. Li-BIM permet de modéliser avec plus de finesse le comportement humain que dans les modèles de simulation classique, et, en cela, propose des résultats prédictifs intéressants. Mais il a un autre intérêt, et qui me paraît encore plus important : celui de faire réfléchir, par sa structure, par ce qu'il donne à voir, par sa capacité à intégrer des scénarios originaux. Dans ce cadre, une collaboration a été initiée avec Polytech Lab (Université Nice Sophia Antipolis) qui souhaitait être en mesure de simuler des scénarios spécifiques dans Li-BIM (e.g. coupure de courant dans le quartier ; impact de mesures d'incitation à l'économie d'énergie, etc.). Pour cela, un module *Scenario* a été créé dans Li-BIM (Thioub, Graziani et al. 2018). L'enjeu est de permettre à un gestionnaire, au propriétaire, au maître d'œuvre ou toute autre partie prenante, de se questionner sur l'usage du bâtiment et le comportement de l'occupant, en explorant des scénarios de type *What...if*. En reposant sur une structure claire et en

formalisant les éléments et les dynamiques de la façon la plus naturelle possible, Li-BIM permet d'associer des non-informaticiens (e.g. occupant, expert en thermique, etc.) aux discussions autour du modèle (e.g. voir l'impact de l'ouverture et de la fermeture des volets, discuter des priorités d'actions pour un occupant, etc.).

ECO2D2 fonctionne sur une logique similaire. Il reprend une structure qui était celle utilisée par les chargés d'études ; je rappelle que nous sommes partis de l'outil métier qu'ils utilisaient auparavant. Le modèle a été co-construit avec eux, permettant d'assurer qu'il correspondait bien à leur vision du système. Des étapes de validation intermédiaire ont permis de s'assurer, à chaque pas, de la bonne compréhension du modèle et de son adéquation au système. Evidemment, l'implémentation du modèle en Java et la partie liée aux algorithmes d'optimisation peuvent échapper aux non-informaticiens, mais ce n'est pas là le cœur du modèle, qui s'intéresse aux objectifs et aux relations entre les objectifs et les variables du problème. Construire le modèle avec les utilisateurs finaux (i.e. les chargés d'études) a permis non seulement de s'assurer de la validité et de l'intérêt de celui-ci, mais cela a aussi permis aux chargés d'études de mieux appréhender l'ensemble du système. Le modèle d'évaluation (sans la partie optimisation) a d'ailleurs été implémenté dans un outil métier que les chargés d'études peuvent déjà utiliser dans le cadre d'études réelles (voir **partie 5.3**). Avec ECO2D2, on a ainsi un modèle qui tout à la fois par ses résultats, mais aussi par la façon dont il a été construit, génère de la connaissance.

Cet aspect est particulièrement important dans ARD-Fourmi. Le modèle proposé est le résultat de nombreux échanges entre des experts, des habitants du quartier de Malartic, des membres de l'association *Des fourmis dans le compteur* et le modélisateur. Le modèle a pu servir de catalyseur pour la structuration et la formalisation de connaissances, propres à générer une réelle réflexion. ARD-Fourmi a donc suscité de la réflexion lors de sa conception et construction, mais il a aussi vocation à le faire par son usage. Le processus d'utilisation de l'outil avec les propriétaires a été conçu pour positionner, au centre du processus, la discussion et les échanges entre les parties prenantes. Dans ce contexte, ARD-Fourmi est beaucoup plus un outil d'aide à la réflexion qu'un outil d'aide à la décision. Ce glissement sémantique est important, car il marque un changement de point de vue sur les sciences de la décision. L'outil n'est plus le garant d'une bonne décision, mais un support pour faire émerger chez le décideur une bonne décision (du moins une décision réfléchie). Cette notion de réflexion au-delà de la décision est particulièrement importante dans le cadre de ARD-Fourmi, puisque l'outil avait un triple objectif : aider les propriétaires à choisir une solution de rénovation, le motiver dans cette voie (pour passer de l'idée à sa concrétisation) et, à plus long terme, le conduire à adopter un comportement plus écologique. Avoir une démarche l'impliquant dans la décision et sans empiéter sur sa prérogative de décision, est très important en ce sens, bien que cela ne soit pas suffisant. Il faut aussi pouvoir maintenir son implication sur un plus long terme, dépassant le cadre de la décision. C'est un point qui est abordé dans la partie suivante.

5.3. Le temps d'après

Un enjeu particulièrement important et difficile, dès lors que l'on travaille sur un terrain d'étude (e.g. le quartier de Malartic) ou avec des utilisateurs finaux bien identifiés (e.g. propriétaires, chargé d'études de BDS), est celui de la pérennité des modèles. Li-BIM est un modèle de simulation orienté recherche et n'a pas vocation à être utilisé dans sa forme actuelle par des acteurs de terrains (e.g. architecte, bureau d'études). La question de sa pérennité est moins forte. Il a plutôt vocation à être amélioré et à évoluer tel qu'évoqué dans la **partie 2.7**. Mais la question de la pérennité des modèles et/ou de leur utilisation est particulièrement prégnante en aide à la décision, et donc pour ECO2D2 et ARD-Fourmi. Ces approches visent généralement à avoir un impact immédiat, mais aussi durable sur le monde.

Pour ARD-Fourmi se posait la question de l'utilisation de l'outil par les membres de l'association après la fin du projet Fourminergie. Rendre l'outil pérenne nécessite qu'il soit utilisable sans l'aide de l'équipe de recherche et notamment qu'une autre personne que moi-même soit en mesure de prendre le rôle de facilitateur. Trois éléments sont importants pour cela : l'ergonomie de l'outil, la formation et la motivation. En ce qui concerne le premier point, les différents tests et ateliers ont été primordiaux. Le développement du logiciel s'est appuyé sur de nombreuses discussions avec les propriétaires ; selon la méthodologie Agile, deux utilisateurs finaux (propriétaires de maison) ont été régulièrement impliqués dans le développement de l'outil ARD-Fourmi. Ils ont fait des commentaires et des suggestions sur le fonctionnement de l'outil et sur l'interface du logiciel. Ceci assure la capacité de l'outil à répondre réellement aux besoins et aux exigences de l'utilisateur. De plus, l'ergonomie a été continuellement améliorée. Le deuxième point, celui de la formation, est plus compliqué. Lors du projet, j'avais imaginé un procédé de percolation. Deux membres de l'association (appelés référents) devaient être formés à l'utilisation et à l'explication de l'outil, afin de pouvoir l'utiliser avec d'autres propriétaires sur d'autres maisons. Dans un second temps, ils pouvaient former d'autres membres à l'utilisation de l'outil, qui à leur tour pouvaient alors former d'autres personnes et ainsi de suite. Le succès d'une telle opération dépend de l'acceptation de l'outil par les membres qui est déterminée par son utilité perçue et sa facilité d'utilisation perçue (Wallace and Sheetz 2014). Je pense que sur ces aspects, l'outil a su trouver l'adhésion des référents pressentis. Mais la capacité de transmission de l'outil et de la méthodologie dépend aussi de la volonté des référents à assurer cette fonction. Il ne s'agit pas que de motivation mais de leur capacité à s'en sentir capable. Or le rôle de facilitateur est complexe, il faut avoir une bonne connaissance de l'outil, des méthodes employées et des capacités à guider une réunion. De plus, assurer le rôle de référent nécessite d'avoir le temps et la disponibilité, que ce soit pour la formation ou pour l'utilisation de l'outil. De fait, je n'ai pas pu trouver de référents à former parmi les membres de l'association. Une nouvelle idée a été de se tourner, non plus vers les membres de l'association *Des fourmis dans le compteur*, mais vers des organismes publics visant à offrir des conseils aux particuliers en termes de travaux et de consommation énergétique (e.g. Espace Info Energie). Des discussions en ce sens sont en cours, mais cela reposera sur des volontés personnelles, étant donné le peu de soutien au niveau politique. Ce dernier point est le plus problématique pour la continuité d'ARD-Fourmi. Le projet Fourminergie a été financé par la Région Aquitaine, mais n'a jamais bénéficié de soutien (que ce soit financier, en termes d'affichage, d'aides matérielles, ou autre) de la part de la commune de Gradignan sur laquelle se trouve le quartier de Malartic. Face au manque de soutien, l'association *Des fourmis dans le compteur*, a eu du mal à poursuivre son développement, à rayonner, à fédérer de nouveaux membres. L'outil ARD-Foumi peut être un produit d'appel, mais n'est pas suffisant à lui seul pour attirer de nouveaux habitants vers l'association. Il doit faire partie d'un dispositif plus vaste, profitant de soutiens locaux, qui a du mal à s'instaurer. Faute de soutien, l'association, portée pourtant par quelques membres très actifs, semble s'essouffler, rendant difficile la diffusion plus large d'une culture pro-environnementale aux habitants du quartier. Pour finir sur une note plus positive, le projet des fourmis pourrait renaître dans une autre commune et avec une autre association (*Canéjan en transition*) soutenue par les autorités politiques locales et intéressée pour poursuivre l'aventure.

Pour ECO2D2, la question de la pérennisation du modèle se pose aussi, mais d'une autre façon. Pour ce cas, le commanditaire du modèle, au travers du financement de la thèse, est l'utilisateur final. Cela devrait assurer l'intérêt de celui-ci de poursuivre son usage du modèle au-delà de la fin du projet. Mais la réalité est plus complexe et une thèse étant toujours un travail en partie exploratoire, certaines parties du modèle ne sont pas forcément, du moins aujourd'hui, au cœur des préoccupations de l'entreprise et peuvent lui sembler superflues. Cela est d'autant plus important que l'outil proposé est un outil recherche et non un outil métier. Par exemple, en matière d'évaluation environnementale,

BDS s'intéresse uniquement au bilan carbone de ses chantiers et au taux de valorisation, car ce sont les deux aspects qui peuvent être mis en avant dans les réponses aux appels d'offre. Les autres critères environnementaux ne les intéressent pas directement, du moins aujourd'hui. Il y aura donc un écart entre le modèle et ce qui sera réellement utilisé par l'entreprise. Dans un premier temps, seule la partie évaluation est intégrée dans l'outil métier développé pour BDS. La partie optimisation a été laissée de côté en raison de sa plus grande difficulté d'implémentation dans un outil métier (et du coût de développement associé). Mais ECO2D2 dépasse le cadre de BDS et a l'ambition de pouvoir être utilisé par d'autres entreprises de démolition. Pour soutenir cette initiative, le modèle sera présenté à plusieurs organismes nationaux français qui s'intéressent à la déconstruction des bâtiments (ADEME, CSTB...). C'est l'implication de ces organismes (et la motivation personnelle de quelques individus) qui permettra de savoir si le modèle pourra aller au-delà du cadre d'une seule entreprise pour entrer dans des pratiques partagées par les entreprises de démolition.

6. Conclusion

J'ai présenté dans cette partie, différents modèles s'intéressant aux enjeux environnementaux liés aux bâtiments. Bien que partageant un même objet, les trois systèmes variaient tant dans l'étape du cycle de vie du bâtiment, que dans les problématiques traitées. Ce qui rassemblait ces modèles, en plus de l'objet, était l'humain, qui glissait d'une attitude d'acteur (Li-BIM), à celui de décideur/acteur (ARD-Fourmi) pour arriver finalement à celui de décideur (ECO2D2). Cette position de l'humain a permis de questionner le rôle du modèle, en tant que support d'échanges et de discussions. Au travers de ce rôle, le modèle peut permettre à l'humain (que ce soit en tant que modélisateur ou utilisateur) de s'inscrire dans une démarche de réflexion et d'apprentissage propre à nourrir une aide à la décision.

Dans le prochain chapitre (**Chapitre 4**) je m'intéresserai à un nouveau système, hérité des systèmes abordés dans ce chapitre : il s'agit des parcs immobiliers. La gestion de parc immobilier peut être vue comme une extension de celle du bâtiment, dans lequel le gestionnaire doit concevoir, exploiter, maintenir, rénover et démolir un ensemble d'ouvrages. Ce positionnement apporte une nouvelle complexité du fait de la multitude d'ouvrages gérés en même temps. Cela tend à multiplier les éléments du système, et par la même occasion, les interactions. De plus, cela modifie le rapport à l'ouvrage (attachement plus faible) et la façon dont il sera géré. Ces points seront abordés dans le prochain chapitre, qui se focalisera sur des aspects d'aide à la décision. Là encore, nous questionnerons le choix du paradigme, du modèle générique et le rapport du modèle au modélisateur et à l'utilisateur (e.g. le décideur, le gestionnaire).

CHAPITRE 4

Positionnement & Problématique

Du constat des complexités à la nécessité de la modélisation

Modèles présentés

Modèle	Modèle générique	Problématique	Aspects remarquables
REMIND	MCDA - Optimisation	Aide à la décision pour la conception d'un plan pluriannuel de maintenance de parc immobilier	<ul style="list-style-type: none">• Modélisation du parc immobilier et des actions envisageables,• Couplage entre aide à la décision multicritère interactive et optimisation,• MCDA basée sur une logique de filtrage.
RP-MMK	Optimisation multi-objectif – Sac à dos multipoche	Aide à la décision pour la conception d'un plan pluriannuel de maintenance de parc immobilier	<ul style="list-style-type: none">• Modélisation du problème de maintenance sous la forme d'un problème d'optimisation multi-objectif de sac à dos multipoche,• Optimisation basée sur MO-PSO pour construire les fronts de Pareto.
AIPA	MCDA – Argumentation abstraite	Aide à la décision pour la conception d'une stratégie de rénovation d'un parc immobilier	<ul style="list-style-type: none">• Pont entre l'argumentation abstraite et l'argumentation sémantique• Inférences de l'argumentation abstraite pour évaluer l'acceptabilité des arguments,• Restitution en temps réel des résultats,• Couplage entre argumentation abstraite et MCDA,• Utilisation dans une démarche participative.

Où il sera discuté de :

*Hypothèses et choix de modélisation,
Couplage de paradigmes et de modèles génériques,
L'humain dans la décision.*

Chapitre 4

Gestion de parcs immobiliers

-Aider à gérer et à décider-

1. Introduction

Dans le **Chapitre 3**, je me suis intéressé au système *bâtiment*, en le considérant sous l'angle de la problématique du développement durable. J'ai pu montrer que bien que ce système soit complexe, on pouvait, avec des modèles adaptés, appréhender sa complexité pour analyser, simuler et décider. Mais cette complexité est encore plus importante dès lors que l'on s'intéresse à un système composé non plus d'un seul bâtiment, mais d'un ensemble de bâtiments, i.e. un parc immobilier. Bien évidemment, la notion de parc immobilier s'entend dans un domaine plus large que celui des seuls bâtiments, et il peut aussi intégrer des éléments de voiries, de réseaux, voire parfois des ouvrages d'art. Dans ce chapitre, je me focaliserai sur les parcs de bâtiments, bien que les modèles proposés puissent tout aussi bien être appliqués à des parcs rassemblant d'autres types d'ouvrages.

La gestion de leur parc immobilier est devenue un enjeu majeur pour de nombreux organismes (e.g. entreprises, collectivités, associations, etc.). Pris dans la double problématique de réduire les coûts de gestion tout en étant confrontés à des exigences de plus en plus fortes en termes de qualité de service, de sécurité ou encore d'environnement, les organismes se doivent d'améliorer la gestion de leur parc immobilier. Parmi les activités liées à cette gestion, la maintenance occupe une place centrale (Bonetto and Sauce 2006). Elle consiste à maintenir, voire à enrichir, les fonctions des bâtiments du parc. On distingue la maintenance courante de la maintenance programmée (Bonetto and Sauce 2006). La maintenance courante concerne les petites opérations ; elle est généralement réglée par des procédures prédéfinies (e.g. appel à la société de gestion des ascenseurs en cas de panne). La maintenance programmée concerne les opérations plus lourdes (ravalement de façade, changement du système de chauffage...). Elle fait généralement l'objet d'un plan d'actions pluriannuel spécifique (Taillandier, Sauce et al. 2009). On peut ajouter aux opérations de maintenance lourdes, celles de rénovation et de réhabilitation où l'enjeu, au-delà de maintenir un bon niveau de fonctionnement (e.g. améliorer le confort, assurer la continuité de l'activité, etc.), est d'adapter l'ouvrage aux besoins de l'organisme (e.g. réaménagement de bureaux, changement de fonction d'une pièce, etc.). Pour alléger l'écriture, je parlerai dans la suite d'*actions*, pour évoquer l'ensemble des opérations de maintenance, rénovation et réhabilitation des bâtiments.

La question qui se pose alors est de savoir comment choisir une stratégie de maintenance d'un parc immobilier, i.e. élaborer un plan d'actions pluriannuel de maintenance. Construire ce plan d'actions est un problème décisionnel complexe. En effet, il existe pour chaque bâtiment de nombreuses actions possibles, dont la non-réalisation peut entraîner de graves conséquences (arrêt d'activité, accident, impact environnemental...) et un coût élevé. Les gestionnaires de parc, faute de pouvoir réaliser toutes les actions (e.g. budget limité, durée des travaux, etc.) doivent nécessairement faire des choix qui vont se traduire par des compromis. Les compromis ont lieu tout à la fois entre les éléments du parc à maintenir (les différents bâtiments, les différents équipements au sein des bâtiments...) et entre les objectifs du gestionnaire (limiter les coûts, assurer un bon niveau de confort, respecter la réglementation...). Enfin, le plan d'actions, qui se veut la traduction opérationnelle d'une stratégie à moyen terme, porte sur plusieurs années (de 5 ou 10 ans en général) ajoutant une dimension temporelle (ou du moins d'ordonnancement de travaux) à la complexité décisionnelle. La dimension temporelle intègre non seulement la durée du plan d'actions mais aussi l'horizon temporel sur lequel il est pertinent d'évaluer et de comparer les indicateurs ou les critères pour le gestionnaire. Ces deux temporalités peuvent être considérées comme identiques ou sont parfois différenciées selon

le type de parc et le contexte décisionnel. La construction du plan d'actions pluriannuel, i.e. le choix des actions pour chaque année tout en respectant les contraintes (e.g. budgétaires, temporelles, etc.), est un problème *NP-hard* (i.e. non solvable par des approches analytiques). Je nommerai ce problème, auquel je vais m'attaquer dans ce chapitre, REPMP (Real Estate Property Maintenance Problem).

La résolution du REPMP passe par une modélisation du parc immobilier adaptée, associée à une approche d'aide à la décision pertinente. Afin d'aider les gestionnaires à construire un tel plan d'actions, plusieurs outils métier et modèles opérationnels sont disponibles. On peut citer, par exemple, EPIQR (Jaggs and Palmer 2000), SIMS (Jouvent 1995), BUILDER (Engineers 2011), KMIS (Hendrickx and Perret 2003), MERIP (Genre, Marietan et al. 1992) ou TbMaestro (Foucault and Leclerc 2003). Ils s'appuient sur la modélisation technique des bâtiments et sur leur évaluation (qualitative ou quantitative) à base d'avis d'experts. Ils permettent une analyse structurée des bâtiments, mais ne répondent que très partiellement à la complexité du problème. En effet, ils ne portent que sur la dimension technique et ne proposent qu'une évaluation de la situation actuelle, sans prendre en compte les attentes des utilisateurs, les préférences du gestionnaire, les enjeux stratégiques liés (en termes de réponse à un besoin, à une fonction), ni le devenir des bâtiments (e.g. détérioration, effet des actions de maintenance, évolution des besoins, etc.). De plus, ces outils et modèles ne tiennent pas compte du coût de l'action et se contentent de dresser une liste d'actions à réaliser (avec parfois un niveau d'urgence associé) sans faire appel à la notion de plan d'actions. Ils sont utiles pour les activités quotidiennes de gestion, mais offrent un soutien limité pour la construction d'un plan d'actions stratégique (Halfawy, Newton et al. 2005).

En complément de ces modèles opérationnels, la littérature scientifique est riche d'approches et de modèles visant à aider à construire un plan de maintenance. Mais ces méthodes sont confrontées à quatre limites qui sont autant de façons de réduire la complexité : (a) la limitation à des actions ou à un domaine spécifiques (e.g. bâtiments en béton (Chiu and Lin 2014), rénovations de façade (Flores-Colen and de Brito 2010)), (b) l'utilisation d'un seul critère (e.g. financier (Morelli, Harrestrup et al. 2014), valeur de l'information (Zitrou, Bedford et al. 2013, Morelli, Harrestrup et al. 2014)), (c) la limitation à un ensemble restreint de bâtiments (Lounis and Vanier 2000), et (d) la limitation à un petit nombre de stratégies alternatives (N.B. perte de la logique de plan d'actions) (Ibn-Mohammed, Greenough et al. 2014, Kutut, Zavadskas et al. 2014). Dans une vision plus proche de la mienne, Zhang, Qin et al. (2015) et Yepes, Torres-Machi et al. (2016) ont proposé des modèles d'optimisation pour les problèmes de maintenance d'infrastructures routières intégrant une grande partie de la complexité de ce système. Cependant, ce système (i.e. infrastructures routières) est plus simple, du moins techniquement, que celui du parc de bâtiments : les composants sont homogènes (e.g. tronçon de route) et mono-niveau (N.B. les bâtiments sont multi-niveaux, voir **Chapitre 3 partie 1**) et les actions pour chaque élément sont peu nombreuses et peu variées. Les modèles proposés dans les articles cités sont adaptés au domaine des infrastructures routières, mais ne permettent pas de prendre en compte la complexité supplémentaire induite par le REPMP.

Il n'y a donc pas ou peu de modèles convaincants permettant de répondre au REPMP. C'est dans le but de répondre à ce besoin et à ce défi, que j'ai proposé, dans mes travaux de recherche, trois modèles : REMIND (**partie 2**), RP-MMK (**partie 3**) et AIPA (**partie 4**). Je présenterai, dans les trois prochaines parties, ces modèles, puis, je discuterai dans la **partie 5**, de différents aspects de modélisation qui auront été mis en exergue par ces modèles.

2. Approche multicritère interactive : REMIND

REMIND (*Real Estate Management INteractive Decision*) est un modèle appartenant au champ des approches d'aide à la décision interactive. Il utilise une mécanique de filtrage : le gestionnaire du parc immobilier peut progressivement exprimer ses préférences et simuler leurs effets via des indicateurs

sur le parc. Ce système de filtre est couplé à une approche d'optimisation basée sur la recherche taboue réactive (Battiti and Tecchiolli 1994) permettant au décideur d'obtenir un ensemble de bons plans parmi lesquels, grâce à des filtres, il peut choisir celui à mettre en œuvre.

REMIND (Taillandier, Abi-Zeid et al. 2014) est une évolution du modèle que j'avais proposé dans le cadre de ma thèse (Taillandier 2009) ; la précédente version a fait l'objet des articles (Taillandier, Sauce et al. 2009, Taillandier, Sauce et al. 2009, Taillandier, Sauce et al. 2011). Le modèle de la thèse n'intégrait que très partiellement la logique pluriannuelle (on recommençait une même procédure pour chaque année du plan) et il n'intégrait pas de recours à l'optimisation permettant d'obtenir un ensemble de bons plans. Les leçons tirées lors du développement et de l'expérimentation de cette première version du modèle m'a permis de développer REMIND, que je décrirai dans les parties suivantes.

2.1. Une approche interactive multicritère

La gestion d'un parc immobilier implique de multiples objectifs qui sont souvent conflictuels : assurer le confort des occupants et un haut niveau de sécurité, minimiser les coûts d'entretien, etc. Ces objectifs vont se retrouver au niveau du REPMP, qui ne peut se concevoir qu'au travers d'une modélisation multicritère (ou multi-objectif). La modélisation multicritère présente plusieurs avantages (Bouyssou 1993) : (a) la prise en compte, explicitement, des différents points de vue sur chaque option (Roy 1996) (N.B. il est difficile d'arriver à une compréhension commune des conséquences des choix, lorsque les différents critères sont regroupés en un seul indicateur), la capacité (b) à mieux saisir le sens de chaque critère, (c) à mieux formaliser les éléments d'incertitude et d'imprécision, évitant ainsi les effets cumulatifs, et (d) à favoriser une meilleure compréhension des compromis inhérents à toutes les décisions. La logique multicritère entre parfaitement dans ma vision holistique et complexe du système. Elle est aussi intéressante comme source d'échanges et de discussions (voir **Chapitre 3 partie 5.1**) ; elle est donc utilisée pour REMIND.

Mais, élaborer un modèle multicritère présuppose de se confronter à la question de la construction du compromis entre les différents critères en tenant compte des préférences du décideur. Bien sûr, il est toujours possible de ne pas formaliser ce compromis et de laisser sa construction à la seule discrétion du décideur, comme je l'avais fait pour ECO2D2 (**Chapitre 3 partie 4**), mais cela n'est pas toujours souhaitable. En le formalisant, on clarifie ce compromis, on l'explique et on donne à comprendre la décision. Je reviendrai sur ce point dans la discussion en **partie 5.3**. J'avais exposé le principe de la construction de ce compromis en optimisation multi-objectif (**Chapitre 3 partie 4.5**), qui passe par des approches *a priori*, *a posteriori* ou interactive. En aide à la décision multicritère (MCDA), il existe trois façons de formaliser ce compromis (Roy 1996) : critère de synthèse (i.e. on agrège tous les critères sur un critère unique), surclassement de synthèse (i.e. on agrège les comparaisons entre les différentes options possibles), interactive (i.e. construction progressive des préférences tout en allant vers la solution). La plupart des modèles génériques appartenant aux deux premières approches (critère de synthèse et surclassement) passent par le recours à des poids associés aux critères. L'obtention de ces poids est souvent une tâche difficile, bien qu'il existe de nombreux outils et méthodes pour aider à le faire (Bana e Costa 1986, Yeh, J. Willis et al. 1999, Kodikara, Perera et al. 2010, Siskos and Tsotsolas 2015). En plus de cette difficulté, il y a souvent de fortes incertitudes sur les valeurs des poids (Schärlig 1985, Vansnick 1986). Enfin, l'usage des poids rigidifie le compromis entre critères, alors que les préférences et l'importance relative des critères peuvent changer selon le niveau de performance atteint (Taillandier and Abi-Zeid 2013). Par exemple, l'aspect sécurité peut être considéré comme très important jusqu'à un certain point, après quoi il devient secondaire une fois qu'un niveau jugé satisfaisant a été atteint. Cette variabilité du niveau d'importance des critères est rarement prise en compte dans les modèles MCDA. De plus, si pour de

nombreux problèmes de décision, la préférence d'un critère par rapport à un autre est stable quelle que soit l'option considérée, ce n'est pas toujours le cas (Schärlig 1985). Par exemple, dans le REPMP, un gestionnaire peut accorder une forte importance à l'aspect environnemental pour certains bâtiments, alors que cet aspect n'est pas aussi important dans d'autres zones. Pour ces raisons, nous avons choisi de ne pas inclure de poids sur les critères dans REMIND.

REMIND est basé sur une approche interactive où le gestionnaire du parc exprime progressivement ses préférences jusqu'à converger vers une solution. Nous avons opté pour une approche basée sur des filtres qui permettent de discriminer des actions (niveau local) ou des plans d'actions (niveau global). Le décideur peut ainsi, peu à peu, réduire l'espace des solutions (i.e. plans d'actions réalisables). A chaque choix du décideur (i.e. choix d'un filtre), REMIND va simuler ses conséquences, ce qui permet au décideur de bien appréhender son incidence. Il peut, bien sûr, à tout moment revenir en arrière et modifier ou supprimer un filtre précédemment retenu. La logique de filtrage assure aussi une traçabilité de la décision, permettant de suivre le raisonnement du décideur. Je reviendrai avec plus de détails sur les filtres et leur utilisation dans la **partie 2.3**, mais je commencerai par présenter la structure du modèle de parc immobilier sur laquelle repose REMIND (**partie 2.2**). Le même modèle du parc sera aussi utilisé dans RP-MMK (**partie 3**).

2.2. Modélisation du système

Afin de pouvoir choisir des actions de maintenance, le système *parc immobilier* est modélisé selon une structure arborescente partonomique (i.e. décomposition d'un élément en sous-éléments le constituant). La **Figure 4.1** présente un exemple de structuration du parc selon 6 niveaux. REMIND ne repose pas sur une base de connaissances préétablie : c'est au gestionnaire de choisir le nombre de niveaux de description qui lui semble le plus adapté à son parc et de les définir. Ce choix a été fait en raison de la diversité des parcs. Un gestionnaire devant gérer quelques bâtiments homogènes souhaitera sûrement entrer dans des niveaux de détails plus précis qu'un gestionnaire devant gérer des centaines de bâtiments hétérogènes. Je reviendrai sur ce point dans la **partie 2.4**.

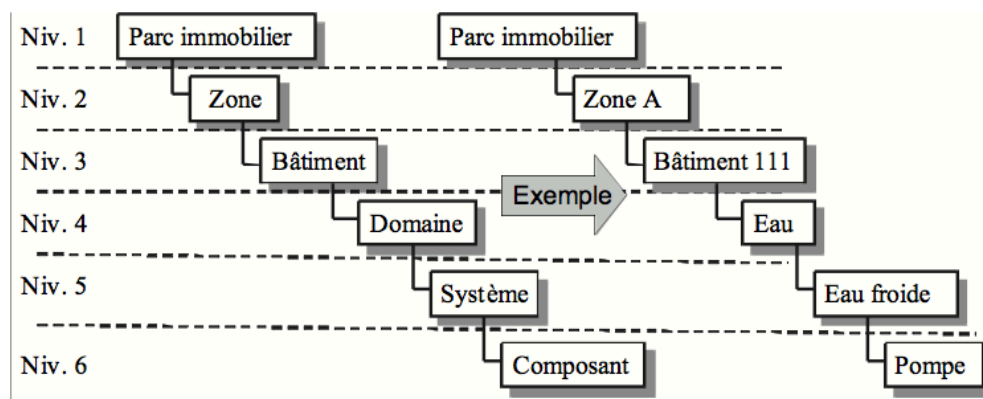


Fig 4.1. Exemple de structure du parc sur 6 niveaux (Taillandier, Ndiaye et al. 2012)

Quel que soit le nombre de niveaux choisi, dans REMIND, le niveau le plus fin est appelé composant élémentaire (noté *composant* dans la suite). C'est à ce niveau qu'est évalué le parc et que sont définies les actions. Chaque composant est évalué selon plusieurs critères, chaque critère correspondant à un domaine d'intérêt pour le décideur. La construction des critères d'évaluation et de leurs échelles est une étape cruciale en analyse multicritère. La famille de critères doit être cohérente, c'est-à-dire répondre aux exigences d'exhaustivité, de cohésion et de non-redondance (Hites, De Smet et al. 2006). La définition de ces critères devrait émerger de discussions entre les parties prenantes (gestionnaire, services techniques, utilisateurs) ; je présenterai une approche pour mener à bien cette discussion dans la **partie 4**. Il n'est pas possible de définir une liste de critères valable pour tous les

gestionnaires car les critères dépendent du type d'organisme, du parc immobilier, des préférences des individus ainsi que de la stratégie de l'organisme. Il est donc nécessaire de construire véritablement pour chaque gestionnaire et chaque parc, une liste de critères adaptée. Une fois les critères définis, il faut évaluer chaque composant vis-à-vis de ces critères. La méthode préconisée dans REMIND, est une approche experte basée sur une échelle ordinale commune pour l'ensemble des critères. Afin de préciser le sens de chaque valeur (appelé *note*), un tableau, appelé *grille de qualification*, est construit avec les parties prenantes. Il explicite le sens de chaque note vis-à-vis de chacun des critères. La **Table 4.1** donne un exemple de grille de qualification construite lors d'une expérimentation.

Tab 4.1. Exemple de grille de qualification (Taillandier, Fernandez et al. 2017)

Score	Regulatory compliance (COR)	Asset value (AVA)	Client satisfaction (SAT)
1	Serious non conformity The component does not comply with regulations (legal, standards, professional rules) and that can have very serious consequences.	Object unavailable It is likely that the object could not fulfill its expected functions.	Client very unsatisfied The quality of the property and service does not correspond to the expected requirements. There is a risk of discontent propagation. Clients could formulate claims and lodge complaints.
2	Rather serious nonconformity The component does not comply with regulations and that can have serious consequences.	Important degraded use The component should fulfill its expected functions, but in degraded condition.	Client not satisfied The quality of the property and service does not entirely correspond to expected requirements. Client could express its dissatisfaction and leave the place if no actions are taken to improve the situation.
3	Nonconformity without serious consequences The component does not comply with regulations but that can only have non-serious consequences.	Slight degraded use The component fulfills its expected function, but not perfectly.	Client only somewhat satisfied The quality of the property and service does not correspond exactly to the expected requirements. Client could express its dissatisfaction.
4	Total conformity or no regulation linked to the component The regulations are perfectly respected or there is no regulation to comply for this component.	Value exceeded The component fulfills its expected function perfectly.	Client satisfied The quality of the property and service corresponds exactly to the expected requirements.

A partir de cette grille et d'une inspection des composants, la personne en charge de l'évaluation (i.e. expert) doit pouvoir renseigner la note de chaque composant sur chacun des critères. Mais considérant, d'une part qu'un plan d'actions prend acte d'une stratégie à moyen terme (de 5 à 10 ans en général) et d'autre part que les composants se détériorent au fil du temps (selon leur durée de vie), il faut aussi considérer dans le modèle, l'évolution temporelle des composants.

Afin de modéliser l'évolution des composants en l'absence de toute action de maintenance, il est proposé de faire construire à l'expert des règles d'évolution. Evidemment, ces règles dépendent du critère et du composant : e.g. aucune évolution, diminution linéaire basée sur la durée de vie, diminution brutale du score à une date donnée (e.g. arrivée d'une nouvelle réglementation prévue). A l'aide de l'évaluation de la situation actuelle et des lois d'évolution, il est possible de simuler l'évolution, en l'absence de maintenance, de chaque composant du parc sur chaque critère. Cette projection est appelée scénario d'évolution naturelle (SEN). REMIND propose aussi d'obtenir des évaluations aux niveaux plus macros (e.g. niveau bâtiment et niveau parc dans son ensemble) en se basant sur une agrégation multicritère. J'avais proposé dans (Taillandier and Abi-Zeid 2013) d'utiliser ELECTRE TRI-b (Figueira, Greco et al. 2010) particulièrement adaptée à ce type d'agrégation. L'enjeu n'est pas d'agrèger les notes sur les différents critères, mais bien d'agrèger sur chaque critère, les notes de chaque composant appartenant à la même entité (e.g. dans la **Figure 4.1**, ce serait donc d'agrèger les notes des composants appartenant au même système).

L'étape suivante de la modélisation est la définition des actions de maintenance en précisant sur quel(s) composant(s) elles s'appliquent. Notons que dans REMIND, une action peut toucher plusieurs

composants et plusieurs critères, et un composant peut être la cible de plusieurs actions différentes. La liste des actions peut être identique pour tous les bâtiments ou différente. Il est ensuite nécessaire d'évaluer les actions en estimant leur coût et le gain sur chacun des critères. Le gain peut être évalué en termes de notes atteintes ou d'incrément de la note. La **Figure 4.2** illustre la simulation de deux scénarios pour un composant : le premier où aucune action ne serait faite (en haut), et le second où l'on changerait une pompe d'un bâtiment en 2010, conduisant à de nouvelles évaluations pour le composant touché. Cette modélisation suppose une hypothèse importante : le gain et le coût des actions sont indépendants entre les différentes actions. Par exemple, on ne peut pas formaliser qu'une action sera plus performante si elle est réalisée après une autre, ou, de la même façon, on ne peut pas modéliser la mutualisation d'actions (e.g. en utilisant un même échafaudage pour réaliser deux actions). Je reviendrai sur ce point dans la discussion (**partie 2.4**).

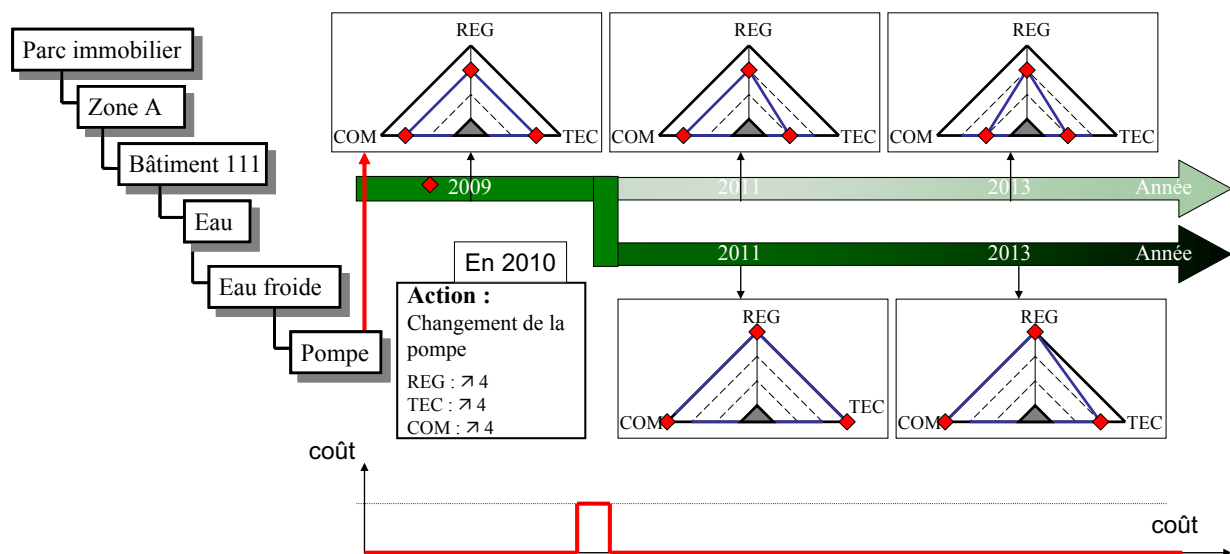


Fig 4.2. Exemple de simulation de l'évolution d'un composant, avec (en bas) ou sans (en haut) action (Taillandier, Ndiaye et al. 2012)

A partir de cette modélisation, il est possible de simuler le comportement du parc aux différents niveaux, sur les différentes années, sur les différents critères et en présence d'une action, d'un ensemble d'actions, ou sans aucune action.

2.3. Utiliser REMIND

L'utilisation de REMIND passe par quatre étapes (**Figure 4.3**). La première phase consiste à modéliser le système tel que présenté en **partie 2.1**. Cette modélisation est chronophage pour une première réalisation. Mais il suffit ensuite simplement de la mettre à jour (achat/vente de bâtiments, nouvel état des composants, etc.) pour les utilisations suivantes. Cette formalisation du parc immobilier permet de mettre en œuvre la méthode d'aide à la décision proposée dans REMIND. On distingue dans ce modèle deux niveaux de décision (local et global) qui correspondent à deux visions et à deux phases distinctes. La vision locale cherche à comparer les actions, alors que la vision globale vise à comparer les plans d'actions.

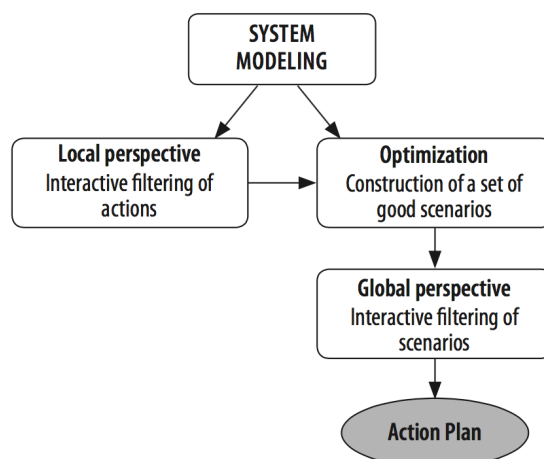


Fig 4.3. *Processus de décision de REMIND (Taillandier, Abi-Zeid et al. 2014)*

Phase locale. La vision locale permet d'aider le gestionnaire (i.e. le décideur) à identifier des actions clefs, c'est-à-dire les actions qui semblent particulièrement importantes parce qu'elles répondent à une urgence, parce qu'elles sont prévues dans la stratégie préétablie ou parce qu'elles semblent particulièrement efficaces. Il peut aussi, dans cette phase locale, rejeter des actions qu'il ne souhaite pas mettre en œuvre, parce qu'elles ne sont pas adaptées, ne répondent à aucun besoin exprimé, etc. Cette phase (sélection ou exclusion) est réalisée grâce à une approche de filtrage. Le gestionnaire construit des filtres qui vont retenir certaines actions : elles seront soit intégrées au plan, soit exclues, selon le type de filtre. Un filtre peut être directement situé sur une action (e.g. *je souhaite que telle action soit dans le plan*), sur une caractéristique (e.g. *je ne souhaite aucune action sur ce bâtiment*) ou il peut être défini vis-à-vis d'un objectif local (e.g. *je souhaite atteindre un score de 4 sur le critère réglementaire dans ce bâtiment*). Le décideur peut, à tout moment, revenir en arrière et modifier les filtres déjà en place. REMIND fournit à chaque utilisation de filtre le résultat simulé quant à l'état du parc pour chaque année, ainsi que le budget restant. REMIND permet d'utiliser aussi des filtres composites portant sur plusieurs conditions simultanément (e.g. atteindre un objectif réglementaire tout en assurant une bonne qualité de service). Une fois le filtrage terminé, REMIND planifie automatiquement les actions retenues en suivant la procédure exposée dans (Taillandier, Abi-Zeid et al. 2014). A la fin de la phase locale, on obtient ainsi un ensemble d'actions déjà planifiées qui constituent la base du plan d'actions.

Phase d'optimisation. Après la phase locale, REMIND passe par une phase d'optimisation afin d'élaborer un ensemble de « bons » plans d'actions respectant l'ébauche du plan obtenu avec le filtrage local. Il est aussi possible de sauter la phase locale et de passer directement à la phase d'optimisation si le gestionnaire n'a pas d'objectifs locaux spécifiques qu'il souhaite atteindre (dans ce cas, le plan initial est vide). Dans REMIND, on appelle « bons plans », les plans d'actions qui minimisent un indicateur global, noté INAD. INAD correspond à la somme de l'écart entre l'état du parc projeté en la présence d'actions et l'état du parc que le décideur aimerait voir atteint. Afin de calculer cet indicateur, il est demandé au gestionnaire d'explicitier pour chaque critère et chaque bâtiment, un score idéal et un score acceptable. Le score acceptable correspond à un score jugé satisfaisant alors que le score idéal correspond à ce que le gestionnaire peut espérer obtenir au mieux. La formule pour le calcul de INAD est détaillée dans (Taillandier, Abi-Zeid et al. 2014). Une valeur de INAD de 0 représente une correspondance parfaite entre le plan d'actions et les attentes. Plus la valeur de l'INAD est faible, meilleur est le plan d'actions. On cherchera donc les plans d'actions minimisant INAD. En raison de l'explosion combinatoire, il n'est pas possible de construire l'ensemble des plans d'actions possibles pour trouver les meilleurs plans d'actions. Afin de résoudre

le problème d'optimisation (i.e. trouver le(s) plans d'actions minimisant INAD), nous avons choisi d'utiliser une métaheuristique : la recherche taboue réactive (Battiti and Tecchiolli 1994). Cette méthode, qui a été employée avec succès pour résoudre de nombreux problèmes (Taillandier, Duchêne et al. 2008, Zhang, Yun et al. 2009), est une évolution de la recherche taboue. Le principe est de partir d'une solution initiale (i.e. un plan d'actions contenant les actions retenues en phase locale) et de l'améliorer en explorant son voisinage, défini comme l'ensemble de solutions légèrement différentes : ajout d'une nouvelle action, suppression d'une action, remplacement d'une action par une autre action, changement de l'année de mise en œuvre d'une action. Ce problème est mono-objectif (uniquement minimiser INAD) et devrait normalement converger vers une seule solution. Mais, afin de laisser au gestionnaire la possibilité de choisir entre différents bons plans, nous conservons toutes les solutions qui ont une valeur INAD à moins de 5% de la plus petite (i.e. meilleure) valeur de INAD. De plus, l'algorithme de recherche est lancé 20 fois en partant d'une solution initiale aléatoire afin de limiter l'impact de celle-ci. A la fin de la phase d'optimisation, on dispose d'un ensemble de bons plans d'actions minimisant INAD parmi lesquels le gestionnaire doit choisir.

Phase globale. A partir de l'ensemble des bons plans obtenus lors de la phase d'optimisation, l'objectif est de guider le gestionnaire vers le choix du plan qui lui convient le mieux. Comme pour la phase locale, ce choix se fait selon une logique de filtrage, à la différence que la phase globale cherche à sélectionner ou à exclure des plans et non des actions. Les filtres globaux peuvent être construits vis-à-vis d'un objectif à atteindre (e.g. *assurer la satisfaction du client jusqu'en 2011*) ou sur la structure globale du plan (e.g. *limiter le nombre d'actions sur un même bâtiment au cours d'une année*). Comme pour la phase locale, les filtres réduisent peu à peu le nombre de solutions possibles (i.e. plans d'actions) jusqu'à ce qu'il n'en reste plus qu'une seule. A l'issue de cette phase, le seul plan d'actions restant constitue la solution qui devrait être mise en œuvre. Le détail du fonctionnement des différentes phases et notamment des filtres peut être trouvé dans (Taillandier, Abi-Zeid et al. 2014).

2.4. Application

REMINd a été utilisé dans le cadre d'une expérience menée en collaboration avec une grande entreprise française. Le parc immobilier de cette entreprise est composé de plusieurs centaines de bâtiments, sur plusieurs sites. Nous avons considéré une zone de l'un de ces sites, composé de 22 bâtiments. L'entreprise est structurée autour de quatre types d'acteurs : les techniciens, les responsables techniques, les chefs de secteur et un gestionnaire immobilier (le décideur). L'entreprise emploie un nombre suffisant d'experts technique pour lui permettre d'évaluer et de maintenir les bâtiments de manière autonome.

Modélisation Le parc a été décrit selon 4 niveaux (parc, zone, bâtiment, composant). Le service de gestion immobilière a choisi un horizon temporel de cinq ans (de 2009 à 2013, l'expérimentation ayant été faite en 2008) avec deux niveaux de contraintes financières : une contrainte globale (pour les cinq ans) correspondant à un montant total de 4000 k€ et une contrainte annuelle correspondant à un montant de 1000 k€.

Dans notre expérience, trois critères ont été identifiés pour évaluer l'état des composants des bâtiments : la conformité réglementaire (COR), la disponibilité (AVA) et la satisfaction (SAT). La conformité réglementaire (COR) est liée au respect des lois et des normes. Il s'agit souvent d'un aspect prédominant, car les conséquences peuvent être extrêmement importantes en cas de non-conformité. Toutefois, il est fréquent de trouver des bâtiments ne répondant pas totalement à la réglementation (e.g. accès des personnes à mobilité réduite). La disponibilité des bâtiments (AVA) concerne la capacité d'un bâtiment à remplir ses fonctions (stabilité structurelle, chauffage, alimentation en eau...). La satisfaction (SAT) concerne les contrats de services signés avec les clients (locataires et utilisateurs

des bâtiments). Ces trois critères ont été identifiés à la suite de discussions avec les membres de l'équipe de gestion du parc. Ils ont choisi d'utiliser une échelle à 4 échelons pour chacun des critères et ont construit la grille de qualification présentée en **Table 4.1**. A partir de cette grille, les experts ont pu évaluer l'état du parc immobilier. Deux lois d'évolution différentes pour les évaluations ont été retenues pour les trois critères : pour AVA et SAT, une loi linéaire basée sur la durée de vie théorique des composants (i.e. la note d'un composant ayant une durée de vie de 9 ans diminuera de 1 tous les 3 ans) et pour COR, une loi constante (i.e. aucune diminution de la note du composant pendant la durée du plan). Au total, 56 actions possibles ont été proposées et évaluées par les experts techniques pour les bâtiments de cette zone.

Phase locale. Cinq filtres (trois pour la sélection, un pour l'exclusion et un composite) ont été utilisés par le gestionnaire dans la phase locale. La **Table 4.2** résume les résultats de la phase locale après l'utilisation des filtres. Chaque filtre est qualifié par un intitulé décliné selon les paramètres du problème. Cet intitulé permet de suivre le raisonnement du décideur. Par exemple, pour cette application, il avait pour souci premier d'assurer une bonne conformité réglementaire. Il a ensuite souhaité assurer un bon niveau de service pour le bâtiment 10, en vue de la signature d'un nouveau contrat de location, puis sur les bâtiments 13 à 22 à l'horizon 2012. A l'inverse les actions sur le bâtiment 8 ont été éliminées, celui-ci ne présentant aucun intérêt stratégique pour le gestionnaire. Le dernier filtre consistait à choisir des actions peu onéreuses mais permettant d'améliorer la qualité technique des composants.

Tab 4.2. Filtres locaux utilisés dans l'expérimentation (Taillandier, Abi-Zeid et al. 2014)

Filters	Characteristic	Selected Actions	Remaining Budget (k€) in
Ensure a high regulatory compliance level for the entire housing stock	Selection	2009: <u>A23, A27, A29, A34, A46, A50, A54, A55</u>	2009: 110
	All buildings	2010:	2010: 1000
	All years	2011:	2011: 1000
	COR ≥ 3	2012: <u>A1, A4, A45</u>	2012: 620
		2013:	2013: 1000
			Global: 2730
Provide a high service quality in buildings in B10 starting in 2011	Selection	2009: A23, A27, A29, A34, A46, A50, A54, A55	2009: 110
	B12	2010:	2010: 1000
	2011	2011: <u>A25, A26</u>	2011: 810
	SAT= 4	2012: A1, A4, A45	2012: 620
		2013:	2013: 1000
			Global: 2540
Not a priority: Building 8	Exclusion B8	Exclusion: A17, A18, A19	Excluded Actions: 440
Improve asset value at the lowest cost.	Cascade filter	2009: A23, A27, A29, A34, A46, A50, A54, A55	2009: 110
	<i>Filter 1</i> Selection	2010: <u>A8, A44, A49, A52</u>	2010: 560
	<i>Filter 2</i> Selection	2011: A25, A26	2011: 810
	All buildings	2012: A1, A4, <u>A35</u> , A45	2012: 500
	All years AVA ≥ 2	All buildings All years Action Cost < 150k€	2013: <u>A22, A33</u>
			Global: 1770
Reach a high client satisfaction in 2012 for buildings B13 to B22	Selection	2009: A23, A27, A29, A34, A46, A50, A54, A55	2009: 110
	B13-B22	2010: A8, A44, A49, A52	2010: 560
	2012	2011: A25, A26, <u>A42, A43</u>	2011: 360
	SAT ≥ 3	2012: A1, A4, A35, <u>A37, A38</u> , A45, <u>A47, A51, A56</u>	2012: 90
		2013: A22, A33	2013: 790
			Global: 830

Optimisation et phase globale. La première étape de la phase d'optimisation consiste à définir des notes acceptables et idéales afin de construire un ensemble de bons plans d'actions. Après

discussion avec le gestionnaire, nous avons utilisé les mêmes valeurs pour tous les bâtiments : une note idéale de 4 pour les trois critères, et des notes acceptables de 3 (COR), 2 (AVA) et 2 (SAT). L'indice INAD pour le SEN (scénario sans action) est de 808, alors que celui du plan partiel initial est de 539 ; je rappelle que INAD est un paramètre à minimiser. L'étape suivante consiste à construire un ensemble de bons plans d'actions. Dans cette expérimentation, la meilleure valeur INAD trouvée par l'algorithme d'optimisation était de 463. Nous avons donc conservé toutes les solutions avec une valeur INAD inférieure à 486 (à 5% de $INAD_{min}$) ; un ensemble de 300 plans a été identifié. Le plan d'actions à mettre en œuvre a été choisi parmi ceux-ci à l'aide de quatre filtres globaux (**Table 4.3**). Comme pour les filtres locaux, les filtres globaux permettent par leur formulation de suivre le raisonnement du gestionnaire. Il a souhaité d'une part équilibrer son budget sur les 5 ans du plan tout en limitant le nombre d'actions annuelles sur le même bâtiment afin de réduire la gêne induite par les travaux. Les deux derniers paramètres de filtrage sont liés à la satisfaction des clients (stratégie locative) et à la mise en avant du bâtiment 5.

Tab 4.3. *Filtres globaux utilisés dans l'expérimentation* (Taillandier, Abi-Zeid et al. 2014)

Filter	Characteristic	Number of scenarios remaining after filtering
At the beginning of the global phase		300
Balance the actions on the five years	ActionCost.year \geq 500k€	123
Limit the number of actions on a same building in a year	NbAction.Building.year $<$ 4	56
Ensure adequate client satisfaction starting in 2011	SAT $>$ 1 Every buildings 2011, 2012, 2013	5
Prefer actions on B5	Max(NbActionB5)	1

2.5. Discussion sur REMIND

Je souhaite préciser dans cette partie plusieurs choix de modélisation que j'ai fait pour REMIND et qui peuvent susciter des questions et des discussions.

Evaluation des composants. L'évaluation du parc immobilier est l'un des points clefs de la modélisation. J'ai choisi une évaluation qualitative experte des différents composants ; ces évaluations sont ensuite agrégées à des niveaux de description plus macros. Cette méthode d'évaluation a bien fonctionné lors de l'expérimentation, car le service de gestion du parc disposait d'une équipe de techniciens capables (en termes de temps disponible et de compétences) d'évaluer les différents composants du parc et de proposer les actions. De plus, les techniciens utilisaient déjà une échelle qualitative pour évaluer les bâtiments et avaient déjà l'habitude de proposer des listes d'actions qu'ils faisaient remonter au gestionnaire. Dans le cadre de l'expérimentation, vis-à-vis des pratiques de l'entreprise, nous avons : (a) restructuré la description du parc immobilier, de ses bâtiments et de ses composants pour la rendre plus homogène, (b) enrichi les critères d'évaluation (uniquement technique avant) et construit avec les responsables des services techniques les grilles de qualification, (c) construit avec les techniciens les lois d'évaluation pour chaque critère. Ce cas d'étude a largement bénéficié de la présence et de l'implication de ces techniciens et de la motivation du gestionnaire, mais tous les gestionnaires de parc ne disposent pas des mêmes moyens. Ce point sera abordé dans le paragraphe suivant (base de connaissances). Par ailleurs, l'évaluation qualitative pourrait aussi être remise en question. Pour certains critères (e.g. consommation énergétique, capacité structurelle, etc.), il serait possible de disposer de valeurs quantitatives. Ce point fera l'objet de la discussion en **partie 5.1**.

Base de connaissances. Avec REMIND, j'ai choisi, à partir d'une structure imposée, de laisser beaucoup de liberté au modélisateur : le gestionnaire peut choisir le nombre de niveaux, les éléments à prendre en compte, les critères à considérer, etc. Cela a l'avantage de la flexibilité, permettant d'utiliser la même approche pour n'importe quel type de parc immobilier et quel que soit le point de vue du gestionnaire. En revanche, cela induit un fort inconvénient : pour chaque parc, il faut recommencer le travail du début. La modélisation du parc peut se révéler fastidieuse et coûteuse, surtout pour les gestionnaires disposant d'un parc important ou de peu de moyens. Une façon d'améliorer ce point serait d'intégrer une base de connaissances au modèle, comme je l'avais fait pour les projets de construction (voir **Chapitre 2**). La base de connaissances devrait contenir : (a) des « structurations types » de parcs immobiliers, (b) les éléments usuels associés à chaque niveau de décomposition (e.g. tous les bâtiments ont des murs, un toit, des fenêtres, etc.), (c) un jeu de critères parmi lesquels le gestionnaire devrait choisir, (d) des grilles de qualification adaptées à chaque critère, (d) une liste d'actions type en lien avec chaque composants, ainsi que leurs coûts et leurs gains sur chaque critère et (e) des lois de détérioration type selon les critères et les composants. L'expérimentation, qui a permis de structurer un ensemble de connaissances, pourrait servir de point de départ pour la construction de cette base de connaissances.

Indépendance des actions. Comme j'ai pu l'exposer dans la **partie 2.2**, j'ai posé l'hypothèse de l'indépendance des actions, en termes de coûts et d'impacts. Cela peut sembler être une hypothèse forte car il est fréquent de mutualiser plusieurs actions afin de rationaliser leur déroulement. Par exemple, il peut être intéressant de profiter de la modification des cloisons d'un espace de bureaux pour remettre aux normes le système électrique. Il est toutefois possible d'intégrer cette mutualisation dans REMIND. Il suffit de qualifier l'action, non plus en tant que travaux pris isolément, mais comme un bouquet de travaux cohérents. En effet, ce sont les experts qui définissent les actions à réaliser. Ils peuvent bien évidemment définir des actions qui rassemblent plusieurs types de travaux (e.g. *électricité + cloisons*). C'est ce qui a été fait dans l'application, expliquant que seulement 56 actions aient été proposées ; certaines actions étaient composées de plusieurs types de travaux. REMIND permet aussi de mettre en concurrence différentes actions. Par exemple, pour reprendre l'exemple précédent, il est possible de définir l'action de remise aux normes de l'électricité toute seule, qui constituera une alternative à l'action *électricité + cloisons*. Cela induit cependant un biais relatif à l'ordre de sélection des actions : par exemple, un premier filtre peut retenir l'action *électricité* seule. Un deuxième filtre peut suggérer de retenir l'action *électricité + cloisons* ; or la présence de *électricité* dans le plan (retenu au précédent filtre) peut empêcher l'algorithme de retenir cette action, car elle ne peut pas cohabiter avec l'action *électricité* seule. Une autre difficulté peut venir de la granularité des actions : comparer une action qui coûte moins de 1000€ avec une action de plus d'un million d'euros n'a pas de sens. Il est pertinent de regrouper des travaux tant que les actions restent à des granularités comparables. C'est donc à l'expert en charge de définir les actions, d'être vigilant quant à ce point et de trouver un compromis entre indépendance et granularité.

Optimisation et indice INAD. L'étape d'optimisation a été ajoutée par rapport à la première version du modèle (Taillandier, Sauce et al. 2009). Dans la version initiale, le plan d'actions n'étant pas pluriannuel et le nombre d'actions étant limité, il était possible de construire tous les plans d'actions pour passer ensuite à la phase de filtrage global. Mais cela n'est pas possible dans la version actuelle du modèle en raison de l'explosion combinatoire due à la prise en compte des différentes années du plan. Une autre stratégie a donc été retenue consistant à construire un ensemble limité de plans d'actions possibles. Pour construire cet ensemble, nous avons retenu une approche d'optimisation permettant de retenir de « bons » plans d'actions. La notion de « bon » plan d'actions est discutable, car elle ne repose que sur le calcul de l'indicateur INAD. J'ai en effet choisi pour simplifier cette étape de passer par une optimisation mono-objectif de INAD et de garder un jeu

de bons plans (à 5% de la solution optimale). Ce taux de 5% est arbitraire et résulte de différents tests. Le calcul de INAD passe par une somme non pondérée des écarts entre les attentes du gestionnaire (notes acceptables et idéales) et la situation réelle. INAD est un indice très compensatoire où une bonne note sur un critère peut compenser une faible note sur un autre critère (idem au niveau des bâtiments). Il est tout de même possible d'augmenter de façon indirecte l'importance accordée à certains critères ou bâtiments en jouant sur les valeurs idéales et acceptables ; par exemple en fixant ces valeurs à la note maximale, on augmente l'écart avec la situation réelle et donc l'importance de ce bâtiment/critère. Cependant, rassembler tous les critères sur un même indicateur peut sembler contradictoire avec la vision *multi-* que je défends de manière plus générale (voir **Chapitre 3 partie 7.1**). Je présenterai dans la **partie 3** un modèle d'optimisation multi-objectif qui pourrait être utilisé pour faire de l'optimisation en remplacement de l'optimisation de INAD.

Au niveau de l'algorithme d'optimisation, j'ai choisi d'utiliser la recherche taboue réactive. D'une part, d'après le *No Free Lunch Theorem* (Wolpert and Macready 1997), il n'existe pas, *a priori*, d'algorithme qui s'impose par rapport aux autres lorsque l'on est face à un nouveau problème comme celui du REPMP. D'autre part, l'un des intérêts de la recherche taboue réactive, outre son efficacité, est sa robustesse vis-à-vis des valeurs des paramètres (Battiti and Tecchiolli 1994). Les différents tests menés sur le cas d'application ont démontré le peu d'impact sur les résultats des valeurs des paramètres de l'algorithme. De plus, les résultats se sont révélés toujours très satisfaisants en termes de convergence et de temps de calcul. Finalement, pour conclure sur l'optimisation, je peux rajouter que dans REMIND, l'optimisation n'est qu'une étape intermédiaire : le cœur de la démarche d'aide à la décision est constitué des deux phases de filtrage.

2.6. Conclusion

Dans cette partie, j'ai présenté REMIND, un modèle permettant de mettre en œuvre une approche multicritère interactive d'aide à la décision pour la résolution du REPMP. REMIND est destiné à assister un gestionnaire de parc immobilier dans la conception progressive et le choix d'un plan d'actions pluriannuel. Ce modèle combine une approche interactive d'aide à la décision multicritère avec une phase d'optimisation basée sur la recherche taboue réactive. Le modèle, en replaçant le décideur au centre du processus de décision, permet de l'impliquer réellement. De plus, via le processus de simulation, le gestionnaire peut acquérir une compréhension claire des différents impacts de ses choix. Le modèle a été utilisé avec succès au sein d'une entreprise où il a été jugé utile et pertinent, principalement parce qu'il peut être source de dialogue entre les gestionnaires et les autres acteurs du service. Le choix de chaque action est justifié par des filtres définis par le gestionnaire du parc, assurant la traçabilité des décisions qui peuvent ainsi être expliquées et discutées, et facilitant l'appropriation des décisions par tous les acteurs. Finalement, bien que développé pour le contexte de la gestion de maintenance de parc immobilier, le modèle combinant simulation et optimisation peut être utilisé pour la planification dans d'autres domaines d'application.

3. Optimisation de sac à dos multipoches multi-objectif : RP-MMK

REMIND, basé sur une approche interactive, exige une grande disponibilité du décideur. Cela a une double incidence : (a) le décideur doit s'impliquer fortement dans le processus de décision ce qui requiert une importante disponibilité de sa part, et (b) il a une influence majeure sur le résultat (subjectivité forte), ce qui peut, dans certains cas, ne pas être souhaité (voir **partie 5.3**). J'ai participé au développement d'une autre approche pour le REPMP, passant par une optimisation multi-objectif du problème. REMIND passait aussi, en partie, par de l'optimisation, mais j'ai utilisé pour ce modèle deux stratégies pour réduire la complexité : utiliser des filtres pour réduire l'espace des solutions et passer par une optimisation mono-objectif (agrégation des critères sur l'indicateur INAD).

Avec ce nouveau modèle, appelé RP-MMK (*Real Property - MultiObjective Multidimensional Knapsack*), j'ai souhaité faire une optimisation multi-objectif, sans passer par les hypothèses de simplification faites dans l'optimisation de REMIND (voir la **partie 2.5**). Cela nécessite une modélisation adéquate du problème, afin de pouvoir faire face à sa complexité. Dans RP-MMK, le REPMP a été modélisé comme un problème de sac à dos multipoches multi-objectif (MOMKP). Le problème de sac à dos (*Knapsack Problem*) est un problème d'optimisation combinatoire classique, où l'on cherche à optimiser le remplissage d'un conteneur avec des objets ayant chacun un poids et une valeur ; l'enjeu est de maximiser la valeur totale des objets dans le sac, tout en respectant une contrainte sur le poids total. Un MOMKP est un problème de sac à dos où plus d'un conteneur est disponible (plusieurs poches) et où plusieurs objectifs (plusieurs types de valeur) doivent être optimisés simultanément (Martello and Toth 1990, Lust and Teghem 2012). Des modèles de sac à dos ont déjà été utilisés pour résoudre des problèmes de maintenance (e.g. pour la route (Peng and Ouyang 2013, Saha, Liu et al. 2014), les bâtiments (Alanne 2004), ou les porte-conteneurs (Go, Kim et al. 2013)), mais, aucun n'a utilisé de MOMKP alors que c'est une approche prometteuse pour modéliser le REPMP. En complément du MOMKP il faut faire appel à une métaheuristique pour la résolution du problème. Cette métaheuristique doit être capable de prendre en compte plusieurs objectifs et des variables discrètes (affectation d'actions aux composants). Nous avons eu recours au MO-PSO (Xiaohui and Eberhart 2002).

Je présenterai dans cette partie, RP-MMK, un modèle d'optimisation multi-objectif basé sur un modèle de sac à dos multipoche. RP-MMK permet de proposer au gestionnaire un ensemble de plans Pareto-optimaux, sans aller pas jusqu'au choix final du plan d'actions. Cette dernière étape requiert un autre modèle, tel que AIPA (modèle présenté dans la **partie 4**).

3.1. Modélisation du REPMP en tant que MOMKP

Le modèle du sac à dos est bien adapté à la modélisation des problèmes d'allocation de ressources avec contraintes de coûts. Dans le REPMP, comme nous l'avons évoqué dans la **partie 1**, il y a des objectifs multiples et contradictoires, un grand nombre d'actions de maintenance possibles, un budget limité et un processus pluriannuel. Ce problème peut donc être modélisé comme un problème de MOMKP : les actions sont les objets du MOMKP, leurs coûts correspondent aux poids, les années du plan sont les poches du sac à dos, et les critères de gestion sont les domaines de valeur (i.e. les différents objectifs). Il reste à définir comment est calculée la valeur de chaque action (i.e. l'utilité des actions dont il faudra maximiser la somme).

Dans cet objectif, nous avons introduit pour chaque composant une note souhaitée, que doit définir le décideur. La valeur d'une action correspond à sa capacité à réduire la différence entre la note souhaitée et la note réelle de chaque composant ; cette valeur est appelée *indicateur de contribution* de l'action. Cet indice ressemble à INAD (**partie 2.3**), mais il présente plusieurs différences. D'une part, pour en simplifier l'élicitation, j'ai choisi de passer des notes acceptables et idéales utilisées dans INAD, à une seule note (la note souhaitée) qui se place entre les deux. Une autre différence provient de l'utilisation d'une loi en puissance 2 pour calculer l'indicateur de contribution, afin d'augmenter l'importance des écarts forts entre situation projetée et situation souhaitée. En effet, dans la gestion immobilière, des notes faibles sur un composant sont souvent critiques : une note faible correspond à une situation dans laquelle un composant présente une défaillance majeure sur un critère donné. Dans ce cas, il est généralement urgent de maintenir ce composant (i.e. de le ramener à des valeurs acceptables en termes de note), la condition dégradée pouvant entraîner des conséquences néfastes à court ou moyen terme. Par exemple, une note très faible pour le critère de *sécurité* sur le composant *ascenseur* pourrait conduire à un accident impliquant des utilisateurs (e.g. blessures, décès, etc.) justifiant sa réparation ou son remplacement urgent. Une autre différence est que l'indicateur de

contribution se positionne au niveau des actions et non du plan comme pour INAD ; il représente non un écart entre valeur souhaitée et réelle lors de l'application d'un plan, mais la contribution de l'action à réduire cet écart. L'enjeu est donc d'identifier le plan présentant la somme des indicateurs de contribution la plus forte possible. Enfin, contrairement à INAD, l'indicateur de contribution est défini séparément pour chaque critère. Ainsi, une action est caractérisée par autant d'indicateurs de contribution qu'il y a de critères.

Comme je l'ai exposé dans la **partie 1**, la gestion de la maintenance d'un parc immobilier induit plusieurs critères contradictoires (e.g. assurer une continuité fonctionnelle, assurer un bon confort d'utilisation, etc.). Comme pour REMIND, nous n'avons pas fixé *a priori* des critères ou des objectifs : c'est au gestionnaire de les choisir en fonction du parc et de ses attentes. Le gestionnaire peut choisir le nombre de critères qu'il souhaite, même si le modèle RP-MMK est préférentiellement adapté à un nombre de critères allant de 2 à 7. RP-MMK construit autant d'objectifs à optimiser qu'il y a de critères : les objectifs consisteront à maximiser la somme des indicateurs de contribution pour chaque critère. Pour des raisons d'implémentation (les métaheuristiques fonctionnent mieux avec des fonctions normalisées à minimiser), la somme des indicateurs de contribution (i.e. la valeur totale des indicateurs de contribution de toutes les actions d'un plan) sont transformées en indicateurs notés I_z , qu'il s'agit de minimiser. Notons qu'en passant des indicateurs de contribution aux indicateurs I_z , on transforme des valeurs ordinales en valeurs cardinales. Cela est critiquable sur le plan théorique, mais permet de faciliter l'implémentation (voir **partie 3.4**). Le problème d'optimisation intègre une contrainte qui correspond au budget alloué à la maintenance du parc immobilier. Cette contrainte s'exprime pour chaque année du plan, le budget pouvant varier d'une année à l'autre.

3.2. Résoudre le REPMP

Le MOMKP, comme beaucoup d'autres problèmes d'optimisation combinatoire, a fait l'objet de nombreux travaux de recherche, notamment en ce qui concerne les métaheuristiques qui peuvent lui être associées (Fréville 2004). Ces dernières décennies, en plus des algorithmes évolutifs classiques (NSGA2, SPEA... (Lust and Teghem 2012)), de nouvelles métaheuristiques ont été ajoutées pour résoudre le problème du MOMKP : apprentissage humain (HLO) (Wang, Yang et al. 2015), lucioles (Baykasoğlu and Ozsoydan 2014), colonie de fourmis (Kong, Tian et al. 2008), essaim particulaire (PSO) (Chih 2015), etc. Sur la base du *No free lunch theorem* (Wolpert and Macready 1997), déjà évoqué dans le **Chapitre 3 partie 4.3**, et déclarant qu'aucun algorithme n'est meilleur que tous les autres pour tous les problèmes d'optimisation, nous avons retenu la métaheuristique MO-PSO qui a déjà démontré sa capacité à résoudre des problèmes de sac à dos ((Kong and Tian 2006, Hembecker, Lopes et al. 2007, Bonyadi and Michalewicz 2012)). Ce choix est discuté dans la **partie 3.5**.

Optimisation par PSO. PSO est une métaheuristique développée par Kennedy et Eberhart (1995), très efficace dans les problèmes d'optimisation (Poli 2008, Rezaei, Safavi et al. 2017). Les particules explorent l'espace solution pour trouver la meilleure position, en se basant sur un vecteur de déplacement construit à partir de : (a) la meilleure position qu'elles ont jusqu'alors visitée, (b) la meilleure position parmi les particules voisines et (c) leur vecteur déplacement précédent (inertie de la particule). Une fonction objectif dans PSO peut être continue, discrète ou un algorithme. De nombreuses variantes de PSO ont été proposées dans la littérature pour intégrer plusieurs objectifs (MO-PSO) (Xiaohui and Eberhart 2002), des variables discrètes (Michaud, Castéra et al. 2009), des variables floues (Rezaei, Safavi et al. 2017), etc. Pour le REPMP, les fonctions objectif sont des fonctions discrètes multidimensionnelles. En effet, les variables de décision correspondent, pour chaque action, à l'année à laquelle elle sera retenue (ou à aucune année, si elle n'est pas retenue). Pour répondre à ce problème, nous avons utilisé la variante de MO-PSO proposée par Michaud, Castéra et al. (2009) qui est une généralisation du PSO binaire discret (Kennedy and Eberhart 1997).

Nous avons utilisé pour les particules un voisinage entièrement connecté (Mendes, Kennedy et al. 2004), où chaque particule a toutes les autres particules comme voisines. Dans l'utilisation de cette métaheuristique, chaque particule représente un plan d'actions et sa position dans l'espace solution est définie par les valeurs de ses I_z (une valeur par critère). La description complète du modèle et du processus d'optimisation peut être trouvée dans (Taillandier, Fernandez et al. 2017). Le résultat de l'optimisation multi-objectif est le front de Pareto, constitué par les plans d'actions non-dominés. L'optimisation est répétée cinq fois afin de limiter l'influence des variables aléatoires. En effet, comme la plupart des métaheuristicques, l'algorithme est stochastique et certaines variables sont tirées aléatoirement à son initialisation (population initiale) et pendant son exécution (une partie du vecteur de déplacement). Comme nous l'avons fait pour le problème de démolition (**Chapitre 3 partie 4.5**), après avoir effectué les répétitions, on recompose le front de Pareto en éliminant les solutions dominées par des solutions identifiées lors d'autres itérations.

3.3. Application

La méthodologie a été appliquée au même cas pratique que celui de REMIND (voir **partie 2.4**). On a considéré les mêmes 22 bâtiments, mais pour cette application avec RP-MMK, j'ai utilisé l'ensemble des actions possibles et non plus seulement celles proposées par les experts. Il a ainsi été défini un ensemble de 113 actions différentes possibles. Cet ensemble d'actions a été appliqué à chaque bâtiment ; cependant le nombre total d'actions égal à 1511, est inférieur à 22×113 , car certaines actions n'avaient pas de sens pour certains bâtiments, faute de présence du composant et ont donc été écartées (e.g. réparation de l'ascenseur pour un bâtiment de plain-pied). Il est à noter que cela constitue une différence par rapport à l'application de REMIND où seulement 56 actions avaient été définies. REMIND repose ouvertement sur une approche experte de l'évaluation et sur une subjectivité importante, alors que RP-MMK propose une stratégie plus automatisée : j'ai considéré l'ensemble des actions possibles de façon exhaustive, sans passer par le filtre des experts. L'idée était de laisser l'algorithme décider par lui-même de la pertinence des actions. Cela traduit une différence de philosophie entre les deux approches qui sera discutée dans la **partie 5.3**.

Comme lors de son application avec REMIND, le plan d'actions a été établi sur une durée de 5 ans (de 2009 à 2013) avec le même budget (1000k€ par an). Les composants ont été évalués selon les trois critères de décision définis en **partie 2.4** : la conformité réglementaire (COR), la disponibilité (AVA) et la satisfaction (SAT). Les mêmes évaluations (i.e. celles données par les experts à partir des grilles de qualification) ont été utilisées pour cette application. Le gestionnaire a également défini pour chaque critère ses notes souhaitées, après discussion avec les experts et techniciens : une note souhaitée de 4 pour COR et des notes variant de 2 à 4 pour AVA et SAT, selon la criticité du composant par rapport au critère considéré. Parallèlement, les 113 actions possibles ont été évaluées par les experts, en explicitant pour chacune, son coût et son gain sur les trois critères (COR, AVA et SAT). RP-MMK peut, à partir de ces données, identifier les plans d'actions minimisant les indices $I_{Z_{COR}}$, $I_{Z_{AVA}}$, $I_{Z_{SAT}}$ tout en respectant le budget alloué, sachant qu'aucun plan ne permet d'obtenir les notes souhaitées sur l'ensemble des composants.

Résultats de l'optimisation. Comme présenté dans la **partie 3.2**, RP-MMK utilise l'une des variantes de MO-PSO (Michaud, Castéra et al. 2009) pour calculer les plans d'actions non-dominés. Cinq répétitions de l'optimisation ont été utilisées pour limiter l'impact des variables aléatoires. Le choix des paramètres (e.g. inertie, nombre de particules, etc.) a résulté d'une analyse de la littérature (Xiaohui and Eberhart 2002, Xiaohui, Eberhart et al. 2003) et de différents tests (approche empirique). Les cinq répétitions ont donné un total de 91 solutions optimales différentes, dont 88 non dominées composent le front de Pareto (**Figure 4.4**) ; les 3 solutions écartées étaient dominées par des solutions issues d'autres répétitions.

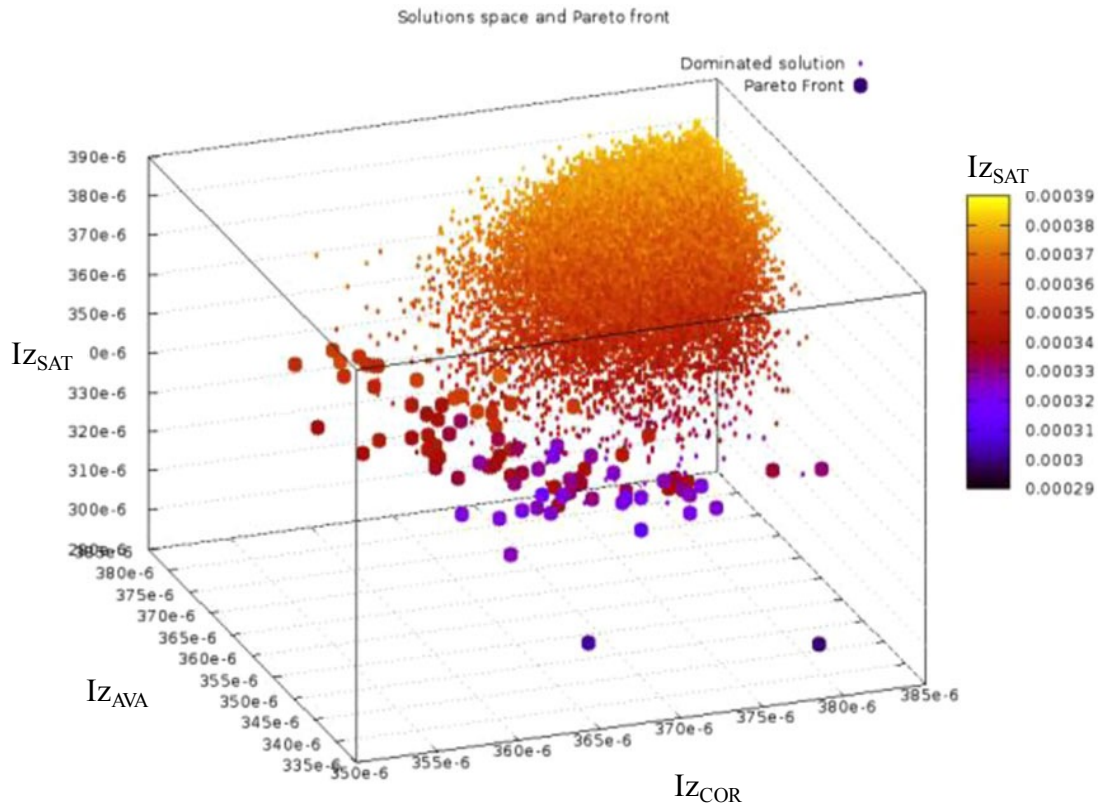


Fig 4.4. *Front de Pareto obtenu avec RP-MMK (Taillandier, Fernandez et al. 2017)*

Dans la **Figure 4.4**, l'ensemble des solutions explorées sont représentées vis-à-vis de leurs valeurs sur les trois objectifs. La couleur renseigne sur leur valeur vis-à-vis de l'objectif $I_{Z_{SAT}}$ afin de mieux situer chaque solution dans la représentation en trois dimensions. L'exploitation directe des valeurs brutes sur les trois indicateurs est difficile. Il y a notamment un effet d'échelle induit par la formule utilisée pour calculer les I_z et qui repose sur une normalisation. Cependant, notons qu'une différence de $10 \cdot 10^{-6}$ pour l'un des indices correspond à un gain significatif pour le parc immobilier. Cette question relative à l'interprétation des résultats est discutée en **partie 3.4**.

Les solutions optimales sont représentées par des cercles de diamètre plus important que celui des solutions non-optimales. Beaucoup de solutions ont été explorées pour arriver à ces 88 solutions optimales, qui pourtant se détachent assez nettement de l'ensemble des solutions visitées. Cela s'explique par la nature discrète du problème pour lequel il n'existe pas forcément de valeurs de variables de décision qui auraient mené à des valeurs d'objectif intermédiaires.

Les solutions optimales sont assez dispersées dans l'espace attestant d'une grande variété des performances sur les objectifs. L'analyse des plans d'actions optimaux révèle que la composition des plans, en termes d'actions, varie aussi largement d'une solution proposée à une autre. Ainsi, le gestionnaire dispose tout à la fois de plans d'actions présentant des compromis variés vis-à-vis des trois critères, mais aussi vis-à-vis des actions elles-mêmes. Cela contribue à enrichir (mais peut-être aussi à compliquer) le choix d'un plan final, parmi les plans optimaux.

3.4. Discussion autour de RP-MMK

Dans cette partie, je vais revenir sur les choix de modélisation de RP-MMK. Je discuterai de plusieurs éléments importants du modèle et j'ouvrirai des perspectives sur des pistes d'amélioration.

Comparaison des résultats entre REMIND et RP-MMK. J'ai présenté les résultats obtenus par les deux modèles sur le même cas d'étude. J'ai d'ailleurs utilisé les mêmes données initiales pour instancier les modèles et calculer les résultats. Il serait donc naturel de vouloir comparer leurs

résultats, mais cela se heurte à plusieurs problèmes. Le premier est simplement dû au type de résultat en sortie des modèles. REMIND produit un plan d'actions alors que RP-MMK donne le front de Pareto (ensemble de plans non-dominés). On ne peut donc pas directement les comparer. Une stratégie serait alors de voir comment se place le plan d'actions proposé par REMIND par rapport au front de Pareto trouvé avec RP-MMK (comme je l'avais fait avec la solution du chargé d'études dans ECO2D2 au **Chapitre 3 partie 4.5**). Pour cela, il faudrait calculer, pour la solution de REMIND, les indicateurs I_z qui définissent la performance du plan sur les trois objectifs. Mais ces indicateurs passent par la contribution des actions. Or les actions n'ont pas été définies de la même manière dans les deux modèles (actions unitaires dans RP-MMK et bouquet de travaux dans REMIND). La contribution des actions n'est ainsi pas comparable d'un modèle à l'autre. Une dernière option serait de passer par le calcul de INAD (indicateur de REMIND) qui est calculé à partir des valeurs des éléments du parc (identique pour les deux) et non par les actions. Mais cet indicateur qui est fortement agrégateur, ne permet pas de qualifier véritablement la pertinence d'un plan. Il induirait donc une comparaison biaisée. Finalement, ce que j'ai souhaité mettre en avant avec cet exemple commun est le fonctionnement des modèles, ce qu'ils impliquent, ce qu'ils apportent, et non les résultats qui ne sont significatifs que pour le décideur. Ce point sera plus largement abordé dans la discussion en **partie 5.3**.

Fonctions objectif. Nous avons choisi de baser les fonctions objectifs sur les critères retenus par le décideur, en passant par une fonction calculant la contribution de chaque action vis-à-vis de la réduction de l'écart par rapport à une situation souhaitée. Cela peut susciter plusieurs réflexions. D'une part, la notion de valeur souhaitée elle-même peut être discutée. Il y a plusieurs façons de l'interpréter : valeur idéale théorique, valeur réaliste pouvant être atteinte, valeur suffisante... C'est, dans mon approche, à chaque gestionnaire de se l'approprier, et de définir elle-même/lui-même ce qu'elle/il souhaite mettre derrière cette notion. En tout cas, fixer ces valeurs n'est pas simple, d'autant que dans RP-MMK, les notes sont définies par composant et par critère alors qu'on se contente de les fixer par bâtiment dans REMIND. Cela demande un travail conséquent d'élicitation, pouvant conduire le gestionnaire, par lassitude, à fixer ces valeurs à 4 (i.e. la note maximale) partout, sans plus de réflexion. Dans ce cas, on peut se poser la question du positionnement du compromis entre la finesse de description et l'effort à fournir pour obtenir des valeurs. Je discuterai de ce point dans la **partie 5.1**. Il pourrait être intéressant d'explorer des stratégies d'élicitation minimisant la fatigue de l'expert (e.g. acquisition incrémentale (Cao 2009)).

Un autre aspect des fonctions objectif peut être critiqué : nous avons fait le choix de ne pas introduire de pondération entre les différents composants. Un écart de 2 sur un critère a la même force quel que soit le composant. Or, on peut estimer qu'il existe des composants plus importants que d'autres (ou plus critiques). Avec le système actuel, il est tout de même possible de moduler l'importance des composants en choisissant des notes souhaitées élevées pour les composants les plus critiques, mais cela reste limité et artificiel. Ce choix de modélisation a été fait par souci de simplification : définir et justifier des poids nécessite d'analyser finement le rôle de chaque composant par rapport au bâtiment, induisant un effort d'acquisition de connaissances important. Mais cela pourrait constituer un apport intéressant pour RP-MMK. On pourrait alors utiliser un système de pondérations ou une méthode d'agrégation plus complexe (ELECTRE, règles expertes, etc.). Ces règles pourraient être introduites dans la base de connaissances présentée dans la discussion sur REMIND (**partie 2.5**).

Afin de faciliter l'implémentation du problème, j'ai fait le choix de normaliser la somme des indicateurs de contribution pour construire les fonctions objectif à optimiser (indicateurs I_z). Cela induit un double problème. D'une part, cela oblige de passer d'une échelle ordinale à une échelle cardinale, ce qui suppose la linéarité des préférences entre les échelons de l'échelle, qui n'est en toute rigueur pas assurée. D'autre part, la normalisation pose le problème de la représentativité des valeurs

des indices : des valeurs exprimées en 10^{-5} sont peu parlantes pour un décideur. Ce choix de normalisation a facilité le processus d'optimisation ; en effet, la plupart des algorithmes de recherche de solutions optimales requièrent d'avoir des valeurs d'objectif bornées, qu'il faut minimiser pour les faire tendre vers la valeur idéale de 0. Ce type de choix fait partie des compromis entre richesse du modèle et capacité d'implémentation. Il est ici pleinement assumé bien que d'autres solutions, peut-être meilleures, auraient pu être potentiellement trouvées (e.g. distinguer les indicateurs utilisés dans l'algorithme de ceux manipulés par le décideur).

Choix des contraintes et des objectifs. Nous avons fait le choix de considérer le budget sous la forme de contraintes à respecter. Il aurait aussi été possible de le modéliser en tant qu'objectif, en plus des objectifs des critères. Une autre option aurait été de fixer les critères en tant que contraintes (en passant par les notes souhaitées) et le budget en tant qu'objectif à minimiser ; on aurait alors un problème monocritère. Plusieurs chercheurs ont fait ce choix de modélisation (e.g. (Adeli and Sarma 2006, Wang, Xia et al. 2014)). Mais pour beaucoup de gestionnaires immobiliers (comme dans l'application présentée), notamment publics, minimiser le coût de la maintenance n'est pas réellement un objectif. Leur problématique est plutôt de savoir comment dépenser de la façon la plus efficace possible le budget alloué à cette activité. Cela s'inscrit dans une logique de règles de gestion budgétaire qui prédomine dans de nombreux organismes, et pour lesquels le budget dépend de multiples paramètres qui peuvent être extérieurs à la gestion immobilière. Le budget est bien considéré comme une donnée d'entrée qui ne peut pas être modifiée par le gestionnaire du parc immobilier. Dans le modèle actuel, si l'on ne cherche pas à optimiser le coût du plan, il reste en revanche possible de faire plusieurs itérations d'optimisation en faisant varier le budget ; cela peut permettre de déterminer, par exemple si son augmentation pourrait améliorer sensiblement les performances du parc.

Choix de la métaheuristique. Une question classique est celle du choix de la méthode d'optimisation (ici MO-PSO). Il existe de nombreux algorithmes pour de l'optimisation multi-objectifs proposés et discutés dans la littérature (voir par exemple **Chapitre 3 partie 4.3**). Pour l'optimisation de RP-MMK, il est presque impossible d'assurer la supériorité d'un algorithme sur tous les autres. MO-PSO a donné une réponse (front de Pareto) satisfaisante dans un délai raisonnable ; l'algorithme a donc été jugé pertinent. Mais il pourrait être intéressant de tester d'autres variantes de PSO (e.g. (Moslemi and Zandieh 2011, Zhao, Luan et al. 2018)) et d'autres métaheuristiques (e.g. NSGA2 (Deb, Agrawal et al. 2000), PSACO (Shelokar, Siarry et al. 2007), DBEA (Asafuddoula, Ray et al. 2013), etc.). Si MO-PSO a donné des résultats pertinents dans le cadre de l'application, on peut se poser la question de sa capacité à optimiser de façon pertinente des problèmes à très grande échelle qui impliquent des centaines de bâtiments et des milliers de composants. Pour y faire face, une solution pourrait être de combiner l'algorithme d'optimisation avec une technique de segmentation (Hegazy and Rashedi 2013). Cette stratégie, qui n'a pas encore été testée, reste hypothétique, mais constitue une piste à investiguer.

3.5. Conclusion

J'ai présenté dans cette partie, RP-MMK, une nouvelle modélisation du REPMP, sous la forme d'un problème d'optimisation multi-objectif de sac à dos multipoche. Ce problème d'optimisation combinatoire a été résolu en utilisant la métaheuristique MO-PSO. Le modèle a été instancié en utilisant un cas d'étude réel, ce qui a permis de démontrer sa capacité à produire des plans d'actions optimisés dans un cadre réaliste. La méthode ouvre des perspectives intéressantes dans la construction de plan d'actions de maintenance en fournissant une alternative à REMIND. RP-MMK s'inscrit dans une démarche demandant moins d'implication de la part du décideur et est plus facilement automatisable. Il est en cela plus facilement exportable d'un parc immobilier à l'autre. Toutefois, RP-

MMK ne permet pas au décideur de choisir un unique plan d'actions, mais sélectionne un ensemble de plans potentiellement intéressants. Ce modèle doit être accompagné d'une approche d'aide à la décision, mais il constitue déjà en soi une avancée importante, qui peut être utilisée dans d'autres cadres celui de la maintenance des bâtiments. On pourrait par exemple utiliser la même approche, couplant modèle de sac à dos et optimisation multi-objectif, pour des problèmes de maintenance d'un réseau d'infrastructures ou de prévision d'actions d'aménagement sur un territoire.

4. Optimisation, multicritère et argumentation : AIPA

Prévoir des actions de rénovation énergétique pour un parc immobilier rentre dans une logique identique à celle de la conception d'un plan de maintenance. Les actions de rénovation sont généralement planifiées dans un plan d'actions pluriannuel qui est parfois combiné au plan contenant les actions de maintenance. En effet, certaines actions (e.g. changement des fenêtres, installation/changement d'une VMC, etc.) ont des impacts dans plusieurs domaines et rentrent tout à la fois dans une logique de rénovation énergétique et de maintenance.

La conception d'une stratégie de rénovation énergétique (i.e. construction d'un plan d'actions pluriannuel) est l'un des points de départ du projet ANR REHA-PARCS (2016-2020), qui vise à l'élaboration d'un outil d'aide à décision pour la réhabilitation de parcs de bâtiments sociaux ; la même démarche pourrait être appliquée pour d'autres types de parcs. Comme j'ai pu l'aborder dans la **partie 1**, établir un tel plan soulève une réelle difficulté quant à l'aide à la décision dans un contexte d'explosion combinatoire (combinaison d'actions unitaires sur chaque bâtiment et planifiées par année). De plus, avec REMIND et RP-MMK, qui partageaient une même structure d'évaluation des éléments du parc, j'avais opté pour une évaluation multicritère ordinale effectuée par des experts. Ce choix est intéressant dans un souci de généralisation, où les critères ne sont pas connus d'avance et peuvent être purement qualitatifs. Mais cela est moins intéressant dès lors que l'on s'intéresse à des domaines pour lesquels des données quantitatives, faisant sens pour le décideur, peuvent être trouvées, comme celui de la consommation énergétique. En effet, il est possible de simuler le bâtiment (par exemple avec Li-BIM, voir **Chapitre 3 partie 2**) dans son état initial et dans un état projeté, après la mise en œuvre d'une ou plusieurs actions. C'est par exemple, ce que j'avais fait dans le cadre du modèle ARD-Fourmi (**Chapitre 3 partie 3**). Mais réaliser une simulation thermique est chronophage : 30 minutes sur un ordinateur de bureau classique (iMac 2,5 GHz Intel Core i5) pour une simulation avec Li-BIM et un temps sensiblement identique avec un logiciel thermique dynamique classique. Réaliser des simulations pour tous les bâtiments d'un parc avec toutes les combinaisons d'actions possibles n'est pas envisageable. La combinatoire est encore plus importante dès lors que l'on considère un plan sur plusieurs années (logique pluriannuelle). En plus de porter ces enjeux que l'on trouvait déjà dans le problème de maintenance des parties précédentes, REHA-PARCS a aussi pour enjeu de s'inscrire véritablement dans une démarche de développement durable. Pour cela, le processus décisionnel doit intégrer les différents acteurs impactés par la décision (i.e. approche participative).

4.1. Approche utilisée dans REHA-PARCS

Afin de répondre à ces enjeux, le projet REHA-PARCS regroupe trois approches : (1) une caractérisation du parc par une analyse typologique, (2) une optimisation multi-objectif permettant de construire un jeu de solutions Pareto-optimales, enfin (3) une méthode d'aide à la décision participative devant permettre aux acteurs de choisir collectivement une solution parmi les solutions optimales. L'analyse typologique est basée sur du *clustering* (Kohler, Steadman et al. 2009)). Le *clustering* (parfois appelé *partitionnement* en français) repose sur l'identification de *clusters* (i.e. de sous-ensembles) homogènes. Dans REHA-PARCS, l'enjeu est de construire des sous-ensembles de bâtiments qui ont des performances énergétiques proches. En dégagant un bâtiment représentatif de

chacun des sous-ensembles, il devient possible de définir un jeu très limité de bâtiments sur lesquels seront conduites les simulations thermiques. Cette tâche, portée par le CSTB, fait l'objet de la thèse de Yunseok Lee. Elle doit conduire à caractériser et évaluer l'efficacité des différentes actions possibles sur les différents bâtiments d'un parc immobilier. Cette approche est combinée à une approche d'optimisation multi-objectif pour explorer l'espace des solutions possibles. RP-MMK (**partie 3**) aurait pu être retenu, mais une autre approche, basée sur les algorithmes génétiques (Holland 1975)) est actuellement en cours de développement au sein du LOCIE (thèse de Yannis Merlet). Elle pourra être comparée et évaluée vis-à-vis de RP-MMK, lorsqu'elle sera opérationnelle. L'optimisation multi-objectif va conduire à la construction du front de Pareto, regroupant l'ensemble des stratégies non dominées. L'enjeu est alors d'aider le bailleur social à choisir une solution dans cet ensemble. Je me focaliserai sur cet aspect qui fait l'objet de la thèse de Benjamin Delhomme (**Annexe B**). L'approche retenue repose sur le couplage d'une méthode d'aide à la décision multicritère (MCDA) (Belton and Stewart 2010) et de l'approche argumentative abstraite (Dung 1995). Les MCDAs proposent un formalisme efficace et facilement compréhensible pour modéliser les enjeux d'une décision. L'approche argumentative permet de justifier les choix de modélisation (critères, poids, etc.) liés à l'approche multicritère.

Dans une première partie, je justifierai la démarche retenue puis j'exposerai le principe du couplage MCDA/Argumentation. Ensuite, après avoir décrit le principe de l'argumentation, je présenterai le modèle AIPA. Dans la **partie 4.6**, je discuterai de plusieurs points liés à ce modèle.

4.2. Justification de l'approche retenue

L'un des enjeux majeurs du projet REHA-PARCS est de placer le processus décisionnel dans une approche de développement durable, prenant en compte ses différentes dimensions (e.g. économique, environnementale, sociale, culturelle, spatiale, éthique). Ces différentes dimensions conduisent nécessairement à des objectifs contradictoires qui doivent être conciliés dans un processus décisionnel. Mais le processus décisionnel est lui-même impacté par cette perspective, dans la mesure où il doit intégrer une gouvernance équilibrée et juste, induisant de la participation : le développement durable ne peut être satisfait qu'en consultation avec les différentes parties prenantes impliquées dans la prise de décision, conduisant idéalement à un large consensus. Les différents acteurs impliqués tels que le gestionnaire, les services techniques, les locataires et propriétaires, qui peuvent avoir des points de vue et des objectifs différents, doivent être impliqués dans le processus décisionnel.

Différentes approches participatives, basées sur le dialogue pour guider les acteurs vers une décision finale, ont été utilisées pour les décisions publiques (Evans and Kotchetkova 2009, O'Faircheallaigh 2010). Ces approches participatives sont particulièrement intéressantes : (a) elles impliquent un large éventail d'acteurs dans le processus de décision, (b) elles permettent de parvenir à une décision plus proche des valeurs et des préoccupations de chaque acteur, et (c) elles favorisent l'acceptation de la décision finale par les acteurs, en raison de la transparence du processus. Cependant, l'une des principales limites de ces approches est leur faible niveau de formalisation et de reproductibilité (Hutchel and Molet 1986). L'absence de formalisation limite la traçabilité de la décision : quelqu'un qui souhaite comprendre, *a posteriori*, la décision pourrait, au mieux, se référer à un rapport ou à une transcription des discussions, ce qui prend du temps et n'est probablement pas suffisant pour comprendre la décision finale. De plus, ce type d'approche ne fournit généralement pas d'informations telles que le classement global des projets et leur évaluation selon différents critères, éléments qui pourraient aider à comprendre et justifier les choix effectués.

Pour dépasser ces limites, la littérature scientifique contient de nombreuses méthodes formelles d'aide à la décision, fondées sur un seul critère comme l'analyse coût-bénéfice ou sur plusieurs critères comme la MCDA. De nombreuses méthodes multicritères ont été, utilisées dans un contexte multi-

acteurs, comme MACBETH (Bana E Costa 2001, Donais, Abi-Zeid et al. 2017) ou ELECTRE (Oberti 2004), où un facilitateur pilote le processus de décision avec plusieurs parties prenantes. Cependant, la MCDA est rarement utilisée dans un cadre participatif. Avec la MCDA, la modélisation ne porte pas sur le processus de discussion, mais sur la construction d'un modèle de préférences communes, qui peut émerger suite à des discussions. Il est difficile d'intégrer explicitement dans les cadres mathématiques de ces méthodes, la richesse des discussions entre les acteurs ou la complexité du problème (Bouleau, Chatzis et al. 2004). De plus, le principal défi de l'utilisation des MCDAs est la phase de structuration du problème (Belton and Stewart 2010, Marttunen, Lienert et al. 2017). Cela est d'autant plus difficile dans un contexte multi-acteurs où les parties prenantes peuvent évoluer tout au long du processus : les critères et les options retenus sont-ils pertinents pour toutes les parties prenantes ? Que représente le modèle des préférences communes ? Comment assurer dans le temps même des échanges (temps réel) la bonne compréhension du problème ? Comment garde-t-on la trace du processus ayant conduit à la structuration du problème ? La recommandation finale obtenue par la MCDA peut également faire l'objet de discussions : Est-elle vraiment acceptable pour toutes les parties prenantes ? Pourquoi est-ce cette solution qui est préconisée par la MCDA ? Est-ce que cette solution reflète vraiment les avis et les opinions des parties prenantes ?

Il n'existe, à ma connaissance, aucun modèle permettant, dans un cadre de MCDA, d'organiser les résultats des discussions en temps réel, de manière à assurer la traçabilité, à encourager davantage de discussions et à fournir la justification des décisions prises. Certaines techniques d'argumentation ont pour objet l'explication des résultats obtenus par les modèles MCDA (Amgoud, Bonnefon et al. 2005, Labreuche 2011), mais elles se positionnent sur un plan uniquement théorique (pas d'implémentation permettant de les appliquer dans un cadre opérationnel réel). De plus, elles s'intéressent à la justification de la décision et non à aider à formaliser le problème décisionnel. Des projets combinant argumentation, MCDA et choix social ont été utilisés avec succès dans d'autres domaines d'application, notamment en agronomie (Thomopoulos, Croitoru et al. 2015, Bisquert, Buche et al. 2017). Cependant, il n'existe pas encore de modèle permettant de combiner, de façon opérationnelle et dynamique, argumentation et MCDA dans une approche participative.

Afin de remédier à cette situation, nous avons proposé AIPA (*Argumentation Interface for Participative Approach*). AIPA est un modèle d'aide à la décision multi-acteurs et multicritère qui permet de formaliser les arguments par les différents participants à une réunion, afin de discuter de leur pertinence et de les évaluer dans un cadre argumentatif. Ce modèle est développé en parallèle dans deux projets : le projet REHA-PARCS et le projet CADAU (voir **Annexe C**), qui relève de l'aménagement urbain. Dans ce chapitre, je ne parlerai que de son application au choix d'un plan d'actions pour un parc de bâtiments (REHA-PARCS).

4.3. Couplage entre argumentation et MCDA

La démarche retenue place le modèle MCDA au centre du processus décisionnel. La modélisation du MCDA passe par quatre étapes (**Figure 4.5**) : définition des options (i.e. plans d'actions possibles), définition des critères et définition des paramètres. Le principe de AIPA est d'aider les différentes parties prenantes à formaliser le modèle décisionnel, par le recours à l'approche argumentative. Dans cette approche, chaque phase du processus de modélisation donne lieu à des discussions entre les acteurs qui seront formalisées sous la forme d'arguments et qui permettront de formaliser des éléments du modèle décisionnel.

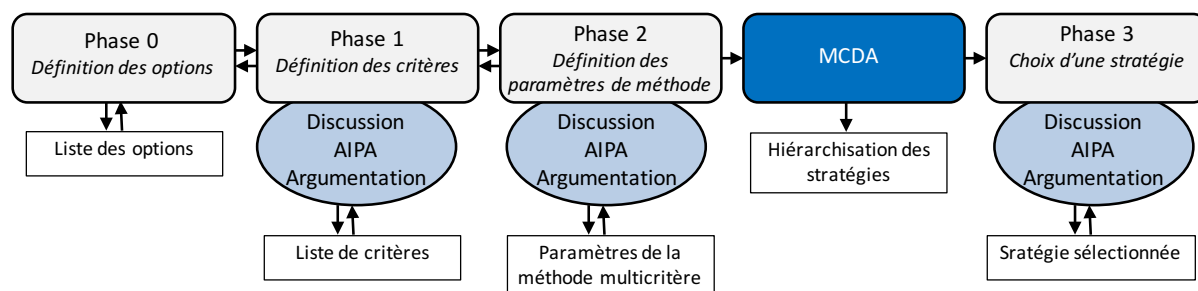


Fig 4.5. Structuration du problème décisionnel

Dans le cadre du projet REHA-PARCS, les options sont directement issues de la phase d'optimisation multi-objectif : ce sont les solutions Pareto-optimales. Il n'est donc pas nécessaire de les définir par la démarche participative. L'étape 0 n'est donc pas traitée par l'argumentation. En revanche, cette étape peut être intéressante dans d'autres cadres (e.g. aménagement urbain dans le projet CADAU).

Lors de la phase 1, les acteurs construisent une liste de critères en lien avec les options formulées lors de la phase 0. Cela passe par un débat argumenté autour du choix des critères. Par exemple, un acteur peut émettre l'avis suivant : *“La consommation énergétique des bâtiments devrait être considérée”* ; il peut alors justifier cette assertion par un argument : *“car cela influence directement le montant des charges pour les locataires”*. L'approche argumentative (détaillée en **partie 4.3**) permet de modéliser les arguments mais aussi, par des inférences, de définir les arguments acceptables en cas de conflit entre arguments. Ainsi, à la fin de cette phase, sur la base des discussions et des inférences, une liste de critères est établie et la structuration du problème peut continuer.

La phase 2 se concentre sur la modélisation des paramètres exprimant les préférences. Ces préférences peuvent être modélisées par des seuils, des pondérations, etc. en fonction de la MCDA utilisée. Par exemple, la méthode ELECTRE III (Roy 1996) requiert, pour chacun des critères, la définition de poids, de seuils d'indifférence, de préférence et de *veto* (facultatif). Les paramètres peuvent être aussi bien qualitatifs que quantitatifs, ordinaux que cardinaux, en fonction de la méthode retenue. Dans une première approche, nous avons retenu la méthode lexicographique. Elle consiste à ordonnancer l'importance des critères. A partir de cet ordonnancement, il est possible de hiérarchiser les options en suivant un processus simple : l'option ayant le meilleur score sur le critère le plus important est classée première, en cas d'égalité, les options sont départagées vis-à-vis du deuxième critère le plus important et ainsi de suite. Cette méthode n'est pas du tout compensatoire, ce qui peut être sa principale limite, mais elle est simple et suffisante dans une première approche. Ce point sera discuté dans la **partie 4.6**. En utilisant cette approche, les seuls paramètres à définir sont le rang de chaque critère vis-à-vis d'un classement par importance.

Une fois les critères et les paramètres fixés, les options peuvent être hiérarchisées par la méthode d'analyse multicritère retenue. Il peut arriver que certains acteurs soient en désaccord avec la solution préconisée par la méthode multicritère (celle classée à la première place). Deux solutions sont alors envisageables : (a) soit la formulation du problème n'est pas satisfaisante (phases 0 à 2) et on peut alors revenir à la phase en question, (b) soit on peut passer à la phase 3. Cette dernière phase permet de valider ou sélectionner d'autres options que celle préconisée après la hiérarchisation des stratégies par le recours à l'argumentation. Par exemple, un acteur du processus de décision peut mettre en avant l'assertion suivante : *“La stratégie S17, classée deuxième, devrait être retenue”* puis l'appuyer par un argument : *“car cette stratégie permet de mieux répartir les moyens entre les différentes zones du parc”*.

4.4. Approche argumentative

Argumentation abstraite. L'approche argumentative consiste à formaliser les arguments des différents acteurs participant à la discussion pour en extraire les points de consensus et de dissension. C'est une approche particulièrement intéressante lorsque l'on veut positionner la discussion et l'échange entre les acteurs au centre du processus de décision. Il existe plusieurs façons d'aborder l'argument et autant de communautés de chercheurs (e.g. *argument mapping* (Rapanta and Walton 2016), *argument mining* (Lippi and Torroni 2016)...). Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'argumentation abstraite (Dung 1995). Dans cette approche, les arguments et leurs relations sont encodés sous la forme d'un graphe dans lequel les nœuds représentent des arguments et les arcs orientés, des attaques entre arguments. Dans cette approche, dite abstraite, les notions d'argument ou d'attaque ne sont pas définies sémantiquement : c'est à chaque utilisateur de définir ce que représentent pour lui un argument et une attaque. A partir de ce formalisme, Dung a proposé différentes inférences permettant de définir le jeu des arguments acceptables et les points de conflits entre arguments. La **Figure 4.6** présente un exemple de structure argumentative. Dans cet exemple, les arguments A1 et B1 s'attaquent mutuellement, alors que l'argument A2 attaque B1 (on dit alors qu'il défend A1). Un argument attaqué et non défendu est considéré comme non acceptable ; dans l'exemple de la **Figure 4.6**, A1 et A2 sont donc les arguments acceptables.

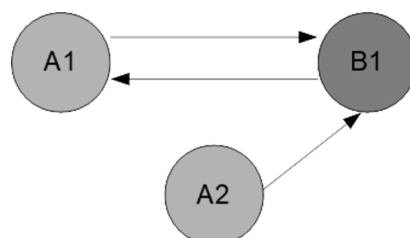


Fig 4.6. Exemple de graphe d'argumentation abstraite

Dans ses travaux, Dung pose différentes définitions et règles (appelées sémantiques) permettant de réaliser des inférences sur les graphes d'arguments. Les inférences permettent d'apporter de l'information sur le graphe en construisant des groupes d'arguments cohérents (e.g. arguments qui ne s'attaquent pas, arguments acceptables, etc.) ; ces groupes sont appelés des extensions. En utilisant les extensions, on peut donner du sens à la structure argumentative et en tirer de la connaissance (e.g. pourquoi tel argument est accepté). Evidemment, les inférences n'ont d'intérêt que lorsque le graphe devient complexe. Quand il n'est composé que de trois arguments, comme dans la **Figure 4.6**, l'interprétation directe est assez aisée. Le détail des définitions et des sémantiques (utilisées dans AIPA) peut être trouvé dans (Dung 1995).

Systèmes d'argumentation. Le modèle composé de ces concepts et de ces règles est appelé système d'argumentation abstrait par Dung. Le système d'argumentation abstrait permet (a) d'assurer la traçabilité du débat, (b) de mettre en évidence les contradictions du débat, (c) de définir les arguments acceptables et ceux qui ne le sont pas, enfin (d) d'expliquer les contradictions existantes. Il est cependant nécessaire dans un cadre décisionnel, tel que celui de la réhabilitation de bâtiment, d'être en mesure de trancher en toute situation sur de potentielles contradictions (par exemple, si deux arguments s'attaquent mutuellement). Or, le système de Dung présuppose que tous les arguments se valent, ce qui signifie que tant qu'un argument n'est pas attaqué, il est acceptable, et qu'il ne l'est plus dès lors qu'il est attaqué par un argument acceptable. Le problème de ce système est qu'il conduit souvent à des situations de blocage lors de débats réels : dès lors qu'une contradiction apparaît, aucune solution ne peut être trouvée. D'autres systèmes, dérivant de celui formulé par Dung, peuvent être utilisés pour régler ce problème. De façon non-exhaustive, on peut citer le système basé sur la théorie des jeux (Matt and Toni 2008), le *Ranked-based* (Amgoud and Ben-Naim 2013), le *Weighted-*

based (Dunne, Hunter et al. 2011) ou le *Valued-based* (Bench-Capon 2003). Je reviendrai dans la discussion en **partie 4.5** sur le choix du système d'argumentation.

Utiliser l'argumentation abstraite. Le choix de Dung et de ses héritiers de ne pas questionner la sémantique de l'argument et de l'attaque (d'où le nom d'argumentation abstraite) est tout à la fois une force et une faiblesse. Le système argumentatif peut être appliqué à n'importe quel contexte, ce qui a permis de nombreux développements mathématiques autour des graphes. Mais cela limite sa portée applicative. Il faut nécessairement définir ce que représente un argument, une attaque et les différentes extensions, d'un point de vue d'un débat argumenté, si l'on veut pouvoir s'en servir dans une situation réelle. C'est dans cette perspective que nous avons construit le modèle AIPA, qui vise à : (a) faire le pont entre le cadre de l'argumentation abstraite et l'argumentation sémantique (via un système de règles), (b) faire les inférences issues de l'argumentation abstraite afin d'évaluer l'acceptabilité des différents arguments, (c) restituer en temps réel le résultat et en expliquer la raison, aux acteurs participant à la discussion, (d) coupler ce modèle d'argumentation à la MCDA.

4.5. AIPA

Je vais présenter dans cette partie le modèle AIPA, qui assure le couplage entre MCDA et argumentation abstraite pour servir de support de décision dans le cadre d'une démarche participative. L'un des enjeux majeurs de AIPA est notamment de permettre de rendre les systèmes d'argumentation abstraite réellement opérationnels et utilisables dans une discussion en temps réel et/ou dans une démarche d'aide à la décision participative.

Modèle d'argument. La première question à laquelle doit répondre AIPA est celle de la formalisation de l'argument. Il existe plusieurs modèles d'arguments disponibles dans la littérature (e.g. (Conklin and Begeman 1988, Toulmin 2003, Hirsch, Saeedi et al. 2004)). Nous avons choisi, en nous inspirant des modèles existants, de créer notre propre modèle (Taillandier, Delhomme et al. 2017), car aucun des modèles existants n'avait été conçu pour faire le lien entre discussion en temps réel et argumentation abstraite ; la plupart d'entre eux entrent dans une logique de carte d'arguments (*argument map*). La carte d'argument vise à structurer et représenter sous forme graphique une discussion argumentée, mais elle ne permet pas de faire d'inférences. Elle a donc pour vocation à être utilisée en tant que telle et pas à être couplée avec l'argumentation abstraite. Le modèle que nous avons construit pour formaliser un argument est présenté en **Figure 4.7**.

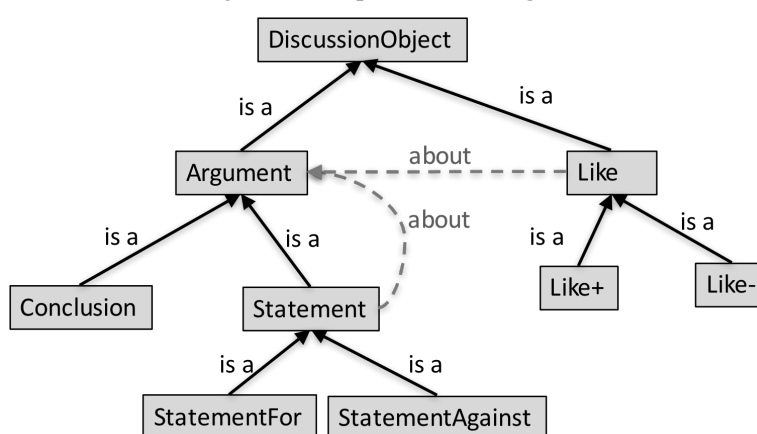


Fig 4.7. Modélisation des arguments dans AIPA

Nous utilisons deux concepts principaux, appelés *Argument* et *Like*. L'argument est identique au concept d'argument chez Dung (nœud du graphe). Dans AIPA, l'argument peut être soit une *Conclusion*, soit un *Statement* (*StatementFor* ou *StatementAgainst*). Le concept *Conclusion* est l'objectif final d'un sujet de discussion ; e.g. "La stratégie A est plus pertinente que la stratégie B". Dans AIPA, il existe dans tout débat, une conclusion appelée CNeg, qui correspond à la

complémentaire de toutes les autres conclusions formulées. La CNeg de l'exemple précédent serait : "La stratégie A n'est pas plus pertinente que la stratégie B". Il est à noter qu'elle est différente de la conclusion qui serait : "La stratégie B est plus pertinente que la stratégie A". La CNeg permet d'avoir toujours une opposition dans les conclusions ; elle place la discussion dans un cadre de décision et induit la nécessité de trouver au moins un argument pour défendre une position. Les notions de *StatementFor* (SF) et *StatementAgainst* (SA) correspondent à des propositions respectivement pour ou contre un autre argument (conclusion ou autre statement). Par exemple, "La stratégie A est moins coûteuse que la stratégie B" et "La stratégie A va dégrader le confort des occupants", sont respectivement un SF et un SA vis-à-vis de la conclusion précédente. Le concept de *Like* (décliné en *Like+* et *Like-*) traduit un soutien ou une opposition (non argumenté) pour un argument. Il permet par exemple à un acteur du débat de manifester son soutien à un argument antérieur, sans ajouter de nouvelle justification. Cela permet de formaliser le fait qu'un argument puisse être supporté par de nombreuses personnes participant au débat.

Du modèle de AIPA au modèle d'argument abstrait. Les discussions argumentées sont formalisées en utilisant le modèle d'argument préalablement présenté. AIPA se charge alors de transcrire ce modèle dans le système d'argumentation de Dung ou le *Weighted-based* (avec des poids). Le passage du modèle d'argument de AIPA au modèle d'argumentation abstrait est basé sur un ensemble de règles :

- Les conclusions sont traduites sous la forme d'arguments et s'attaquent toutes entre elles (et notamment la CNeg) ;
- Un SA est traduit directement sous la forme d'un argument attaquant l'argument ciblé ;
- Un SF est traduit comme un argument attaquant tous les SAs qui attaquent l'argument ciblé ; il est lui-même contre-attaqué par tous ces arguments ;
- Les *Likes* ne sont pas utilisés dans le système de Dung, en revanche, ils sont utilisés pour construire les poids dans le système *Weighted-based*.

AIPA permet, en passant par un système d'argumentation abstraite, de bénéficier des mécanismes d'inférence proposés par celui-ci. On peut ainsi calculer les arguments acceptables (et donc déterminer la conclusion acceptable si elle existe), mais aussi déterminer quels sont les arguments qui portent ou bloquent la décision, et expliquer, par le tracé des arguments, le cheminement ayant conduit à la conclusion.

Principe de l'utilisation. AIPA est prévu pour être utilisé dans la cadre d'une démarche d'aide à la décision participative. Il doit amener les différentes parties prenantes à formaliser conjointement le modèle d'aide à la décision qui va les guider jusqu'à la décision. Pour cela, on suivra les phases de construction du modèle décisionnel telles que présentées en **partie 4.3**. En pratique, ces différentes phases peuvent être étalées sur plusieurs réunions selon le nombre d'intervenants et la nature des débats tenus. La démarche se veut aussi itérative. Par exemple, le besoin d'ajouter un nouveau critère peut se faire sentir au cours de la Phase 3 (discussion finale), il est alors possible de revenir en Phase 1 (choix des critères). Lors de ces réunions, un facilitateur est chargé d'animer la réunion, et de saisir dans AIPA les arguments des différents intervenants. Les arguments sont formalisés selon le modèle d'argument de AIPA. Le facilitateur doit vérifier que l'argument formalisé est bien conforme à celui effectivement émis. Dès qu'un nouvel argument est formalisé, AIPA recalcule les extensions et affiche le résultat afin que celui-ci puisse être utilisé directement dans la discussion. Toutefois, AIPA doit rester un support, et non porter la décision. Un point important concerne l'interface et la représentation des résultats afin qu'ils soient facilement compris. Bien évidemment, à chaque réunion, un facilitateur accompagne l'usage de AIPA, mais l'outil ne doit pas freiner l'élan de la discussion. L'intérêt de AIPA est de mettre en avant les points de consensus et de conflit. C'est sur ces derniers que le facilitateur devrait guider le débat pour le faire avancer.

Implémentation. AIPA a été implémenté sous la forme d'une application web. De ce fait, l'outil est utilisable par tous, à tout moment et sur différentes plateformes. Cela permet également de concentrer la puissance de calcul, pour la partie raisonnement, côté serveur et de pouvoir réaliser toutes les inférences en un temps extrêmement court. AIPA a bénéficié des moteurs d'inférence développés dans le cadre du concours international d'argumentation informatique (*International Competition on Computational Models of Argumentation*) (Thimm and Villata 2017). Ces moteurs d'inférence disponibles en open-source, sont utilisés dans AIPA pour le calcul des extensions.

Application. AIPA est un modèle encore en cours de conception et d'implémentation et n'a pas encore fait l'objet d'une réelle application. Deux applications sont prévues : (a) application de l'outil d'argumentation avec des étudiants, (b) cas d'étude avec des bailleurs sociaux. La première expérimentation se concentrera sur l'utilisation d'AIPA dans un cadre purement argumentatif (sans MCDA) et sera réalisée fin 2018 avec des étudiants. Elle permettra de valider le modèle argumentatif et de voir son apport lors d'une démarche participative. La seconde sera réalisée en 2019 et combinera, comme présenté dans cette partie, argumentation et MCDA. Elle devrait se faire en conditions réelles avec des bailleurs sociaux.

4.6. Discussion autour de AIPA

Dans cette partie, je vais justifier les choix de modélisation faits pour AIPA. Je passerai en revue plusieurs éléments (paradigmes et modèle générique) qui en constituent le fondement.

Approche *a posteriori*. Comme j'ai pu le présenter dans le **Chapitre 3 partie 4.5**, il existe trois façons d'intégrer les préférences (i.e. compromis entre objectifs) en optimisation multi-objectif : approches *a priori*, *a posteriori* ou interactive. ECO2D2 (**Chapitre 3 partie 4**) et RP-MMK (**partie 3**) n'intègrent pas de compromis et proposent en résultats, le front de Pareto, laissant le décideur choisir sa solution parmi celles proposées. REMIND (**partie 2**) passe par une approche interactive pour guider le décideur vers une unique solution, même si l'interactivité n'est pas intégrée au processus d'optimisation lui-même. J'ai fait un choix différent avec AIPA, en choisissant l'approche *a posteriori* (optimisation suivie de MCDA). L'approche *a priori* propose d'agrèger les fonctions objectif en une seule et d'optimiser ensuite cette unique fonction pour obtenir une seule solution optimale. Cela exige souvent de connaître en amont les préférences des décideurs, d'être en mesure de les modéliser par une fonction mathématique et de les considérer comme stables. Cela est difficilement réalisable dans le cadre d'une démarche impliquant un groupe de décideurs variés. Les méthodes interactives proposent au décideur de guider l'optimisation pendant le déroulement de celles-ci. Cela permet au décideur de construire son jeu de préférences au fur et à mesure qu'il utilise l'outil. Cette approche est intéressante, mais complexe à mettre en œuvre dans le cadre d'une approche participative mettant l'accent sur la discussion et le débat entre les acteurs. Il n'existe pas à ma connaissance d'approche d'optimisation multi-objectif interactive dédiée à un cadre participatif. Or l'un des enjeux de REHA-PARCS est de s'inscrire dans une telle démarche. Avec l'approche *a posteriori*, on peut procéder en amont à l'optimisation pour définir le front de Pareto et choisir, ensuite, une MCDA adaptée au contexte participatif.

Intérêt du multicritère. Le choix de la MCDA peut aussi être discuté puisque certains travaux (e.g. (Atkinson, Bench-Capon et al. 2006, Tamani and Croitoru 2014)) proposent d'utiliser directement et uniquement l'approche argumentative pour résoudre des problèmes décisionnels. Ils ne peuvent cependant être efficaces que lorsque les décideurs sont en mesure d'appréhender et d'analyser l'ensemble des options possibles. Or dans le projet REHA-PARCS, les options (i.e. les solutions Pareto-optimales) peuvent être très nombreuses (plusieurs centaines, voire milliers). De plus, chacune est composée d'un ensemble d'actions unitaires, ce qui les rend difficilement appréhendables et empêche l'utilisation de l'argumentation seule. L'approche multicritère, comme j'ai pu l'exposer dans

la **partie 2.1**, présente plusieurs avantages, tels que : clarifier les domaines d'intérêt des différentes parties prenantes, formaliser clairement les compromis... C'est pourquoi nous proposons d'utiliser l'approche MCDA dans le cadre de ce travail.

Choix d'une méthode MCDA. Il existe un très grand nombre de modèles et méthodes multicritères (voir par exemple (Ishizaka and Nemery 2013) pour une description des méthodes les plus classiques). J'ai choisi dans un premier temps d'utiliser la méthode lexicographique qui est la méthode la plus élémentaire. Ce choix est justifié, car c'est une méthode : (a) largement éprouvée, (b) conceptuellement très solide, (c) valable pour tout type de valeur de performance sur les critères (ordinaire, cardinale, etc.), (d) facile à expliquer et à comprendre (point essentiel pour servir de support à la discussion), (e) facile à implémenter et (f) demandant peu de paramètres (il suffit d'ordonner les critères selon l'ordre de préférence). Ce dernier point est particulièrement intéressant par rapport à notre approche où tous les paramètres font l'objet de discussions entre les parties prenantes. Il n'est pas réaliste, dans ce cadre, de choisir une méthode demandant de nombreux paramètres, ce qui susciterait des temps de discussion extrêmement longs. Evidemment, cette méthode a des inconvénients, et notamment l'inexistence de compensation entre les critères. Une stratégie qui serait légèrement meilleure que les autres sur un critère jugé prioritaire, serait classée première, même avec des évaluations très mauvaises sur tous les autres. Nous souhaitons ainsi ajouter prochainement dans AIPA, une nouvelle méthode multicritère (non encore choisie). L'utilisateur pourrait alors sélectionner la méthode qui lui semblerait la plus pertinente en fonction du contexte décisionnel (temps disponible, nombre d'acteurs participant à la décision, etc.)

Intérêt de l'argumentation. Les méthodes multicritères proposent de formaliser le problème décisionnel comme la recherche d'un compromis entre différents critères construits à partir de la modélisation des préférences des décideurs. Ces méthodes ne peuvent être efficaces que si le problème décisionnel a été bien modélisé. J'avais souligné cette difficulté en évoquant la problématique de pondérations dans la **partie 2.1**, mais elle se pose aussi sur la définition des critères, des préférences et des contraintes (Norese 1996). Cette phase de structuration du problème est souvent complexe et peut apparaître comme opaque aux différents acteurs. Pourtant, il est essentiel d'intégrer l'expertise et les avis de l'ensemble des acteurs dans la formalisation du problème. Le couplage entre argumentation abstraite et multicritère permet de structurer la démarche de décision, de placer la discussion et l'échange au centre de la prise de décision, d'explicitier les raisons ayant conduit à la formalisation du problème et à la décision, et de garder une traçabilité sur la prise de décision. Cela rend cette approche particulièrement adaptée aux démarches participatives. Cette démarche couplant argumentation et multicritère dans un cadre participatif n'a encore jamais été utilisée à ma connaissance ; c'est donc une démarche réellement innovante.

Système d'argumentation. J'ai évoqué dans la **partie 4.4** l'existence de plusieurs systèmes d'argumentation abstrait. AIPA utilise principalement le système de Dung, et dans un second temps le système à base de poids (*weighted based*). J'ai décrit une limitation du système de Dung vis-à-vis de notre problème décisionnel dans la **partie 4.4**, à savoir ne pas savoir gérer les arguments opposés. Mais le système de Dung a aussi un avantage important : en plaçant tous les arguments (tant qu'ils ne sont pas attaqués) à un même niveau, il oblige les parties prenantes à régler elles-mêmes les situations de conflit en ajoutant de nouveaux arguments. Il pousse ainsi les acteurs à régler le problème par la discussion. Or le but d'une démarche participative est d'encourager le débat, la discussion. Dans le principe, on cherche à utiliser au maximum le système de Dung. Cependant, comme nous nous plaçons dans une optique d'aide à la décision dans laquelle une décision finale doit tout de même être prise (e.g. le choix ou non d'un critère), nous avons proposé de pouvoir basculer sur un autre système apte à comparer deux arguments opposés en leur associant un poids. C'est dans ce cadre que nous utilisons les *likes* (i.e. les soutiens) émis sur les arguments pour calculer le poids de chacun d'entre

eux et arriver ainsi à une conclusion. Dans ma vision de cette approche, il faut donc que le facilitateur encourage au maximum la discussion. Lorsqu'il y a un conflit entre arguments, il doit, grâce à l'outil, le matérialiser pour pousser les intervenants à le régler par la discussion. Et si aucun argument ne semble plus pouvoir être apporté pour résoudre le conflit, alors seulement, il peut passer au système avec des poids. Bien évidemment, un facilitateur a toujours ce rôle d'entretien et de pilotage de la discussion, que ce soit avec ou sans outil ; AIPA n'a pas vocation à modifier cet aspect. En revanche, en mettant en lumière les points de conflits et en gardant trace des discussions et des arguments, il peut apporter un support au facilitateur pour l'aider dans son rôle.

4.6. Conclusion

J'ai présenté, dans cette partie, le projet ANR REHA-PARCS, visant à aider les bailleurs sociaux à élaborer une stratégie de rénovation de leur parc immobilier. Ce problème appartient à la même famille que ceux liés à la maintenance d'un parc immobilier. Pour répondre à l'enjeu de l'aide à la décision participative, au cœur du projet REHA-PARCS, j'ai présenté AIPA, un modèle couplant MCDA et argumentation. Afin de mettre en œuvre cette approche, nous avons formalisé le couplage entre MCDA et argumentation, et développé un modèle d'argument et un ensemble de règles permettant de passer d'une discussion en temps réel à des graphes d'arguments.

Le travail sur AIPA est en cours et différents aspects du modèle et de son implémentation font présentement l'objet d'un travail : l'interface, la restitution des résultats, l'ajout d'une MCDA avec de la compensation (e.g. ELECTRE) et la gestion des poids dans l'argumentation. Le développement de AIPA pose aussi des questions sur l'utilisation de l'outil dans une réelle démarche : Quelle place pour l'outil ? Comment aider les parties prenantes sans être trop intrusif dans la discussion afin de ne pas les déposséder de la prise de décision ? Ces problèmes seront analysés dans le cadre de REHA-PARCS et de CADAU, notamment dans le cadre des applications prévues.

5. Discussion

Dans cette dernière partie, je souhaite revenir sur plusieurs éléments abordés au cours de ce chapitre et qui méritent d'être plus largement discutés et développés.

5.1. Hypothèses et choix de modélisation

Comme j'ai pu l'exprimer dans le **Chapitre 1**, les modèles sont des représentations simplifiées et incomplètes du système. Plus le système est complexe, plus il faudra faire des choix quant aux éléments à modéliser et plus il faudra poser d'hypothèses. Les trois modèles présentés dans ce chapitre n'échappent pas à ce constat, d'autant que le système de parc immobilier est particulièrement complexe. Je vais revenir dans cette partie sur deux points, l'évaluation du parc et l'indépendance des actions, qui me permettront de poser un constat plus général sur la modélisation.

Evaluation du parc immobilier. L'évaluation du parc immobilier est l'un des points clefs de la modélisation du REPMP. Dans REMIND et RP-MMK, j'ai choisi une évaluation qualitative experte des différents composants qui sont ensuite agrégés à des niveaux de description plus macros (e.g. bâtiment, zone, parc, etc.). De la même façon, les lois de dégradation sont formalisées sous la forme de règles qualitatives expertes. Le recours à une telle échelle a des avantages et des défauts. C'est un inconvénient car, elle limite la finesse d'évaluation lorsque des données sont disponibles. Par exemple, pour certains composants, ou certains matériaux, la littérature (e.g. (Cai, Zhang et al. 2017, Saito 2017, Yang, Li et al. 2017)) propose des lois de dégradation fines et bien documentées qui pourraient se montrer bien plus proches de la physique du mécanisme de dégradation. En choisissant une échelle discrète, on perd potentiellement de l'information. Dans le cadre du projet REHA-PARCS qui porte AIPA, il a été choisi de ne pas retenir d'échelle commune pour tous les critères : chaque critère est évalué sur sa propre échelle. Cela permet d'avoir, par exemple, une échelle qualitative pour

des aspects pour lesquels nous ne disposons pas de modèles physiques (e.g. qualité de l'air, acoustique, etc.) et une échelle quantitative pour les critères pouvant être évalués finement (e.g. énergie, potentiel de changement climatique). Par contre, cela oblige le gestionnaire à jongler entre plusieurs échelles, nuisant à une vision globale et homogène de son parc.

Le choix d'une évaluation qualitative simplifiée peut se justifier. Il permet d'avoir une échelle homogène pour l'ensemble des critères. Cela a aussi l'avantage de prendre en compte, en partie, les incertitudes épistémiques : au travers de la valeur d'une note, on regroupe des situations proches. Dans la très grande majorité des cas, les gestionnaires qui doivent faire face à la gestion de centaines de bâtiments, n'ont pas une connaissance très précise de chaque bâtiment et de son état ; il se peut même que les valeurs précises ne les intéressent pas. Pour la gestion de tels parcs, une information à un niveau macro peut apparaître comme la plus adaptée tant qu'elle leur permet de comprendre la nécessité d'une action. Cependant, il n'y a pas de vérité absolue sur ce point, et cela peut dépendre du type de parc immobilier et de la volonté du gestionnaire. Certains gestionnaires pourraient préférer une échelle qualitative macro et d'autres une échelle quantitative micro. Choisir une évaluation très fine n'est pas une garantie de meilleure objectivité ou de qualité : précision n'est pas exactitude. Si l'on souhaite une évaluation objective, il faut disposer de modèles ou de méthodes capables de fournir des résultats justes et fournir le niveau de certitude (ou d'incertitude) attaché à cette évaluation, et être capable de les interpréter en termes de préférences. Sans cela, une évaluation qualitative est bien plus pertinente, dans la mesure où elle assume la subjectivité de l'évaluation et son incertitude, évitant de mal (sur)interpréter une valeur précise mais non exacte. Je peux en tout cas, donner deux pistes, issues de mes travaux, permettant d'enrichir mon modèle d'évaluation : j'ai proposé dans (a) (Taillandier and Abi-Zeid 2013) une approche permettant de passer de données précises (e.g. sur les consommations énergétiques, sur les résultats d'une analyse de cycle de vie, etc.) à des évaluations qualitatives parlantes pour un gestionnaire et dans (b) (Mehdizadeh, Taillandier et al. 2012) une méthode d'évaluation couplant échelle quantitative et échelle qualitative (**Chapitre 2 partie 2.4**).

Un point commun aux trois modèles est le recours à des évaluations déterministes ne permettant pas de prendre en compte les incertitudes stochastiques (voir **Chapitre 1 partie 4.1**). Cela est notamment limitant pour les lois d'évolution, auxquelles est attachée une forte incertitude. Une piste pour répondre à cet enjeu serait d'utiliser une approche passant par les HPRMs (Baudrit, Taillandier et al. 2018) pour propager des incertitudes à partir d'attributs évalués qualitativement (**Chapitre 2 partie 4.1**). Dans la même perspective, différents auteurs utilisent, dans les problèmes de maintenance (mais pas dans le cadre du REPMP) des approches probabilistes (Go, Kim et al. 2013, Medina-Oliva, Weber et al. 2013, Memarzadeh and Pozzi 2015). Cela permet de prendre en compte les incertitudes sur l'état des composants et sur leur devenir, avec ou sans actions. Mais cela rend plus difficile l'évaluation et l'optimisation. Pour ce dernier point, cependant, la littérature propose différentes approches d'optimisation en contexte incertain qui pourraient s'appliquer au contexte du REPMP (e.g. approche floue (Bahri, Talbi et al. 2018), approche probabiliste (Tifkitsis, Mesogitis et al. 2018)...). Mais il reste à démontrer que ces probabilités ont réellement un sens (on peut questionner l'incertitude sur ces probabilités) et sont bien comprises par les gestionnaires (biais de perception des probabilités (Hersing 2017)).

Indépendance des actions. Un autre choix de modélisation est l'hypothèse faite sur l'indépendance des actions dans REMIND et RP-MMK. Dans le cadre de ces deux modèles, j'ai choisi de considérer les actions comme indépendantes, ce qui n'est pas sans conséquences, car cela réduit la possibilité d'avoir des stratégies opportunistes qui mutualisent les travaux. Or ce type de stratégie est assez courant dans la gestion de parc immobilier. Pour limiter ce défaut, dans REMIND, où la formulation des actions se fait de façon experte, c'est à l'expert de proposer des actions respectant cette indépendance, quitte à regrouper des actions. Cette approche n'est pas possible dans

RP-MMK, où nous avons choisi de passer par un jeu d'actions élémentaires. Le problème est que cela peut conduire à des plans d'actions ne correspondant pas à une réalité opérationnelle. Cette même difficulté est présente dans le cadre du projet REHA-PARCS, où elle est, peut-être, encore plus prononcée, puisque l'énergie économisée par deux actions individuelles (e.g. ventilation double flux et isolation des murs) n'est pas la somme des deux (phénomène de gain marginal) : certaines actions dépendent par exemple de la consommation effective, qui elle-même est affectée par les autres actions. Deux stratégies sont envisagées dans REHA-PARCS pour faire face à la problématique des actions dépendantes : utiliser des règles de combinaisons et des matrices d'opportunité/impossibilité. Les règles de combinaison permettraient de modifier le total de gain espéré dans un bouquet d'actions, par exemple, en diminuant le gain total par rapport à la simple somme. La matrice d'opportunité/impossibilité indique quelles actions il est opportun de combiner (e.g. rénovation du système électrique et isolation par l'intérieur) ou pas (e.g. isolation par l'intérieur et isolation par l'extérieur). Il y a plusieurs façons ensuite d'intégrer ces matrices dans le modèle d'optimisation. Cela peut se faire par un nouvel objectif (maximiser l'opportunité), par des contraintes (e.g. empêchant des actions d'être dans un même plan) ou en modifiant les fonctions objectifs (e.g. en dégradant les valeurs obtenues lorsque des actions non opportunes sont prises ensemble ou inversement). Cette même approche pourrait être utilisée dans REMIND pour le calcul de INAD et dans RP-MMK. Lorsqu'elle sera opérationnelle dans REHA-PARCS, je pourrai en mesurer l'intérêt et les limites, notamment en termes de temps de calcul pour l'optimisation.

Modélisation et complexité. La complexité des modèles pose deux problèmes majeurs : le temps de calcul et la clarté du modèle. Les approches d'optimisation sont particulièrement sensibles au temps de calcul des solutions optimales. On ne peut imaginer laisser l'algorithme tourner pendant une durée très longue (e.g. une année), comme il n'est pas souhaitable de l'arrêter trop tôt, avant qu'il n'ait eu le temps de trouver des solutions intéressantes. Il est souvent préférable de limiter la complexité du modèle pour être en mesure de trouver des solutions pertinentes dans des temps raisonnables. Dans une optique proche, le temps à prendre en compte est aussi celui de ceux qui participent à la modélisation. Il faut alors se montrer réaliste et pragmatique dans la modélisation, sans pour autant trop brider ses ambitions. L'enjeu est d'être en mesure de produire un modèle, quitte à commencer par un modèle simple et à l'affiner progressivement. Cela rejoint l'approche itérative de modélisation, que je défendais au **Chapitre 1 partie 6.1**. Le deuxième point, relatif à la clarté du modèle, lui aussi, est important. Le modèle ne sert pas uniquement à simuler et à produire des prédictions, mais il est aussi porteur de sens en soi. Dans cette perspective, le modèle doit être suffisamment clair et compréhensible pour les personnes qui vont l'utiliser. Cela est par ailleurs nécessaire pour de la validation interne (voir **Chapitre 2 partie 7.2**). Il est parfois nécessaire de limiter la finesse de modélisation pour se concentrer sur ce qui est essentiel pour l'utilisateur. Les choix d'hypothèses doivent se faire ainsi en collaboration avec les parties prenantes, tout en ayant conscience des potentielles limites techniques et opérationnelles. C'est en cela que l'approche de modélisation participative me paraît particulièrement pertinente, notamment en ce qui concerne les modèles d'aide à la décision.

5.2. Couplage de paradigmes et de modèles génériques

J'ai présenté dans les trois derniers chapitres, des modèles se focalisant sur différentes problématiques. Ces modèles s'appuyaient sur des modèles génériques qui leur donnaient une structure afin de répondre aux questions de recherche posées. Mais, il est fréquent qu'un modèle générique (voire un paradigme) unique ne puisse répondre seul aux questions posées par le système. C'est le cas des trois modèles présentés ici : REMIND couple aide à la décision multicritère interactif et optimisation mono-objectif, RP-MMK couple optimisation multi-objectif et modèle de sac à dos

multipoche, et AIPA couple aide à la décision multicritère et argumentation. Deux questions peuvent être soumises alors à discussion : *pourquoi coupler des modèles et comment le faire ?*

Chaque modèle générique, comme j'ai pu déjà l'exposer (e.g. ABM et HPRM, **Chapitre 2 partie 7.2**) dispose de ses propres avantages et inconvénients. Face à certains problèmes complexes, le champ dans lequel le modèle est efficace n'est pas suffisant, il faut alors faire appel à plusieurs modèles génériques pour venir à bout du problème. Pour revenir aux modèles de ce chapitre, AIPA, par exemple, bénéficie de la MCDA pour guider le processus de décision et hiérarchiser les options. Mais il bénéficie aussi de l'argumentation, pour enrichir le débat, faciliter les échanges en montrant les points de dissension et de consensus et pour garder trace des discussions inhérentes à la construction du modèle. A un autre niveau, AIPA est couplé avec de l'optimisation multi-objectif dans le cadre du projet REHA-PARCS. Ce couplage permet de construire les stratégies à comparer (obtenues par optimisation) sur lesquelles portera ensuite la décision (avec AIPA). Dans le même ordre d'idées, AIPA pourrait, théoriquement, être couplé aussi avec RP-MMK. Toutefois, ce couplage dépendra du contexte décisionnel, car il n'est pas toujours possible ou souhaitable de combiner des modèles génériques pour construire un modèle. Pour RP-MMK et AIPA, la combinaison pourrait fonctionner sur le cadre d'application d'AIPA (i.e. la réhabilitation de bâtiments de bailleur sociaux), mais pas dans le cadre de l'application de RP-MMK (entreprise gérant un parc immobilier). Dans le premier cas, le gestionnaire est ouvert aux démarches participatives alors que dans le deuxième, le processus de décision n'est pas en adéquation avec une telle approche. Lorsque l'on veut combiner plusieurs modèles génériques, il faut donc s'assurer que chacun d'entre eux est bien adapté au contexte dans lequel on l'applique. De plus, comme je l'ai rappelé dans **la partie 5.1**, chaque modèle (et modèle générique) est fondé sur des hypothèses. En utilisant plusieurs modèles génériques, on multiplie aussi les hypothèses faites. Il faut ainsi s'assurer que les hypothèses ne sont pas en contradiction et de leur pertinence dans le contexte donné.

Un dernier point, que je souhaitais évoquer est la difficulté de la validation. Dans le **Chapitre 2 partie 7.2**, j'ai différencié la validation interne de la validation externe. La validation externe n'est pas affectée par le couplage, mais dans les modèles complexes, elle n'est souvent pas possible, et encore moins en aide à la décision, où cette notion même de validation externe n'a pas vraiment de sens. La validation interne est souvent rendue plus complexe par la combinaison de plusieurs modèles génériques, de par la multiplication des hypothèses, des concepts, des règles. Cela va tout de même dépendre du degré d'imbrication des modèles les uns par rapport aux autres. Dans le cadre de la thèse d'Alice Micolier, nous avons établi une double échelle de classement du couplage selon le type de couplage (**Figure 4.8.a**) et le degré de couplage (**Figure 4.8.b**). Ce travail s'est focalisé sur le couplage entre ABM (Modèle Agent) et ACV (Analyse de cycle de vie, LCA en anglais), mais le principe de formalisation du couplage est valable pour tout modèle générique.




	Type of coupling	Coupling strategy
	Model integration	One unique and larger model created from the combination of models
	Hybrid analysis	Flexible combination of models which exchange data between one another
	Complementary use	Separate models used in combination, results are calculated separately

Fig 4.8.a. *Différents types de couplage entre ABM et ACV(LCA)*

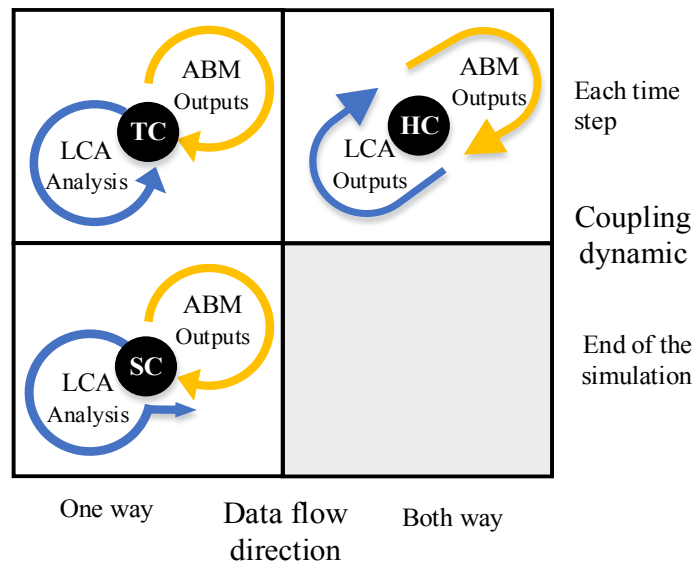


Fig 4.8.b. Différents degrés de couplage entre ABM et ACV(LCA)

Le type de couplage correspond à la manière dont les modèles génériques sont imbriqués. Nous avons défini trois types de couplage différents, en reprenant les approches de Haes, Heijungs et al. (2008) et de Marilleau (2016) : couplage intégré (*Model integration*), hybride (*Hybrid analysis*) et utilisation complémentaire (*Complementary use*). L'intégration correspond à la fusion complète des deux modèles génériques dans le modèle (e.g. Li-BIM au **Chapitre 3 partie 2**, couplant ABM et BDI). L'approche hybride correspond à deux parties de modèle bien séparées, mais échangeant dynamiquement des données, les rendant interdépendantes. L'utilisation complémentaire correspond à des modèles disjoints qui sont associés, dont les résultats sont calculés séparément mais sont associés pour apporter des éléments de réponse. Le degré de couplage caractérise le flux de données échangés entre les modèles. Nous avons défini trois degrés de couplage, en fonction de la direction et de la dynamique de l'échange du flux de données : dynamique bilatéral (*hard-coupling* - HC), dynamique unilatéral (*tight coupling* - TC) et statique (*soft coupling* - SC). Le terme *hard-coupling* renvoie à des modèles échangeant des données à chaque pas de temps (ou chaque étape) de la simulation (Marvuglia, Rege et al. 2017). Le terme *tight* renvoie à des échanges de données dynamiques unilatéraux (i.e. d'un unique modèle vers l'autre). Dans le couplage *soft*, l'échange de données n'a lieu qu'à la fin de la simulation : le résultat du premier modèle est une entrée pour le second. Pour revenir à nos modèles, (a) REMIND (Aide à la décision et optimisation) est un modèle hybride avec couplage statique, (b) RP-MMK (sac à dos et optimisation) est un modèle intégré avec couplage dynamique bilatéral, et (c) AIPA (MCDA et argumentation) est un modèle hybride avec couplage dynamique bilatéral.

5.3. De l'humain dans la décision, regard croisé sur ces trois modèles

Les trois modèles présentés dans ce chapitre correspondent à trois façons d'appréhender la décision. RP-MMK est un modèle supportant une approche d'aide à la décision assez objective (la subjectivité se plaçant juste dans l'évaluation et pas dans la décision) et automatisée (à partir du moment où les actions ont été évaluées). Il permet d'obtenir des plans d'actions particulièrement performants puisqu'il passe par une optimisation du problème dans son ensemble et nécessite peu d'intervention du décideur (uniquement pour donner ses notes souhaitées). En revanche, il doit s'accompagner ensuite d'une approche d'aide à la décision (e.g. méthode multicritère), car il se contente de construire les fronts de Pareto (ensemble des solutions optimales) sans aider le gestionnaire à choisir un plan

d'actions parmi ceux appartenant aux plans optimaux. REMIND demande une plus forte intervention du décideur, puisque celui-ci est directement sollicité pendant le choix de la solution au travers de la démarche de filtrage. Il permet de guider le décideur vers une unique solution (i.e. plan d'actions). Cet aspect est fortement subjectif, puisque le choix des filtres (ordre, type, etc.) est à l'entière responsabilité du décideur, impactant fortement le résultat. AIPA s'inscrit dans une approche d'aide à la décision participative. Il met au premier plan les discussions entre les acteurs et l'échange de leurs points de vue. En cela, AIPA est le modèle qui tout à la fois, demande le plus d'implication de la part des décideurs et qui est aussi le plus subjectif. Mais cette subjectivité est inhérente à l'acte de décider : décider, c'est faire des choix, exprimer des préférences et une opinion. Le décideur (ou le groupe de décideurs) a un mandat pour cela, du moins dans tous les cas traités dans ce manuscrit ; il existe des situations où l'on cherche à automatiser des décisions, mais je ne les ai pas traitées dans ce manuscrit. Il ne faut surtout pas que le modèle se substitue au décideur, mais qu'il l'assiste, sans lui faire perdre sa prérogative de décision (Pfeffer and Sutton 2006). Il est donc souhaitable d'intégrer la subjectivité des décideurs dans le modèle. C'est en cela que j'apprécie les approches d'aide à la décision qui permettent d'explicitier et de formaliser cette subjectivité, que ce soit au travers des critères, des objectifs ou des arguments. C'est un point très important pour de nombreux décideurs qui ont parfois l'impression que certaines méthodes d'aide à la décision ne sont pas assez transparentes (Pfeffer & Sutton, 2006). C'est notamment pour cette raison que, dans mes modèles d'aide à la décision (notamment dans REMIND et AIPA), je garde les choix apparents en les formalisant explicitement. C'est une façon de permettre une vraie traçabilité de la décision et de responsabiliser les décideurs en les plaçant véritablement au centre du processus.

La présence de subjectivité est souvent dénigrée par rapport à des approches jugées plus objectives, en particulier dans les sciences de l'ingénieur, où l'on cherche souvent à se rapprocher de la réalité physique des systèmes. Mais cela est en partie dû à une ambiguïté sémantique sur le terme de subjectivité, que je soulevais déjà dans ma thèse (Taillandier 2009). Si le terme d'objectivité renvoie à deux idées (l'indépendance vis-à-vis de l'observateur et l'exactitude et justesse de la représentation), la subjectivité ne se rapporte qu'à une seule idée, celle de la dépendance au sujet (par opposition à la première définition de l'objectivité). Le terme de subjectivité est associé, parfois et à tort, à l'opposé de la deuxième définition de l'objectivité, lui adossant, une idée de manque de justesse, de discernement ou de réalisme (Feldman 2002). Il faut remettre la subjectivité à sa juste place : elle prend juste acte de la présence du sujet (voir **Chapitre 1 partie 1**), i.e. de l'humain. Or je revendique cette présence et la positionne à tous les niveaux du modèle et de la modélisation. L'enjeu, une fois qu'elle est reconnue, est de l'intégrer pleinement dans la démarche, dans la mesure où elle peut changer la solution retenue. Ce changement est parfois normal (dépendance souhaitée au décideur) et c'est parfois un biais à considérer pour augmenter la robustesse de la décision (Hathout, Carvajal et al. 2018).

Dans la prise de décision, la subjectivité peut même être recherchée, notamment dans la démarche participative. Dans ce type d'approche, il est important d'entendre l'avis et les préférences des différentes parties prenantes. Chacun de ces avis comptent car, ils pourraient constituer un frein à la réalisation d'un projet ou d'une stratégie. En les prenant en compte dès l'amont, on peut les intégrer dans le choix ou du moins répondre aux préoccupations qui se posent, qu'elles soient ou non rationnelles et fondées. Ecarter un point de vue sur la base de sa non-objectivité peut au contraire s'avérer préjudiciable. Il est ainsi primordial d'aborder le problème décisionnel dans toute sa subjectivité dans la mesure où cette subjectivité est inhérente à la dimension humaine, tout en gardant en ligne d'horizon l'ambition d'objectivité de la science.

La construction du modèle est aussi affaire de choix, dans laquelle le modélisateur cherche à répondre à une question de recherche qui est issue de la volonté d'une personne ou d'un groupe de

personnes ; c'est forcément un acte subjectif. Cette subjectivité est celle du chercheur et des personnes participant à la modélisation, depuis l'explicitation de la question de recherche jusqu'à l'implémentation. Les trois modèles présentés sont le résultat de choix subjectifs. Bien évidemment, cela ne signifie nullement que le chercheur doit se contenter de se positionner dans un cadre purement subjectif. Il doit aussi chercher à se rapprocher du monde dans ses modèles, tendre vers de l'objectivité. Mais cela reste une ambition, qui ne sera jamais atteinte. En formalisant clairement la part de subjectivité du modèle, il tend, paradoxalement à se rapprocher du monde.

6. Conclusion

J'ai présenté, dans cette partie, différents modèles cherchant à aider un gestionnaire à construire un plan d'actions pluriannuel pour la maintenance ou la rénovation de son parc immobilier. Ces modèles (REMIND, MOMKP et AIPA) étaient tout à la fois en concurrence et complémentaires. En concurrence, car ils proposaient trois solutions pour construire ce plan, mais complémentaires car ils pouvaient se combiner pour apporter de nouvelles réponses au décideur. En proposant différentes approches, différentes façons d'aboutir à une décision, ils constituent différentes stratégies pour répondre à une même problématique. C'est donc en analysant le contexte d'application et en accord avec les différentes parties prenantes que l'on peut choisir un paradigme, une approche pour résoudre ce problème. En cela, ces modèles témoignent de la variété et de la richesse de la recherche sur l'aide à la décision. Au travers de ces modèles, j'ai pu aussi rappeler l'importance de la subjectivité que j'assume totalement dans mon approche de la recherche et qui se retrouve tout à la fois dans la modélisation, dans les modèles et dans leur utilisation.

Dans le **Chapitre 5**, qui sera le dernier, et aura pour rôle de conclure ce manuscrit, je discuterai des modèles, de la modélisation et plus globalement de mon travail de chercheur. Après trois chapitres (**Chapitre 2 à 4**), où j'ai exposé de façon plus opérationnelle comment ma vision de la recherche pouvaient s'incarner dans des modèles, je reviendrai dans ce dernier chapitre, en écho à l'introduction, à un niveau plus général. Je prendrai ainsi une nécessaire distance afin d'analyser mon parcours, ce qu'il m'a appris et d'évoquer ce qui se dessine pour la suite.

CHAPITRE 5

Discussion & Conclusion

Les modèles et le Chercheur face à la complexité

Où il sera question de :

Sensibilité, robustesse, calibration et exploration,

La façon de répondre à la problématique,

Incertitudes dans les modèles,

La fin de vie des modèles,

Ma trajectoire de chercheur,

Formalismes,

Travail en équipe,

Perspectives,

Conclure.

Chapitre 5

Discussion & Conclusion

-Les modèles et le Chercheur face à la complexité -

1. Introduction

Je me suis, dans les trois chapitres précédents, intéressé à trois systèmes : le projet de construction dans le **Chapitre 2**, le bâtiment dans le **Chapitre 3** et le parc immobilier dans le **Chapitre 4**. Dans chacun de ces chapitres, j'ai proposé des modèles propres à répondre aux enjeux spécifiques du système et à sa complexité. J'ai aussi apporté des éléments de discussion en les illustrant vis-à-vis des modèles présentés. Cette prise de recul sur les modèles me paraît nécessaire pour mieux appréhender le travail du *Chercheur*. C'est dans cette perspective que je vais poursuivre ces réflexions dans ce dernier chapitre, en revenant sur un ensemble d'éléments qui ont été évoqués dans le document sans être développés. Ces réflexions se situent à deux niveaux, celui du modèle et celui du *Chercheur*, qui feront l'objet de deux parties successives. Cela me permettra d'ouvrir vers les perspectives de ce travail qui seront exposées dans une troisième partie. Il sera alors temps de conclure ce document en replaçant le travail fait vis-à-vis de la problématique exposée dans l'**Introduction**.

2. Discutons modèle

Dans cette partie, je reviendrai sur différents aspects ayant trait aux modèles. Ces réflexions se baseront non seulement les onze modèles présentés dans les **Chapitres 2 à 4**, mais aussi sur d'autres modèles sur lesquels j'ai eu l'occasion de travailler (voir **partie 3.1**) et qui n'ont pas été développés dans ce manuscrit.

2.1. Sensibilité, robustesse, calibration et exploration

J'ai évoqué à plusieurs reprises la nécessité, après son implémentation, de conduire des analyses sur le modèle (voir notamment **Chapitre 1 partie 6**). Selon le type, la nature et les objectifs du modèle, cela peut prendre la forme d'une exploration, d'une calibration, d'une analyse de sensibilité et de robustesse, ou d'une combinaison de tout cela.

Exploration. L'exploration constitue une étape indispensable pour toutes les démarches de modélisation. Elle permet d'apprécier les limites du modèle et de son fonctionnement global. Elle consiste à faire varier les variables d'entrée (et/ou paramètres) du modèle et à analyser les conséquences sur les sorties. On peut distinguer quatre types d'exploration : (a) aléatoire, (b) ciblée, (c) répartie et (d) exhaustive. L'exploration exhaustive consiste à tester tous les jeux de variables en entrée pour en évaluer les réponses. Ce type d'exploration n'est jamais possible pour les modèles complexes en raison notamment : (a) du grand nombre de variables et de paramètres, (b) de l'interdépendance entre ces variables, (c) de la non-linéarité du modèle, (d) de la durée de chaque simulation. A défaut, il est possible d'effectuer une exploration répartie, qui consiste, à tester un ensemble de jeux de variables d'entrée, non exhaustif, mais représentatif de l'ensemble des entrées possibles. L'exploration ciblée consiste à analyser le modèle vis-à-vis de jeux de variables présentant un intérêt particulier, sans ambition d'exhaustivité. Cette approche passe par une connaissance *a priori* sur le système (mesure, expertise, etc.). Cela peut se rapprocher de la validation (**Chapitre 2 partie 7.2**), même si l'enjeu est légèrement différent. La validation a pour objectif de vérifier la qualité de prédiction du modèle alors que l'exploration ciblée ne cherche qu'à estimer la cohérence des résultats et à définir les limites du modèle. L'exploration aléatoire est généralement la première étape. Elle consiste simplement à essayer quelques jeux de variables sans stratégie particulière et à en analyser les résultats. Cela permet un premier contact avec le modèle sans avoir l'ambition de

l'explorer finement. L'exploration peut se faire séquentiellement, en commençant par une exploration aléatoire pour de premières vérifications, puis une exploration ciblée et enfin une exploration répartie pour aller plus loin.

Analyse de sensibilité. L'analyse de sensibilité d'un modèle vise à identifier les variables d'entrée les plus influentes sur les sorties du modèle et à évaluer cette influence. Cela consiste à faire varier les variables et paramètres du modèle et à analyser les variations des sorties du modèle. Comme pour l'exploration, l'analyse de sensibilité pour les modèles complexes se fera par une exploration partielle, faute de pouvoir utiliser une méthode exhaustive. L'analyse de sensibilité passe classiquement par quatre étapes : (a) l'identification des facteurs (i.e. entrées du modèle) à considérer et les variables de sortie à analyser, (b) la détermination du domaine de variation et la distribution associée à chacun des facteurs, (c) le choix de la stratégie d'exploration (voir ci-dessous la **partie Modèle du système**), (d) le calcul des indices de sensibilité des facteurs (e.g. indices de Sobol, coefficients de régression standardisé, coefficients de corrélation partiels, etc.) pour les variables de sortie. Pour ces deux derniers points (stratégie et indice), il existe de nombreuses possibilités proposées par la littérature scientifique. Comme pour la plupart des approches, l'analyse de sensibilité peut s'inscrire dans un cycle itératif : par exemple, une première analyse macro permet de juger de la sensibilité des différentes variables, plus une analyse plus fine se concentre sur les variables les plus sensibles.

Analyse de robustesse. La robustesse correspond à la capacité d'un modèle à fournir des résultats stables lors d'une variation légère des variables ou des paramètres. En aide à la décision, elle consiste à connaître les plages de variation de paramètres pour lesquelles les résultats restent inchangés (Roy 2010). On pourrait juger positivement la capacité d'un modèle à faire varier ses résultats lorsque les entrées ou les paramètres sont modifiés, même très légèrement ; cela pourrait être le signe de la capacité d'un modèle à capter les micro-signaux. Mais la plupart du temps, en raison des incertitudes pesant sur les variables et les paramètres et des hypothèses de modèle, les variations de sorties dues à des micro-variations des entrées, s'apparentent plus à du bruit et ne peuvent pas toujours être interprétées au regard du système (i.e. on ne peut pas leur donner du sens). Ce point est renforcé dès lors que le modèle est utilisé en contexte réel et opérationnel. La robustesse d'un modèle est donc une caractéristique recherchée pour la plupart des modèles complexes, et en tout cas, pour l'ensemble de mes modèles.

Calibration. La calibration consiste à identifier les valeurs des paramètres d'entrée qui permettent d'obtenir en sortie des modèles, les résultats les plus proches des observations. La calibration requiert donc des observations. J'ai évoqué dans le **Chapitre 2 partie 7.2**, les soucis posés par la validation des modèles complexes. Le problème se pose aussi pour la calibration : en raison du caractère stochastique des modèles et des incertitudes liées au système, il faudrait un grand nombre d'observations et de simulations pour réaliser une validation externe et/ou une calibration. En disposant de peu d'observations, on peut tout de même calibrer un modèle, mais en gardant un esprit critique vis-à-vis des résultats obtenus ; on pourra appeler cette calibration, une calibration mineure. La calibration peut induire un autre problème, qui est lié à la façon dont on l'utilise. Dès lors qu'un modèle repose sur de nombreux paramètres, il est toujours possible de le calibrer pour faire recoller les résultats du modèle avec les observations. Mais quel est alors le sens de ces résultats, quelle connaissance fournit le modèle ? La calibration ne devrait pas être la béquille d'un modèle, mais simplement une étape permettant d'améliorer son fonctionnement. Le modèle doit en lui-même faire sens et être suffisamment générique pour être appliqué à plusieurs cas d'études sans avoir à refaire de calibration lourde pour chacun d'entre eux.

Ces quatre analyses/processus vont s'exprimer différemment selon le type de modèle (**Table 5.1**). Je vais revenir rapidement sur la façon dont ils se déclinent selon que l'on ait un modèle du système, d'aide à la décision, de connaissances ou un jeu sérieux.

Tab 5.1. Synthèse des analyses sur les modèles complexes

Nom	Modèle de simulation du système	Modèle de connaissances	Modèle décisionnel	Jeu sérieux
Exploration	Indispensable : Exploration aléatoire, ciblée et/ou répartie selon le modèle.	Indispensable : Exploration manuelle ou automatisée (inférence).	Indispensable, mais limitée : dépend de l'implication de l'humain dans le processus.	Indispensable : Réalisation de plusieurs parties en testant différentes stratégies. Plus ou moins complète selon la possibilité d'automatiser le jeu.
Analyse de sensibilité	Recommandée : Plan d'expériences et analyses statistiques.	Optionnelle : Seulement en cas de moteur d'inférence.	Recommandée : Permet de renforcer la décision ; mais pas toujours réalisable selon l'implication de l'humain dans le processus.	Optionnelle : Uniquement pour des jeux informatisés pouvant être automatisés.
Analyse de robustesse	Intéressante : Plan d'expériences et analyses statistiques.	Optionnelle : Seulement en cas de moteur d'inférence.	Recommandée : Permet de renforcer la décision ; mais pas toujours réalisable selon l'implication de l'humain dans le processus.	Optionnelle : Uniquement pour des jeux informatisés pouvant être automatisés.
Calibration	Souvent nécessaire : Mais ne doit pas porter le modèle.	Optionnelle : Seulement en cas de moteur d'inférence.	Optionnelle : Seulement pour des démarches automatisées.	Indispensable : pour assurer le plaisir de jeu et l'apprentissage (<i>game design</i>).
Validation	Indispensable : Validation interne.	Indispensable : Validation interne des connaissances et des inférences (si possible).	Optionnelle : Seulement pour des démarches automatisées.	Indispensable : Validation interne.

Modèle de simulation du système. C'est le cadre le plus classique dans lequel sont menées ces analyses. Le champ de l'analyse de modèle est différent de celui de la modélisation : l'explorateur de modèle (i.e. la personne en charge de l'exploration, de la calibration ou des analyses de robustesse et de sensibilité) n'est pas forcément le créateur du modèle. De nombreuses approches considèrent le modèle comme une boîte noire et se font ainsi indépendamment de son fonctionnement interne. Il existe énormément d'approches, de méthodes et d'outils pour analyser le modèle. Pour les modèles complexes, cela passe généralement par un plan d'expériences et l'utilisation d'analyses statistiques. Différents outils et méthodes ont été développés dans ce sens : approches statistiques (e.g. G-ANOVA (Chakraborty and Chowdhury 2017), FAST (Tissot and Prieur 2012), etc.), approches itératives (e.g. optimisation (Mao, Fu et al. 2018), calibration bayésienne (Raillon and Ghiaus 2018), etc.) et recours à des modèles réduits (e.g. par du *machine learning* (Lamperti, Roventini et al. 2018)).

Aide à la décision. Ces problématiques s'expriment un peu différemment en aide à la décision, où l'on ne dispose pas d'observations avec lesquels comparer des résultats (pour calibrer par exemple). On peut au mieux avoir des résultats que les décideurs aimeraient trouver, ou qui leur

sembleraient logique de trouver. Mais cela ne permet pas de savoir ce que devrait être la « bonne solution ». Pour autant, il est tout de même possible, et même fortement recommandé, de conduire des analyses de sensibilité et de robustesse. Mener à bien de telles analyses requiert souvent de se confronter à deux difficultés : le temps de calcul et l'intervention du(es) décideur(s). Pour le premier point, cela est problématique notamment pour les approches d'optimisation. L'optimisation requiert de recalculer un grand nombre de fois les fonctions objectif conduisant à des temps de calcul pouvant être longs. Le deuxième point est encore plus problématique, car les analyses de sensibilité et de robustesse demandent de répéter le processus un grand nombre de fois et cela est bien évidemment impossible avec un vrai décideur. Le modélisateur peut faire une exploration aléatoire, mais cela ira rarement plus loin. Une autre approche consiste à utiliser un décideur automatisé. C'est l'approche retenue par exemple dans (Wu and Tiao 2018). Mais, on peut légitimement se poser la question de la représentativité et du sens que peuvent avoir des résultats obtenus par le recours à un tel décideur. Cette approche peut être suffisante pour des modèles avec une implication faible du décideur (e.g. RP-MMK présenté au **Chapitre 4 partie 3**), mais elle fait moins sens pour des modèles qui demandent une plus forte implication. Par exemple, l'utilisation d'AIPA (**Chapitre 4 partie 4**), qui est avant tout basée sur le dialogue ne s'y prête absolument pas. On peut construire artificiellement des graphes d'arguments, mais on perd alors tout le lien avec la sémantique. Pour ces modèles, seuls des tests et des expérimentations peuvent apporter un retour intéressant sur les résultats.

Modèle de connaissances. Les modèles de connaissances, tout comme les modèles de décision, sont difficilement analysables au travers des approches précédemment présentées. Selon le type de modèle, cette notion même d'exploration peut être discutée. Comme j'ai pu le dire dans le **Chapitre 1 partie 6.3**, les modèles de connaissances ne sont pas forcément implémentés rendant plus difficile les analyses de sensibilité/robustesse. Même lorsqu'ils le sont, ils ne proposent pas forcément de système d'inférence ou d'ambitions de simulation propres à être analysés. Pour ces modèles, on ne peut pas conduire d'analyse de sensibilité/robustesse, mais il est en revanche nécessaire d'explorer la connaissance disponible et de la valider (voir **Chapitre 1 partie 6.3**). De plus, si le modèle propose des inférences, celles-ci peuvent faire l'objet d'une exploration (e.g. tests sur un ensemble de jeux de requêtes) afin de vérifier leur bon fonctionnement.

Jeu sérieux. Les analyses/calibrations vont se présenter encore différemment pour un jeu sérieux (e.g. Domego voir **Chapitre 2 partie 6**). L'exploration peut consister en la réalisation de plusieurs parties en testant différentes stratégies. Selon le type de jeu, une exploration plus ou moins complète sera possible. Dans le cadre d'un jeu avec peu d'interactions entre les joueurs, il est possible, bien que ce ne soit pas toujours simple, d'avoir recours à un joueur automatisé (appelé intelligence artificielle dans le domaine du jeu vidéo). Mais cela requiert que le jeu soit implémenté sous un support informatique. De plus, il est difficile de simuler des interactions réalistes entre les joueurs, or c'est souvent un point qui est recherché dans les jeux sérieux. Faire une exploration d'un jeu comme Domego, qui vise à une construction de connaissances par les échanges entre les joueurs, a pour seul intérêt d'évaluer les scores maximaux (stratégie optimale) et minimaux (pire stratégie) qui pourraient être atteints dans une optique de calibration. La calibration s'exprime différemment pour les jeux sérieux : l'enjeu est de trouver un jeu de paramètres (e.g. ressources disponibles, coûts des actions possibles, etc.) permettant d'apporter aux joueurs la meilleure expérience de jeu possible ; cela intègre une préoccupation de *game design* (conception de jeu). Les paramètres de jeu vont guider l'expérience de jeu (e.g. plaisir à jouer, motivation, etc.) et par là, l'apprentissage (Girard, Ecalle et al. 2013). Ces aspects de calibration ne sont pas donc pas du tout anodins, mais ils sont souvent réglés de façon itérative et empirique, par des tests successifs. De nombreux travaux traitent du *game design* pour les jeux sérieux et donne des conseils sur leur conception ; par exemple (Deterding, Dixon et al. 2014) ou plus spécifiquement pour les jeux informatisés (Djaouti 2011).

2.2. Répondre à la question de modélisation

Les modèles ont pour enjeu de répondre à une ou plusieurs questions de modélisation. Cette réponse peut passer par plusieurs éléments, depuis la modélisation, le modèle, l'utilisation jusqu'à l'exploitation des résultats du modèle (**Figure 5.1**). Bien évidemment, la réponse peut aussi passer par la combinaison de ces moyens. Je vais revenir sur ces différentes façons de répondre à la problématique dans cette partie.

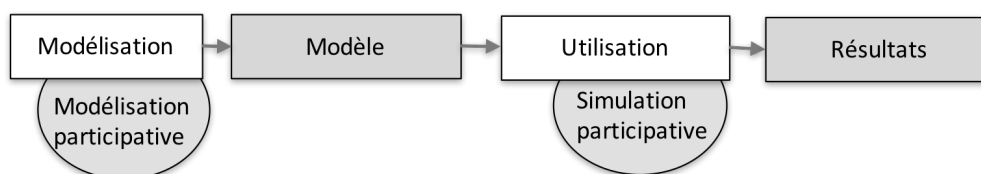


Fig 5.1. Différentes façons de répondre à la problématique via le modèle

Résultats. Les résultats du modèle sont la façon la plus classique de répondre à la problématique posée. Le terme résultat est ici utilisé pour désigner le résultat de calculs (inférence, simulation, etc.) effectués par le modèle. J'ai déjà discuté dans le **Chapitre 2 partie 7.2**, les enjeux liés à la validation des modèles et des résultats. J'ai notamment exposé la difficulté à réaliser une validation externe avec les modèles complexes. Or cette validation externe (en supposant qu'elle soit bien faite) permettrait de s'assurer de la pertinence des résultats. En son absence, les résultats produits avec le modèle devront être considérés avec un esprit critique. Ils ne sont qu'un élément sur lesquels appuyer une réflexion et non une prédiction exacte de ce qui adviendra.

Cette problématique se pose de façon encore plus forte pour les modèles d'aide à la décision. En aide à la décision, les résultats des modèles prennent plusieurs formes : solution préconisée, hiérarchisation des propositions, catégorisation, etc. Au premier plan, ils constituent une préconisation (e.g. dans REMIND présenté au **Chapitre 4 partie 2**, un plan d'actions). Cette préconisation n'a pas vocation à être la bonne solution ; le terme *bonne solution* est ici utilisé dans le sens de la solution qui se révélerait être la meilleure solution, si l'on disposait d'une connaissance parfaite du monde et de son devenir. Cette bonne solution n'est jamais connue (peu importe le modèle utilisé). Après l'occurrence effective des conséquences d'une solution, il peut parfois être possible d'en évaluer les gains et les pertes. Mais il n'est jamais possible de connaître ce qu'auraient été les conséquences des autres solutions si une autre décision avait été prise. Dans le cadre d'un jeu où tous les paramètres sont parfaitement contrôlés, il serait peut-être possible de le faire, pour autant que le jeu ne soit pas trop complexe. Mais dans les systèmes qui nous intéressent (i.e. systèmes complexes), cette connaissance ne nous est pas accessible. Une alternative parfois envisageable est le recours à des simulations synthétiques (Alwash, Breyse et al. 2015), i.e. une simulation du monde dans laquelle l'ensemble des paramètres est connu. Mais cette approche requiert d'être capable de pouvoir simuler de façon crédible le monde, ce qui est extrêmement difficile.

Il y a ainsi une distinction entre *la bonne solution* (meilleure solution en toute connaissance du monde) et *la bonne décision* (meilleur choix en disposant des connaissances du décideur au moment du choix). Cela est important car l'humain est prompt à la critique sitôt qu'un choix ne semble pas donner les effets positifs escomptés ou qu'une alternative à la solution choisie semble, *a posteriori*, plus désirable. De nombreux travaux en psychologie ont démontré que les biais cognitifs amenaient souvent à méjuger la qualité d'une décision et à mal estimer la désirabilité d'une solution (Gilbert 2006). L'aide à la décision, ne peut, dans le meilleur des cas, que guider vers la solution représentant le meilleur choix à l'aune des connaissances alors disponibles et des préférences du(es) décideur(s). On ne peut reprocher à un/des décideur(s) un choix qui a été fait alors qu'une connaissance n'était pas disponible. Par exemple, si de nombreux experts s'accordent pour dire qu'une inondation, dans une

ville donnée, a une probabilité d'occurrence presque nulle, la bonne décision pourrait être de ne pas construire d'ouvrage de protection supplémentaire. Si malgré tout, l'inondation se produit, la bonne solution apparaîtra rétrospectivement comme la construction de ces ouvrages de protection. Donc, et cela est valable pour tout modèle, qui n'est, je le rappelle, qu'une représentation tronquée du système, il est indispensable de garder un juste recul dans l'analyse des résultats.

Utilisation. Le résultat est l'accès prioritaire à une réponse à la problématique. Mais la réponse peut parfois être apportée par l'utilisation du modèle, quel que soit le résultat que lui-même fournit. C'est le cas des modèles de *simulation participative*, dans lequel l'utilisateur est amené à intervenir pendant la simulation (e.g. choix d'actions à réaliser, modification d'un paramètre, etc.) (Becu, Amalric et al. 2017). Les jeux sérieux basés sur des logiques de simulation (e.g. SPRITE (Taillandier and Adam 2018), SHADOC (Bousquet, Barreteau et al. 2002)) entrent dans cette logique. La simulation participative permet d'impliquer davantage l'utilisateur. Cela peut lui permettre de comprendre des mécanismes, des phénomènes ou d'apprendre des connaissances selon une approche constructiviste, en lui donnant un rôle actif dans l'acquisition du savoir. Cela peut être aussi l'occasion, notamment dans les jeux de rôle informatisés, d'échanges de points de vue entre les différents participants, permettant à chacun d'enrichir sa vision du système. Ce même constat peut être aussi appliqué aux jeux sérieux, qu'ils soient ou non informatisés. Par exemple, dans Domego (**Chapitre 2 partie 6**), l'acquisition de connaissances par les étudiants passe avant tout par le déroulement du jeu et leur participation active. Le résultat du jeu (i.e. score fait par les joueurs et résultat du projet simulé) est vecteur de motivation pour les joueurs, mais n'a pas pour objet de répondre directement à la problématique du modèle. Les jeux sérieux sont donc un type de modèle dans lequel l'utilisation a plus d'importance que le résultat. Même sans avoir recours à de la simulation participative, la simulation, en soi, peut être source de compréhension et ainsi répondre à des problématiques en dehors des résultats. Par exemple, cela peut permettre de comprendre des mécanismes ou des phénomènes. C'est par exemple l'une des qualités des modèles Agent, où la modélisation et la simulation suivent un processus naturel, proche de la compréhension du monde par l'humain. Ainsi, dans le modèle SMACC2 (**Chapitre 2 partie 6**), l'utilisateur peut suivre le déroulement de la simulation (i.e. suivi jour après jour du déroulement du projet de construction) et par exemple comprendre comment un aléa en début de projet (e.g. manque d'analyse de sol) peut avoir des répercussions dans une phase ultérieure (e.g. durant le chantier) et comment les acteurs peuvent réagir à cet événement.

Pour les modèles d'aide à la décision, il est courant que l'utilisation du modèle permette, au moins en partie, de répondre à la problématique. Cela dépend beaucoup de la problématique, du contexte décisionnel et du paradigme choisi pour le modèle. Un paradigme très automatisé comme une optimisation multi-objectif (e.g. ECO2D2, **Chapitre 3 partie 4**) va avant tout chercher à répondre à la problématique au travers de ses résultats. Mais un modèle laissant plus de place à l'interaction avec l'humain et à la réflexion personnelle (e.g. AIPA **Chapitre 4 partie 4**), va apporter plus de réponses par son utilisation que par le résultat final. Parfois le résultat est presque secondaire. Par exemple dans ARD-Fourmi (**Chapitre 3 partie 3**), les différentes expérimentations ont montré que l'utilisation de l'outil et les questions suscitées contribuaient plus au choix final que la solution (i.e. bouquet de travaux) proposée par l'outil. Celle-ci permettait évidemment d'enrichir la réflexion du propriétaire, mais cela ne constituait qu'un pan de cette réflexion.

Modèle. Le modèle est une composition et une formalisation de connaissances. A travers lui, il est déjà possible de comprendre des choses, des mécanismes et ainsi de répondre à une problématique, sans même aller jusqu'à son utilisation. Certains modèles génériques, parmi les modèles de connaissances, sont spécifiquement dédiés à cette approche. C'est par exemple le cas du livre de connaissances (Suciu, Jmal et al. 2014). Un livre de connaissances est un ensemble de contenu textuel

et de figures reliées par des liens hypertextuels. Il permet d'organiser la connaissance et de faciliter son exploitation au travers d'une interface dynamique. Il est composé de quatre types d'éléments (Jmal, Michaud et al. 2011) : une page de garde, des cartes conceptuelles (CMAP), des fiches de connaissances et des simulateurs. La page de garde est le point d'entrée du livre, elle en constitue en quelque sorte son sommaire. Les CMAPs constituent le squelette du livre ainsi que le fil permettant de naviguer d'un concept à l'autre ; elles sont une représentation sous la forme d'un graphe sémantique, de concepts qui guident l'utilisateur. Elles répondent à une structure commune, appelée CMAP canonique, afin d'éviter la désorientation cognitive (Jmal, Michaud et al. 2011). La **Figure 5.2** présente la structure classique de la CMAP canonique qui peut toutefois être adaptée à un contexte spécifique si nécessaire.

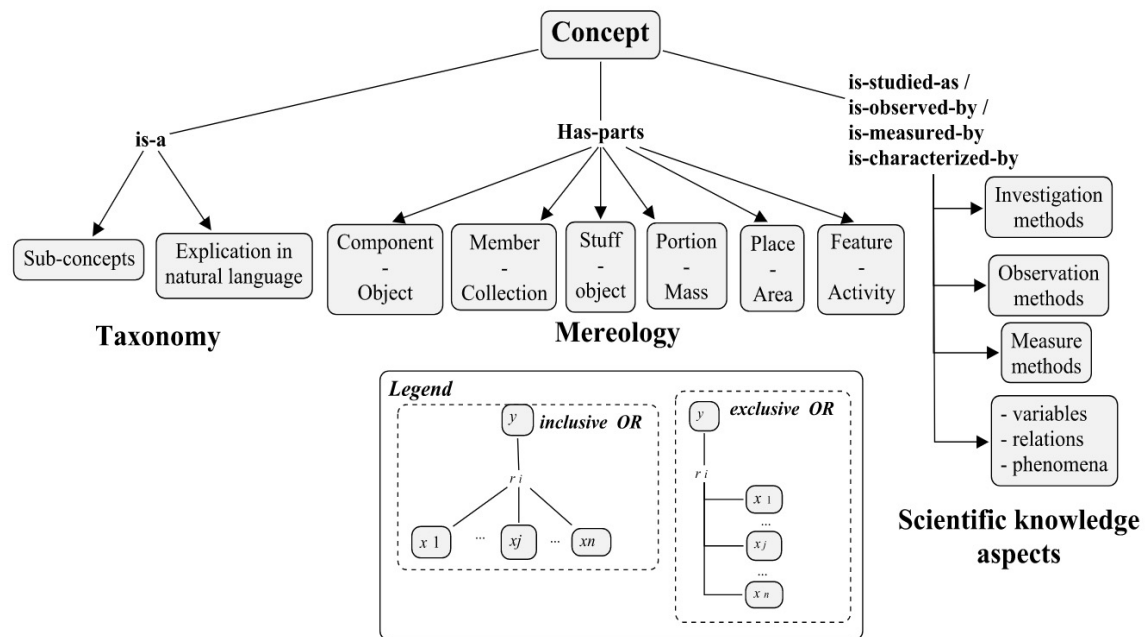


Fig 5.2. CMAP canonique (Jmal, Michaud et al. 2011)

Dans le cadre de mon travail, le livre de connaissances a été utilisé pour formaliser la connaissance dans le cadre du projet OPTIMAL (voir la description du projet en **Annexe C**). Ce modèle est spécifiquement conçu pour permettre à des utilisateurs de naviguer et ainsi de profiter de la connaissance induite par le modèle. Même dans les modèles ayant un autre enjeu (e.g. un modèle de simulation, un jeu sérieux, etc.), l'étude du modèle peut être riche d'enseignements. Par exemple, le modèle CP-HPRM (voir **Chapitre 2 partie 4**), permet de simuler les projets de construction. Mais de par sa structure et sa base de connaissances, il peut être utilisé, sans même faire d'inférences, pour apprendre et comprendre des informations sur les projets de construction (e.g. les différents acteurs, les différentes phases, les ressources impliquées, etc.).

Modélisation. Le modèle est souvent vu comme le moyen de répondre à la question de modélisation, par lui-même ou au travers des résultats qu'il peut fournir. Il est donc soit une finalité, soit un objet transitoire. Cependant, l'acte même de modéliser, peut permettre de répondre à des questions, à une problématique. La création du modèle passe par l'acquisition de connaissances auprès de différentes sources qui sont ensuite formalisées dans le cadre conceptuel du modèle (voir **Chapitre 1 partie 6.2**). Cette démarche est génératrice de compréhension. Ainsi, en impliquant l'utilisateur final dans la construction du modèle, on peut le faire profiter de cet apport. On appelle *modélisation participative* la démarche consistant à faire participer l'utilisateur final à la construction du modèle. L'intérêt est multiple, puisque cela permet : (a) de faire comprendre et apprendre des connaissances liées au modèle et au système, (b) de s'assurer que le modèle correspond bien à la

vision de l'utilisateur final, à ses attentes et à ses besoins, (c) d'améliorer la traçabilité de la construction du modèle et (d) d'améliorer la durabilité du modèle en facilitant sa réutilisation au-delà du cadre de l'action de recherche. Le collectif ComMod a formalisé la démarche de modélisation participative et a posé les règles de ce qu'elle devrait être (Etienne 2010). Cette démarche est valable pour tout type de modèle, mais les modèles Agent y sont bien adaptés (e.g. (Naivinit, Le Page et al. 2010, Joffre, Bosma et al. 2015)). Ils possèdent en effet une structure explicite et assez naturelle (i.e. proche de la façon dont l'humain se représente le monde) qui permet de passer facilement de connaissances parcellaires (propres à chaque partie prenante) à un ensemble cohérent de connaissances.

La modélisation participative peut prendre d'autres formes que celle d'un modèle implémenté informatiquement. Par exemple, Domego, en plus de constituer un jeu sérieux permettant à un groupe d'étudiants d'acquérir des connaissances sur les projets de construction, possède un deuxième mode d'apprentissage. Ce mode consiste à faire construire par des apprenants (e.g. étudiants) un nouveau scénario de jeu (**Chapitre 2 partie 7.4**). Cela peut se voir comme un acte de modélisation, qui vise aussi à répondre à la problématique posée par le modèle (i.e. faire apprendre des notions à des étudiants). Ce qui est intéressant dans cet exemple est que la problématique était identique pour la modélisation et pour le modèle : faire apprendre à des étudiants de niveau licence des connaissances. En revanche, ces deux modes d'apprentissage varient dans l'approche et dans l'implication qu'ils demandent : la construction d'un nouveau scénario est beaucoup plus longue et demande une recherche et un effort plus poussé que de simplement jouer au jeu. L'utilisation du modèle, c'est-à-dire, la finalité du modèle est indispensable pour assurer la motivation des modélisateurs. Les étudiants modélisateurs se seraient sûrement beaucoup moins impliqués s'ils avaient pensé que leur travail ne serait pas utilisé.

On peut retrouver le même genre d'enjeu dans ARD-Fourmi, modèle visant à aider des propriétaires à choisir des travaux de rénovation énergétique de leur maison. Là aussi, des utilisateurs finaux (i.e. propriétaires) ont participé à la construction de l'outil. Cela les a guidés dans leurs propres choix de travaux et leur a permis d'enrichir leurs propres connaissances sur la thermique des bâtiments et sur la rénovation énergétique. Ces propriétaires, les plus impliqués, sont aussi ceux qui ont le plus appris et le plus pris de recul vis-à-vis des travaux de rénovation. Ils constituent aujourd'hui les pierres angulaires de l'association *Des fourmis dans le compteur*, pouvant dès lors partager leurs connaissances et leurs expériences au sein de l'association, contribuant à une diffusion plus large d'une culture pro-environnementale.

2.3. Incertitudes dans les modèles

J'ai exposé dans le **Chapitre 1 partie 4**, la nécessité de la prise en compte des incertitudes dans les modèles. Les incertitudes sont en effet une composante fondamentale de la complexité, qu'elle soit gnoséologique, systémique ou décisionnelle. J'ai donc cherché à formaliser, dans mes différents modèles, ces incertitudes, qui peuvent se positionner tout autant sur les données, sur les paramètres et sur le modèle lui-même, induisant de l'incertitude sur les résultats.

La première approche de l'incertain que j'ai utilisée est le recours à des évaluations et des raisonnements qualitatifs. Comme j'ai pu l'exprimer dans la **partie 5.1 du Chapitre 4**, en ayant recours à une approche qualitative, on prend acte du flou, du manque de précision ; i.e. on intègre dans le modèle une part d'incertitudes épistémiques. Par exemple, les modèles REMIND et RP-MMK (**Chapitre 4 parties 2 et 3**) reposaient sur une évaluation qualitative des performances du parc immobilier, permettant d'éviter une mauvaise interprétation des données ; les évaluations qualitatives offrent moins de précision, mais peuvent renforcer l'exactitude, notamment pour les systèmes complexes. Si les approches qualitatives se montrent souvent intéressantes, elles limitent en revanche

les opérations pouvant être réalisées avec les variables, et notamment le recours à des équations mathématiques. Cependant, de nombreux modèles génériques et outils visant à manipuler les variables qualitatives (e.g. algèbre qualitative (Kansou 2010), raisonnement qualitatif sous contraintes (Jonsson 2018), etc.) sont tout de même proposés dans la littérature scientifique. Plus classiquement, les incertitudes épistémiques sont généralement formalisées via différents paradigmes (Sallak, Aguirre et al. 2013) : logique floue, fonctions de croyance, théorie des possibilités, etc. Je n'ai pas eu l'occasion d'utiliser ces paradigmes dans mes travaux. Cependant, ils sont particulièrement intéressants et pourraient s'intégrer dans certains de mes modèles (e.g. dans ECO2D2 pour prendre en compte les incertitudes sur les traitements des déchets de déconstruction).

Une autre approche de l'incertain dont ont largement bénéficié mes travaux est le recours aux probabilités. Cela s'est traduit de différentes façons dans mes modèles. En premier lieu, les différents modèles de simulation du système que j'ai proposés avaient recours à des variables ou des processus intégrant une part d'aléatoire. Cela permet de formaliser la variabilité naturelle du monde (incertitudes stochastiques). Par exemple dans le modèle Li-BIM (**Chapitre 3 partie 2**), les différents comportements de l'occupant sont teintés d'incertitudes ; e.g. l'action *Dormir* permet à l'occupant de gagner en forme de façon plus ou moins importante, traduisant la variation sur la qualité du sommeil. Evidemment, le recours au stochastique est aussi très important dans SMACC ; il en est même au cœur (N.B. le premier S du nom du modèle renvoie à *Stochastic*). Durant la simulation, à chaque pas de temps, le modèle fait un tirage pour définir si un événement risqué (RE) se produit, à partir de sa probabilité d'occurrence (qui est elle-même affectée par les facteurs de risque –RF–). Dans ces modèles, la formalisation des incertitudes au travers de probabilités est souvent couplée à une approche de type *Monte Carlo* : on effectue un grand nombre de fois la même expérience pour analyser la gamme de résultats possibles et leurs distributions

Les incertitudes stochastiques sont aussi considérées en utilisant un formalisme probabiliste dans le modèle CP-HPRM (**Chapitre 2 partie 4**). Les variables sont qualifiées par des distributions de probabilités qui sont remises à jour, en fonction des informations disponibles, par le recours aux inférences bayésiennes. Par ailleurs, CP-HPRM utilise aussi une évaluation qualitative des différents attributs des concepts. La formalisation des incertitudes est donc, là encore, au centre du modèle.

Pour les modèles de décision, j'ai aussi souvent utilisé des approches probabilistes. Par exemple, dans ARD-Fourmi (**Chapitre 3 partie 3**), j'ai utilisé ELECTRE III stochastique couplant la méthode multicritère avec des simulations Monte Carlo (Taillandier and Taillandier 2012). Ce modèle générique permet de prendre en compte les incertitudes sur les données d'entrées (e.g. évaluation énergétique des stratégies de rénovation) et sur les paramètres du modèle (e.g. poids, seuils, etc.) assurant une meilleure robustesse des résultats (voir **partie 2.1**). J'ai aussi participé au développement de deux autres modèles qui n'ont pas été présentés dans ce document et qui traitent plus spécifiquement des incertitudes dans une problématique d'aide à la décision : SORIA (Taillandier and Breyse 2016) et AGORA (Bennabi, Elachachi et al. 2014). SORIA (*SOil Risk Analysis for urban planning project*) a été développée dans le projet ANR-D2SOU. Il vise à mieux prendre en compte les incertitudes liées au sol et sous-sol dans les premières phases des projets d'aménagement urbain. SORIA est un modèle d'analyse des risques permettant d'optimiser l'emploi de méthodes et d'outils d'investigation du sol et du sous-sol. Il utilise une approche couplant utilité multi-attribut (MAUT), loi de Bayes, simulation Monte Carlo et une base de connaissances sur les risques liés au sol. Ce modèle d'aide à la décision permet de prendre en compte l'aversion au risque du décideur et les incertitudes tant épistémiques que stochastiques. AGORA est un modèle d'aide à la décision multicritère (MCDA) qui vise à comparer différentes stratégies de gestion d'un réseau d'assainissement en tenant compte des incertitudes. Le modèle couple la méthode multicritère AHP (Saaty 2005) avec une évaluation probabiliste de l'état du réseau, basée sur l'analyse des

correspondances discriminante (Abdi 2007), et des simulations Monte Carlo. L'une des forces du modèle est de permettre une formalisation de la variation des incertitudes dans le temps en fonction du budget alloué à l'inspection et du vieillissement du réseau.

La plupart de mes modèles prennent donc en compte explicitement les incertitudes (stochastiques et épistémiques), même s'il reste de nombreuses voies d'amélioration quant à ce point que ce soit au niveau des formalismes utilisés (e.g. utilisation des probabilités imprécises, des fonctions de croyance, etc.) ou de la modélisation (e.g. prise en compte des incertitudes dans une démarche de modélisation participative). En plus du travail sur le modèle, il y a une autre façon d'analyser les incertitudes : le recours aux analyses de sensibilité et de robustesse. J'ai déjà évoqué tout leur intérêt dans la **partie 2.1**. Dans un contexte d'incertitudes, le rôle de ces analyses est encore plus important.

Finalement, pour conclure sur les incertitudes dans les modèles, je voulais apporter un nouvel éclairage à cet enjeu. Dans tous les cas précédemment exposés, la formalisation des incertitudes dans les modèles, qu'elles soient épistémiques ou stochastiques, étaient rendue nécessaire pour rendre compte de notre maîtrise et de notre connaissance imparfaite du monde. Cependant l'utilisation de valeurs *randomisées* ou de règles contenant de l'incertitude peut aussi être recherchée pour améliorer le fonctionnement du modèle en soi, indépendamment du système monde. Je citerai deux exemples : les métaheuristiques d'optimisation et les jeux sérieux.

Dans les métaheuristiques d'optimisation, il y a un certain nombre de paramètres et de variables qui sont tirés aléatoirement lors du processus d'optimisation. C'est généralement le cas de la population initiale (i.e. jeu initiale de solutions que l'on cherchera à améliorer à chaque génération/déplacement). Mais cela est aussi le cas de différentes actions/mécanismes dans le déroulement de l'optimisation. Par exemple, cela peut être la mutation dans les algorithmes génétiques ou le déplacement dans PSO (voir **Chapitre 4 partie 3.2**). Pour rappel les métaheuristiques sont des stratégies d'exploration de l'espace des solutions cherchant à optimiser des objectifs. L'exploration ne pouvant couvrir l'ensemble de l'espace des solutions, la partie aléatoire dans le processus permet de donner de la flexibilité à la recherche et de la variabilité aux solutions trouvées. Pour le deuxième exemple, les jeux sérieux, l'incertitude sert à deux choses : mieux rendre compte de la réalité du monde dont on ne maîtrise pas tout et améliorer l'expérience de jeu (*game design*). L'aléatoire dans les jeux permet souvent de rendre celui-ci plus agréable à jouer en créant une variabilité et une nécessité pour le joueur de s'adapter aux situations dont il ne maîtrise pas tout, et en induisant différentes émotions positives comme négatives (Ferréol 2015). Bien évidemment, il s'agit ensuite d'une question de dosage entre la part d'aléatoire et la part de maîtrise du jeu (nécessaire pour le plaisir de jeu et pour l'apprentissage) ; ce compromis est un élément important du *game design*. Dans Domego (**Chapitre 1 partie 6**), l'aléatoire provient du tirage des cartes *Risque*, induisant des conséquences souvent négatives (mais parfois neutres, voire positives) pour le projet. De nombreuses parties test ont ainsi eu, entre autres, pour objet la calibration de la part de hasard dans le jeu au travers de la définition des cartes *Risque*. Ce qui est intéressant pour ces deux exemples (métaheuristique et jeux sérieux), c'est que cela nous amène en tant que modélisateur à repenser la place des incertitudes dans le modèle, qui n'est plus simplement un élément de complexité à intégrer, mais aussi une façon d'améliorer le fonctionnement du modèle.

2.4. Fin de vie des modèles

J'ai abordé dans le **Chapitre 3 partie 7.3**, la problématique du devenir post-projet de la production de la recherche. Lorsque le chercheur quitte le terrain d'étude ou achève un projet, il est courant de voir les outils et modèles développés et les démarches proposées abandonnés, limitant leurs impacts sur le monde. Mais le devenir des modèles est plus complexe que cela, et s'inscrit dans une trajectoire à mettre en parallèle avec la démarche de développement de modèle (**Chapitre 1 partie 6**). Aucun

modèle n'est amené à être éternel ; ils s'inscrivent tous dans une durée. On peut ainsi tracer le cycle de vie d'un modèle (**Figure 5.3**).

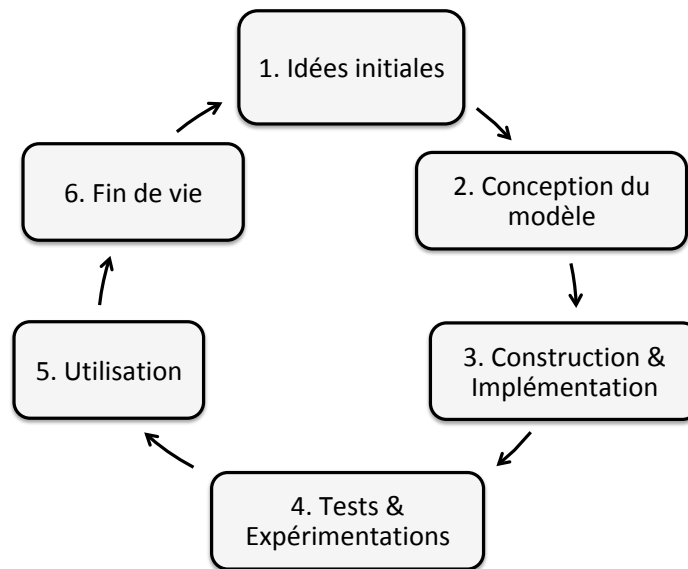


Fig 5.3. Cycle de vie d'un modèle

Tous les modèles finissent par être abandonnés, délaissés ou remplacés. La fin de vie des modèles inclut différents devenir : (a) évolution, (b) réutilisation, (b) recyclage (total ou partiel), mise en stockage, mise au rebut. L'évolution traduit la possibilité pour un modèle de connaître une nouvelle version. Cette version est à différencier toutefois des itérations réalisées durant la phase de modélisation. D'une part, elle est réalisée dans un temps ultérieur, après que le modèle ait été finalisé et utilisé. D'autre part, elle suppose une évolution très importante avec des refontes des concepts de base, permettant de considérer qu'il s'agit d'un nouveau modèle (e.g. SMACC1 et SMACC2 présentés dans le **Chapitre 2 partie 5**). La réutilisation consiste à reprendre, sans le modifier, tout ou une partie du modèle, pour l'intégrer dans un autre modèle. Dans le cas d'une réutilisation totale, on peut légitimement considérer cela plus comme la continuité de la vie du modèle au travers d'un usage couplée (voir **Chapitre 4 partie 5.2**). En revanche si seule une partie du modèle est réutilisée, on peut considérer que le modèle original n'est plus. Le recyclage consiste à réutiliser une partie, voire la totalité du modèle, tout en la modifiant pour l'adapter aux nouveaux besoins. Par rapport au cas précédent, il y a dans le recyclage, l'idée de transformation avant réutilisation. La mise en stockage consiste à ne rien faire du modèle en attendant qu'il connaisse potentiellement une évolution, une réutilisation ou un recyclage. La mise au rebut consiste en l'abandon pur et simple du modèle.

Il y a trois constats importants à poser, relativisant cette notion de fin de vie des modèles. Tout d'abord, puisque le modèle n'est pas un objet physique, il pourrait être considéré comme en stockage, n'atteignant jamais le stade de rebut. Mais, il arrive qu'un modèle soit considéré comme trop désuet pour avoir encore, en soi, un quelconque intérêt (du moins en l'état, mais il pourrait être recyclé). Cependant, parfois, il arrive que des modèles délaissés connaissent une seconde vie, mais cela reste rare, d'autant plus que dans le contexte actuel, le nombre de modèles produits croît exponentiellement. D'autre part, à partir du moment où un modèle a été publié (article, site de dépôt de modèle, etc.), d'autres chercheurs peuvent le reprendre et le faire vivre. Cela peut rendre difficile le suivi des modèles, sauf si ceux-ci sont convenablement (et ce qui devrait être fait) référencés dans les nouvelles publications où le modèle est réutilisé/recyclé. Malgré tout, il peut tout de même arriver que plus personne ne juge le modèle satisfaisant et qu'il soit alors collectivement abandonné. Un dernier point important : le modèle peut bien évidemment être recyclé ou réutilisé, avant sa fin de vie. Il peut connaître aussi plusieurs évolutions en parallèles.

A titre d'illustration, la **Table 5.2** présente les modèles auxquels j'ai participé et qui ont achevé leur vie, du moins à ma connaissance. Les principales références relatives à ces modèles sont disponibles dans la **Table 5.3**. Trois de ces modèles ont connu une évolution : SMACC1 faisant place à SMACC2, et bientôt SMACC3 (voir **partie 4.2**), et G-RISQ devenu REMIND. Pour ces deux modèles, l'évolution s'est faite après analyse leurs faiblesses et par l'apport de nouveaux outils, de nouvelles connaissances ou de nouveaux modèles génériques. Ainsi, par exemple, REMIND a bénéficié, par rapport à G-RISQ, de l'utilisation d'une métaheuristique d'optimisation (recherche taboue réactive). SMACC2 a profité de la structuration de la connaissance développée dans MMRMP et T-RBS (justifiant leur statut de modèle recyclé).

Tab 5.2. Modèles développés ayant atteint leur fin de vie

Nom	Sujet	Création (modèle opérationnel)	Fin de vie	Devenir
SMACC1	Simulation des projets de construction	2014	2015	Evolution
SMACC2	Simulation des projets de construction	2016	2018	Evolution
G-RISQ	Aide à la conception d'un plan de maintenance pour un parc immobilier	2009	2010	Evolution
T-RBS	Analyse des risques liés aux projets de construction	2011	2012	Recyclage partiel
MMRMP	Simulation des projets de construction	2013	2014	Recyclage partiel
AGORA	Aide à la maintenance d'un réseau d'infrastructures hydrauliques (eau potable)	2014	2016	Stockage
TWH	Aide à la décision pour la valorisation de bois tropicaux	2014	2017	Stockage
SORIA	Aide à la décision pour l'analyse des sols dans les projets d'aménagement	2014	2015	Stockage
Th-SYADE	Aide à la décision pour la rénovation thermique d'une maison	2013	2015	Rebus
WooHou	Aide à la décision pour le choix d'une solution structurale pour une maison en bois	2013	2016	Rebus

Th-SYADE et WooHou sont deux modèles d'aide à la décision construits sur des bases classiques (respectivement système expert basé sur un arbre de décision et MCDA), mais ne répondant plus à ma vision de cette démarche. Ils ont été réalisés sans une implication forte des utilisateurs finaux (WooHou) ou sur des aspects uniquement techniques (Th-SYADE). Malgré tout, en contribuant à formaliser des connaissances sur leur sujet respectif et en participant à la réflexion scientifique, ils représentent tout de même une contribution non négligeable. En cela, tout modèle, même mis au rebut, n'est pas inutile ; il participe à l'avancée scientifique.

SORIA, TWH et AGORA sont trois modèles construits dans le cadre de projets ou de thèses. Ils proposent des aspects intéressants (développements méthodologiques, formalisation de connaissances...), mais ils portent sur des systèmes sur lesquels que je n'ai plus eu l'occasion de travailler après la fin des projets. Ils sont donc présentement en stockage, attendant peut-être de connaître une évolution ou un recyclage. SORIA et AGORA, qui proposent des approches particulièrement intéressantes de la décision en contexte incertain, pourraient être recyclés dans le cadre du projet proposé pour l'IRSTEA (voir **partie 4.3**).

L'analyse de ces modèles se heurte à une limite : aucun n'a dépassé les 3 ans (durée d'un projet ou d'une thèse). Or certains modèles parcourent le temps et possède une riche histoire. Par exemple, le modèle d'endommagement de Mazars (Mazars 1984), créé au début des années 80, a connu de

multiples évolutions (analytiques et numériques) dans les années 80-90, le passage dans des codes (quasi-)commerciaux, et il connaît différentes évolutions encore aujourd'hui. La durée de vie des modèles est aussi fortement impactée par le type de modèle (généricité, formalisme utilisé, domaine d'application, facilité d'implémentation, etc.). Etudier la fin de vie des modèles pourrait ouvrir de nombreuses perspectives de réflexions, qui nécessiteraient une analyse dépassant largement le cadre de mes propres modèles.

3. Le *Chercheur*

Dans cette deuxième partie de la discussion, je reviendrai sur différents aspects en rapport avec la position du *Chercheur*, et notamment, je discuterai de ma façon d'aborder la recherche.

3.1. Une trajectoire

Dans le **Chapitre 2 partie 7.1**, je faisais le point sur l'évolution de mes modèles portant sur la gestion des risques dans les projets de construction. Cette même analyse peut être étendue à tous les systèmes, témoignant de l'évolution de mon travail de chercheur. Je traiterai ainsi, dans cette partie, des points suivants : (a) la problématique, (b) le système, (c) l'implication de l'humain, (d) les modèles génériques et (e) l'holisme. La **Table 5.3** présente les différents modèles au développement desquels j'ai contribué. Il est à noter que certains modèles ne possédaient pas de nom explicite ; j'en ai ajouté pour faciliter leur référencement dans le texte. C'est sur la base de ces modèles que je vais pouvoir discuter ma trajectoire de recherche, ce qui me permettra de tirer différents enseignements.

Systèmes abordés. Un premier fait notable dans ma trajectoire de recherche est la diversification des systèmes abordés. Assez naturellement, avec la multiplication des opportunités, des sollicitations et des collaborations (voir **partie 3.3**), les systèmes abordés dans mon travail se sont multipliés. J'en ai retenu trois dans ce manuscrit, mais j'en ai abordé bien d'autres. Dans l'**Introduction**, la **Figure I.2** illustre cette variété. Avec la diversification des modèles, s'est posée de façon accrue la question de la délimitation du domaine du génie civil. Ma formation initiale d'ingénieur en génie civil (voir **Introduction partie 2**), m'a naturellement amené à m'intéresser aux systèmes réellement ancrés dans ce domaine. La plupart de mes travaux entrent dans ce cadre, si tant est que l'on l'adopte une acception large de ce champ disciplinaire. Ils bénéficient aussi d'apports issus d'autres champs disciplinaires tels que la recherche opérationnelle et l'intelligence artificielle. Par exemple, SPRITE est un jeu sérieux informatisé, basé sur un modèle Agent. Il place le joueur dans le rôle du décideur politique ayant en charge la gestion territoriale de l'île d'Oléron et devant faire face aux submersions marines. Afin de gérer cet aléa, le joueur dispose de différentes actions (modifier le PLU, construire des digues...) et d'un budget limité. SPRITE se place aux limites du champ du génie civil. On peut certes y construire des digues, on doit gérer un risque qui peut rentrer dans le cadre d'une vision ingénieur, mais s'y mêlent aussi des aspects sociaux-politiques. Il y a une volonté de décloisonner les disciplines dans mon travail, pour arriver à une réelle multidisciplinarité, induisant des périmètres de système qui débordent souvent d'un cadre restreint dans lequel certains confinent le génie civil.

Tab 5.3. Modèles développés

Nom	Période de dévelop.	Système	Problématique	Paradigme / Modèle générique	Implication de l'humain	Principales Références
G-RISQ	2007-2009	Parc immobilier	Aide à la décision	MCDA	Assez forte : évaluations expertes et aide à la décision interactive	(Taillandier, Sauce et al. 2009)
T-RBS	2008-2011	Projet de construction	Analyse & Evaluation	RBS	Très faible : connaissances expertes	(Mehdzadeh, Taillandier et al. 2012)
MARE-EAP	2009-2010	Parc immobilier	Analyse & Evaluation	MCDA	Faible : évaluations et connaissances expertes	(Taillandier and Abi-Zeid 2010)
REMINd	2009-2011	Parc immobilier	Aide à la décision	MCDA & Optimisation	Assez forte : évaluations expertes et aide à la décision interactive	(Taillandier, Abi-Zeid et al. 2014)
MMRMP	2010-2013	Projet de construction	Simulation	Modèle relationnel	Moyenne : connaissances expertes et implication des utilisateurs finaux	(Tepeli, Breyse et al. 2013)
ARD-FOURMI	2012-2013	Rénovation de maison	Aide à la décision	MCDA	Forte : implication des utilisateurs et d'experts dans la modélisation et l'utilisation	(Taillandier, Mora et al. 2016)
TWH	2012-2014	Valorisation de bois tropicaux	Aide à la décision	MCDA	Assez faible : connaissances expertes et profil de préférences	(Lissouck, Pommier et al. 2018)
SORIA	2012-2014	Projet d'aménagement urbain	Aide à la décision	Modèle probabiliste (Utilité)	Assez faible : connaissances expertes, préférences et aversion au risque	(Taillandier and Breyse 2016)
RP-MMK	2012-2016	Parc immobilier	Aide à la décision	MOMKP OMO	Très faible : évaluations expertes	(Taillandier, Fernandez et al. 2017)
Th-SYADE	2013	Rénovation de maison	Aide à la décision	Système expert	Moyenne : connaissances expertes et préférences utilisateur	(Taillandier, Aries et al. 2013)
WooHou	2013	Construction de maison	Aide à la décision	MCDA	Assez faible : connaissances expertes et profil de préférences	(Taillandier and Abi-Zeid 2013)
SMACC1	2013-2014	Projet de construction	Simulation	ABM	Moyenne : connaissances expertes et simulation de l'humain	(Taillandier, Taillandier et al. 2015)
SPRITE	2014-2016	Risques naturels	Enseignement	ABM Jeu sérieux	Forte : simulation participative	(Taillandier and Adam 2018)
AGORA	2014-2016	Réseau d'infrastructures	Aide à la décision	MCDA Approche statistique	Assez faible : connaissances expertes et profil de préférences	(Bennabi, Elachachi et al. 2014)

SMACC2	2015-2016	Projet de construction	Simulation	ABM	Moyenne : connaissances expertes et simulation de l'humain	(Taillandier, Taillandier et al. 2016)
CP-HPRM	2015-2018	Projet de construction	Simulation	HPRM	Très faible : connaissances expertes	(Baudrit, Taillandier et al. 2018)
ECO2D2	2016-2018	Démolition de bâtiments	Aide à la décision	OMO	Moyenne : connaissances expertes et implication des utilisateurs finaux	(Queheille, Taillandier et al. 2018)
Li-BIM	2016-2018	Comportement des occupants d'un bâtiment	Simulation	ABM BDI	Moyenne : connaissances expertes et simulation de l'humain	(Micolier, Taillandier et al. 2018)
AIPA	2017-2018	Parc immobilier	Aide à la décision	MCDA Argumentation	Forte : connaissances expertes et aide à la décision participative	(Taillandier, Delhomme et al. 2017)
Domego	2018-2018	Projet de construction	Enseignement	Jeu sérieux	Très forte : modélisation et simulation participatives	(Taillandier, Micolier et al. 2018)
FAI-CG	2018-2018	Défaillances d'ouvrages	Analyse & Evaluation	Graphes Conceptuels	Très faible : connaissances expertes	(Taillandier, Baudrit et al. 2018)

Problématique. Si les systèmes se sont diversifiés, c'est aussi le cas des questions scientifiques traitées. Mes premiers travaux se concentraient sur une problématique d'aide à la décision et de gestion des risques, bien que ce dernier point n'en soit pas le centre. De nouvelles questions se sont ajoutées progressivement (e.g. évaluation, simulation, etc.). A un niveau plus fin, les problématiques se sont aussi diversifiées. A titre d'exemples, ma thèse portait sur un problème d'aide à la décision mono-décideur alors que AIPA se place dans un contexte participatif dans lequel de multiples acteurs participent à la décision. Un point intéressant quant à cette évolution est les interactions entre les problèmes traités, qu'elle permet de générer. Bien que les questions puissent paraître disjointes, il existe des connexions. Par exemple, dans les modèles de simulation (e.g. Li-BIM, SMACC, etc.) on modélise des décideurs. Cette modélisation peut tirer avantage des développements faits dans le domaine de l'aide à la décision ; il serait envisageable d'utiliser une approche argumentative pour modéliser les interactions entre des agents dans Li-BIM. Dans la même démarche, les modèles d'évaluation peuvent s'appuyer sur des méthodes d'aide à la décision pour de l'agrégation d'indicateurs (e.g. MARE-EAP, T-RBS). Dernier exemple, les modèles d'aide à la décision ont besoin de reposer sur des évaluations (et donc des modèles d'évaluation) et parfois de simulation. Dans les perspectives, je présenterai le projet SwITCh qui propose le développement d'un modèle de simulation participatif dans un objectif d'aide à la décision (**partie 4.2**).

Modèle générique Comme j'avais pu l'exposer dans le **Chapitre 2 partie 7.1**, au fil des années de recherche, j'ai pu avoir accès à de nouveaux modèles génériques. Cette acquisition peut résulter de la disponibilité de nouvelles méthodes et de nouveaux outils (e.g. Li-BIM profitant du développement du BDI dans GAMA (Bourgais, Taillandier et al. 2018), voir **Chapitre 3 partie 2**) ou d'échanges avec d'autres chercheurs sur des projets en commun (voir **partie 3.3**). Cela est important car il faut pouvoir être en mesure de choisir le bon modèle générique en fonction de la problématique, du système et du contexte. En maîtrisant de nouveaux modèles génériques, le chercheur est à même de mieux choisir le plus adapté. Mais, pour cela, il faut aussi savoir remettre en cause ses choix de

modèles antérieurs. Cela demande un positionnement qui ne soit pas trop rigide et dogmatique, pour faire progresser l'adéquation entre le système, la problématique et le modèle. Certains de mes choix antérieurs de modèle générique ou de modélisation, qui me semblaient alors pertinents, ne le paraissent plus autant au regard de mes compétences et connaissances actuelles. J'ai pu exposer cette évolution en ce qui concerne les modèles sur les projets de construction dans la partie le **Chapitre 2 partie 7.1**, mais j'aurais pu l'étendre à d'autres modèles.

Place de l'humain. En ingénierie, il est courant, pour la modélisation, de laisser la construction du modèle aux experts. Souvent, le modélisateur endosse lui-même le rôle d'expert. Il doit ainsi analyser le système pour concevoir le modèle approprié. A cette fin il peut s'appuyer sur la littérature scientifique et technique qui est riche en propositions, et sur ses expériences passées. Cette approche, qui prévaut dans de nombreuses sciences est souvent pertinente. Mais il est parfois intéressant de pouvoir coupler cette approche avec le regard des parties prenantes. Dès lors que l'on veut considérer l'humain dans le système, il faut pouvoir bien comprendre son rôle, son comportement, son point de vue. Pour cela, il faut disposer des connaissances relatives à ces différents aspects et d'un modèle générique en mesure de les prendre en compte. Dans les premiers modèles que j'ai proposés, sa modélisation restait simple (e.g. SMACC1 et son système réactif). En progressant dans ma maîtrise des modèles génériques permettant de modéliser l'humain, j'ai pu progresser dans sa modélisation. Li-BIM profite ainsi d'un modèle cognitif avancé (BDI) et d'un modèle relationnel que j'ai appris progressivement à maîtriser. Bien évidemment, la modélisation de la cognition dans mes modèles peut encore largement progresser, profitant notamment des nouveaux développements en intelligence artificielle.

Mais l'humain n'est seulement un composant du système ; il est aussi l'utilisateur du modèle. En aide à la décision, ce positionnement est primordial. Dans ce champ, comme j'ai pu l'exprimer à différentes reprises (e.g. **Chapitre 1 partie 5.4**), le(s) décideur(s) (i.e. l'humain) doit être le garant de la décision ; le modèle n'est là que pour lui apporter des éléments pouvant l'aider dans le processus de prise de décision. Cependant, le type d'aide apporté par le modèle peut varier, de la préconisation à la simple connaissance transmise. C'est au décideur de choisir le niveau d'aide qu'il souhaite obtenir. Idéalement, de mon point de vue, la préférence devrait tendre vers des méthodes permettant au décideur de mieux comprendre et d'apprendre, en même temps qu'il avance vers une décision. Cependant, dans certains contextes, des méthodes plus automatisées peuvent se révéler plus pertinentes (e.g. ECO2D2 qui se positionne dans un contexte technique et nécessitant des choix rapides). Le décideur doit donc aussi s'impliquer dans le choix du paradigme et du modèle générique. Il est en tout cas intéressant de pouvoir proposer plusieurs options au décideur (et il faut donc maîtriser différents modèles génériques), pour déterminer collectivement avec les parties prenantes ce qui convient le mieux au problème décisionnel. Cela souligne l'intérêt de faire participer le décideur (ou plus généralement les parties prenantes) à la modélisation. Les modèles que j'ai proposés marquent cet intérêt pour la modélisation participative. Bien que tous les modèles n'en aient pas bénéficié, mon évolution me fait tendre, aujourd'hui, vers la participation, qu'elle se place au niveau de la modélisation, de la simulation ou de l'aide à la décision. Les perspectives qui sont présentées dans la **partie 4**, et qui constituent un prolongement de cette trajectoire, le traduiront clairement.

3.2. Du rapport aux formalismes

Mes recherches s'ancrent dans la pluridisciplinarité. Elles s'appuient sur des paradigmes, des modèles génériques, mais aussi sur des formalismes variés : graphes, équations, tableaux, probabilités, etc. Chaque formalisme présente ses avantages et inconvénients. Le formalisme doit être choisi en fonction de la problématique, des utilisateurs et du contexte d'utilisation. Par exemple, dans une logique de modélisation participative, il faut être vigilant et retenir des formalismes compréhensibles

par l'ensemble des acteurs. Autre exemple, une équation mathématique peut être parfois beaucoup plus explicite qu'un schéma.

Par rapport à ce dernier point, j'ai fait le choix dans ce manuscrit de ne faire apparaître aucune équation mathématique (la seule exception est la **Figure 1.5.b** au **Chapitre 1**, qui a seulement vocation à illustrer un type de modèle). Pourtant, les mathématiques sont un outil extrêmement précieux pour la modélisation. Le choix de ne pas utiliser d'équations mathématiques n'a pas pour objectif de dénigrer l'apport des mathématiques à la modélisation. La plupart des modèles que j'ai développés ont recours à des équations mathématiques. CP-HPRM (voir **Chapitre 2 partie 4**), basé sur les PRMs, et ainsi sur les lois de Bayes, a par exemple un recours très fort aux mathématiques. Un modèle comme Li-BIM (**Chapitre 3 partie 2**) utilise des fonctions mathématiques (e.g. calcul thermique), mais elles n'en constituent pas le centre. Le formalisme mathématique présente de nombreux avantages : (a) il est basé sur une structuration logique très forte et très cohérente, (b) il est international et compris (du moins dans les bases) par beaucoup de gens, en particulier les ingénieurs et les scientifiques, et son interprétation est universelle, (c) il est directement interprétable par l'ordinateur, ce qui facilite son implémentation. Les mathématiques sont extrêmement utiles, mais, dans ma vision de la modélisation, le modèle doit être porteur de sens pour toutes les parties prenantes. La formalisation au travers d'une formule mathématique doit en porter aussi et être signifiante pour les différentes parties prenantes. C'est, justement, ce sens qui a le plus d'intérêt pour moi. Ainsi, j'ai essayé de retranscrire dans ce manuscrit le sens des modèles présentés, tout en m'affranchissant de leur transcription formelle. Car chaque formule doit être expliquée et justifiée, obligeant à un travail didactique qui s'accorde mal avec l'exercice de synthèse auquel je me suis ici astreint. Toutefois, dans les articles liés aux modèles, je cherche toujours à expliciter clairement, tout à la fois, les enjeux et le fonctionnement des différentes équations mathématiques que j'utilise. Par exemple, dans (Taillandier, Taillandier et al. 2015), l'ensemble des règles, formules et fonctions a été explicité pour permettre au lecteur de comprendre réellement le fonctionnement du modèle Agent).

Un même modèle combine souvent plusieurs formalismes. CP-HPRM, par exemple, couple un modèle de connaissances basé sur un graphe de concepts en relation, avec le formalisme des réseaux bayésiens pour le calcul des probabilités. L'utilisation de deux formalismes différents peut se faire aussi selon un ordonnancement chronologique dans la modélisation. Par exemple, pour l'optimisation multi-objectif, il est intéressant et courant, avant d'exprimer les fonctions objectif sous la forme d'équations, d'explicitier les dépendances entre les variables via des graphes d'influence. J'avais présenté, en exemple, dans la **figure 1.9.a** du **Chapitre 1**, un graphe d'influence ayant servi à construire un modèle d'optimisation multi-objectif pour la conception d'un matériau bio-sourcé. Ces graphes d'influences peuvent alors être utilisés, comme supports, pour exprimer mathématiquement les fonctions objectif. A l'inverse, afin d'aider un utilisateur de modèle à mieux appréhender une information (e.g. résultats de simulations), il peut être intéressant de retransformer ceux-ci (e.g. tableau) sous une forme graphique : c'est ce qui est par exemple effectué dans AIPA (**Chapitre 4 partie 4**) où le résultat de l'argumentation est restitué aux parties prenantes sous la forme d'un graphe.

Pour conclure sur ce point, je ne peux qu'affirmer que tous les formalismes sont utiles et sont simplement plus ou moins adaptés à un contexte. Il faut alors savoir choisir celui qui semble le plus pertinent en fonction du public visé (utilisateur et/ou modélisateur), du système, du type de connaissances à représenter, etc. Mais il faut toujours rendre explicite le sens de chaque élément du formalisme, que ce soit un paramètre dans une équation, un arc sur un graphe ou tout autre élément. Cela est d'autant plus important que l'on se positionne dans des démarches participatives où chaque participant doit être en mesure d'appréhender les différents éléments de connaissance mis en commun.

3.3. De l'importance du travail en équipe

J'aborde de multiples systèmes dans différents domaines dans mes travaux (voir **partie 3.1**). Chacun fait appel à de nombreuses connaissances qui couvrent un large champ de spécialités disciplinaires. Bien évidemment, je ne suis pas, et ne pourrai pas, être un spécialiste de chacun de ces domaines. Je n'en possède souvent qu'une connaissance superficielle. Pourtant, la connaissance du système est indispensable pour être en mesure de le modéliser. Mais il est aussi indispensable de bien maîtriser les modèles génériques, voire être en mesure d'en élaborer de nouveaux, mieux adaptés à un contexte particulier. Cela ajoute de nouveaux champs de compétences et de nouvelles disciplines (recherche opérationnelle, intelligence artificielle, etc.) à ceux du domaine d'application. Partant du postulat que personne ne saurait à lui-seul posséder l'ensemble de ces connaissances et compétences, ce travail de modélisation ne peut pas se concevoir comme un travail solitaire. Il implique de travailler en équipe et d'instaurer un réel partage de compétences et de connaissances. Cela passe par un travail avec les acteurs du terrain et un travail en réseau de chercheurs.

Le travail avec les acteurs du terrain intègre tout à la fois la modélisation participative et le recueil de connaissances auprès d'experts et de parties prenantes. J'ai déjà pu exprimer tout l'intérêt de la modélisation participative (voir **partie 2.2**) pour faire comprendre le fonctionnement du modèle, améliorer sa capacité à répondre à la problématique, ainsi que sa traçabilité et sa durabilité. L'apport des parties prenantes peut aussi se faire via le recueil de connaissances. Ces connaissances peuvent tout à la fois concerner des éléments techniques, opérationnels, culturels... mais aussi des attentes et appréhensions vis-à-vis du modèle. Ce dernier point doit permettre de s'assurer que le modèle pourra répondre réellement aux besoins et attentes. En tout état de cause, les parties prenantes disposent de connaissances indispensables à la construction d'un modèle, du moins pour les modèles impliquant l'humain. Certains des modèles que j'ai conçus ont bénéficié de l'apport des acteurs du terrain. Par exemple, le modèle ARD-Fourmi (**Chapitre 3, partie 3**) a été conçu en partenariat avec les habitants du quartier de Malartic et un certain nombre d'experts du domaine de la réhabilitation des bâtiments (architecte, économiste de la construction, etc.). De la même façon et sur un sujet proche, le projet REHA-PARCS, dans lequel est développé le modèle AIPA (**Chapitre 4 partie 4**) intègre un bureau d'études spécialisé dans la rénovation de parcs de bâtiments. Cela assure un ancrage opérationnel et réaliste, mais permet aussi de nourrir le modèle de connaissances. Les modèles ECO2D2 (**Chapitre 3 partie 4**) et MMRMP (**Chapitre 3 partie 3**) ont été conçus dans le cadre de thèses CIFRE et leur construction a bénéficié de l'apport direct des utilisateurs finaux (respectivement BDS et VCF). Cela a permis, pour ces deux modèles, de profiter de l'expérience et de l'expertise d'acteurs du terrain, ainsi que des données essentielles à leur fonctionnement et à leur calibration. Par exemple, pour le cas d'ECO2D2, de nombreux échanges ont eu lieu avec un chargé d'études en démolition. Ces échanges ont permis de comprendre comment il envisageait le problème décisionnel, quels étaient pour lui les objectifs importants, quelles variables il considérait... Il y a beaucoup à gagner à impliquer les parties prenantes que ce soit de façon légère (recueil d'attentes et de connaissances) ou plus approfondie (modélisation participative).

Le travail avec d'autres chercheurs a de multiples intérêts, puisqu'il permet : (a) de bénéficier de leurs connaissances du système et de connaissances méthodologiques (modèles génériques, démarche, formalisme...), (b) de créer/consolider une dynamique et une motivation, (c) des échanges sur la pratique de la recherche et (d) de construire un réseau de chercheurs. Le premier point est bien évidemment indispensable : aucun chercheur isolé ne saurait maîtriser toutes les compétences nécessaires pour modéliser un système complexe d'une façon holistique. Le deuxième point n'est pas spécifique à la recherche, mais de nombreuses études (e.g. (Leplat 1994, Paulus and Nijstad 2003)) ont démontré les avantages du travail en groupe/en équipe, voire collaboratif (ce dernier terme implique parfois le recours au numérique (Vaast 2008)). Le troisième point s'inscrit dans la logique

des communautés de pratiques (Wenger 2005). Une communauté de pratique est un groupe de personnes qui travaillent ensemble et qui, par leurs échanges, développent un apprentissage collectif. Cet apprentissage collectif, souvent informel, conduit à produire des pratiques sociales qui permettent d'améliorer la réalisation de tâches, de faciliter la communication et de rendre plus agréable l'accomplissement du travail. Ce développement d'une communauté de pratiques passe par différentes étapes décrites dans (Wenger 2005) et peut se heurter à différentes difficultés (confrontation, rejet...). Bien menée, elle peut conduire à des résultats extrêmement positifs dans le long terme. Ainsi, travailler avec des collègues permet de prendre du recul par rapport à ses propres pratiques, à sa vision de la recherche et à la façon dont on se positionne. Le réseau de chercheurs permet de pérenniser des relations au-delà d'un premier travail. Ce réseau est souvent purement informel, émanation ou non d'une communauté de pratiques. Il peut en tout cas renforcer les trois premiers points en inscrivant durablement des relations de collaboration.

Tous ces aspects peuvent trouver illustration dans les processus de modélisation que j'ai menés. La **Figure 5.4** formalise mon réseau de chercheurs. Je n'y ai fait figurer que les chercheurs en poste avec lesquels j'ai partagé une publication ou un projet de recherche. Ce réseau permet d'illustrer la diversité des disciplines des chercheurs avec lesquels j'ai travaillé. Bien évidemment, cette vue est extrêmement réductrice car nombre d'entre eux possèdent de multiples compétences touchant à différents domaines. De plus ces chercheurs sont aussi chacun « au centre » de leur propre réseau. Finalement, mon réseau s'étend au-delà des permanents et des chercheurs. Cependant cette représentation permet déjà de replacer mon travail de modélisation dans ce collectif pluridisciplinaire.

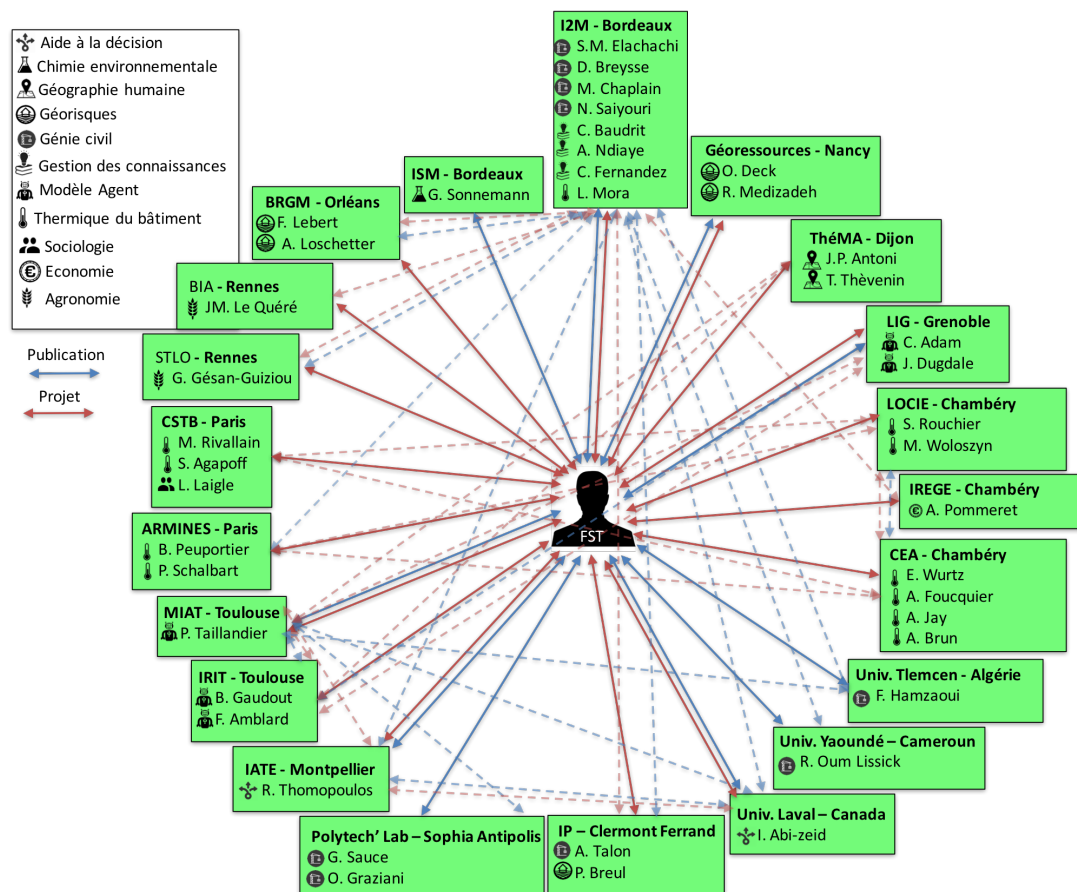


Fig 5.4. Réseau de chercheurs

Ces collaborations menées tout au long de mon parcours, se positionnent tant sur un plan régional (Aquitaine) que national et international. Elles alimentent de riches échanges avec des collègues ayant des cultures ou des façons de travailler différentes, mais complémentaires. Ces collaborations ont tout

à la fois contribué à un échange de connaissances pour répondre à une problématique, apporté de nouvelles connaissances et compétences, et nourri plus profondément mon travail de chercheur, faisant évoluer ma propre pratique. Je pourrais citer de nombreux exemples relatifs à ces trois aspects, mais je me contenterai en guise d'illustration d'évoquer un exemple pour chaque.

Vis-à-vis du premier point, je peux citer le modèle ARD-Fourmi, qui a bénéficié du travail de chercheurs en thermique du bâtiment (L. Mora, I2M) pour l'évaluation énergétique des maisons. Il y a donc eu pour ce modèle un échange de compétences, relatives à la thermique du bâtiment pour les uns, et relatives à l'aide à la décision pour d'autres. Pour le deuxième point, je pourrais évoquer la connaissance et la maîtrise des modèles Agent qui vient de mes collaborations avec P. Taillandier (MIAT). C'est par un travail commun sur la première version de SMACC (Taillandier, Taillandier et al. 2015) que j'ai pu découvrir et apprendre à maîtriser, peu à peu, les modèles Agent, jusqu'à être moi-même autonome pour l'utilisation de ce modèle générique. Pour le dernier point, je peux évoquer l'évolution de mon positionnement vis-à-vis de l'aide à la décision qui doit beaucoup aux travaux réalisés avec I. Abi-Zeid (Univ. Laval) depuis 2010. Mon approche a ainsi basculé d'une orientation fortement teintée par ma formation d'ingénieur cherchant une objectivité idéalisée, à une orientation avec une considération beaucoup plus forte pour l'humain, assumant la subjectivité de ses démarches. Cela peut se voir comme une trajectoire depuis la recherche opérationnelle classique jusqu'à la recherche opérationnelle comportementale (Kunc, Malpass et al. 2016). En plus d'enrichir mes modèles, mes connaissances et ma pratique de la recherche, ces collaborations m'ont permis de construire un réseau de chercheurs riche de compétences. Plus important, ce réseau est avant tout un ensemble de personnes avec lesquelles il m'est particulièrement agréable de travailler, favorisant les dynamiques de recherches (e.g. dépôt de projets, écriture d'articles) et l'efficacité du travail accompli. Comme j'ai pu l'exprimer en exposant le principe des communautés de pratique, par la construction d'une confiance et d'expériences partagées, on peut nourrir un climat propice à un travail de qualité. C'est peut-être là que se trouve l'essentiel, avant même les compétences, ramenant le chercheur à sa position simplement d'humain.

4. Des perspectives

La trajectoire tracée par mes travaux passés et ma dynamique actuelle, conduisent naturellement à imaginer des perspectives, qui structureront mon projet de recherche dans les prochaines années. Ce projet se décline selon plusieurs temps : (a) un premier temps (2018-2020) durant lequel je vais continuer et finaliser des modèles en cours de construction, (b) une deuxième période (2019-2022) pour laquelle sont identifiés des projets de recherche (et des modèles liés) venant d'être déposés, (c) un troisième temps (2020-2025) sur lequel se trouvent des projets futurs, des perspectives à explorer, et enfin (d) le long terme. Sur ce dernier temps, je ne dirai rien, car comme j'ai pu l'exprimer au travers de ma trajectoire (**partie 3.1**), ma position de chercheur a évolué dans les dix dernières années et elle va continuer à évoluer, tout comme le feront les modèles génériques et les outils. Dans ce contexte dynamique, il est très incertain (et peu fiable) de construire une vision à long terme. Peut-être même n'est-ce même pas souhaitable, tant il est plus intéressant de garder un positionnement flexible qui rend plus aisée et plus naturelle la remise en question et l'adaptation.

4.1. Travail en cours

Les premières perspectives me guident naturellement vers le travail en cours, qu'il me reste à achever. Ainsi, plusieurs thèses et plusieurs projets commencés n'ont pas encore livré tous leurs résultats. Le premier enjeu sera ainsi de les mener à leur terme.

Thèses. Je participe actuellement à l'encadrement de cinq thèses qui devraient s'achever entre mi-2019 et fin 2020. Les travaux de trois de ces thèses ont été présentés dans le cadre de ce

manuscrit : Alice Micolier (Li-BIM **Chapitre 3 partie 2**), Eva Queheille (ECO2D2 **Chapitre 3 partie 4**) et Benjamin Delhomme (AIPA **Chapitre 4 partie 4**). En plus de ces travaux, je participe aussi à deux autres thèses ayant pour sujet : le développement d'un système informatisé d'aide à la conception de procédés optimisés de fractionnement de protéines (Maëllis Belna, **Annexe B**) et l'analyse des défaillances des ouvrages de génie civil (Quynh Anh Hoang, **Annexe B**). Ces deux thèses devraient conduire à deux modèles, respectivement d'optimisation multi-objectif et de représentation des connaissances et de raisonnement, basé sur les graphes conceptuels (Sowa 1984).

Projets Je participe actuellement à cinq projets (OPTIMAL, REHA-PARCS, CADAU, ECO2D2 et QUALIPIN) qui devraient s'achever d'ici à 2020. Le projet OPTIMAL (2017-2020) financé par la Région Bretagne porte sur le processus de fractionnement du lait ; c'est dans son cadre que se déroule la thèse de Maëllis Belna. Le projet QUALIPIN (2015-2019) financé par la Région Aquitaine vise à améliorer la connaissance sur le pin maritime aquitain afin de mieux valoriser cette ressource. Le projet ECO2D2 (2017-2020), aussi financé par la Région Aquitaine, se concentre autour de la thèse d'Eva Queheille et du développement d'un outil d'optimisation pour la déconstruction. Le projet ANR-REHA-PARCS (2016-2020) portant sur la rénovation d'un parc immobilier social a été présenté dans le **Chapitre 4 partie 4**. Le modèle AIPA est développé conjointement dans le cadre de ce projet et dans le projet CADAU (2017-2020), financé par le CNRS et dont je suis le porteur. Le projet CADAU vise à proposer un modèle d'aide à la décision participatif pour l'aménagement urbain. Il adopte ainsi une démarche similaire à la partie décisionnelle de REHA-PARCS mais en l'appliquant à un autre domaine. Ce changement de domaine n'est pas anodin, puisque le contexte décisionnel y est assez différent (e.g. acteurs participants à la démarche participative, format des solutions comparées, données disponibles, etc.). Cela devrait conduire à une nouvelle version de AIPA spécifiquement adaptée à ce domaine.

4.2. Travail en cours d'initiation

Après l'achèvement des travaux en cours, de nouvelles actions pourront être engagées. Elles se traduiront par la réalisation de plusieurs modèles et par la participation à deux projets de recherche venant d'être déposés.

SMACC3. SMACC a déjà connu deux itérations (**Chapitre 2 partie 5**). La troisième, qui est prévue prochainement, est actuellement en phase d'*idées initiales* telle que présentée dans la **Figure 5.3**. Plusieurs voies d'amélioration sont envisagées. La première voie est une meilleure prise en compte du comportement humain en utilisant le modèle BDI et le modèle interpersonnel, qui sont maintenant disponibles dans GAMA, et déjà utilisés dans Li-BIM (**Chapitre 3 partie 2**). J'envisage une potentielle alternative au modèle interpersonnel, en ayant recours à l'argumentation abstraite. En cela, SMACC3 pourrait bénéficier des résultats du projet INRA VITAMIN (2018-2020), qui propose de coupler la modélisation Agent et l'argumentation, pour étudier la transition alimentaire vers le végétarisme. Bien que VITAMIN aborde un autre domaine applicatif, les résultats des réflexions qui y sont menées seront certainement très intéressantes et applicables à d'autres modèles et donc peut être à SMACC3. Un autre point porte sur la base de connaissances : SMACC3 bénéficiera de la base de connaissances développée dans CP-HPRM. Cela permettrait de profiter d'une description multi-niveau des agents et de faciliter l'instanciation du modèle. L'instanciation consisterait alors, comme c'est le cas actuellement avec CP-HPRM, à préciser simplement les éléments du projet (acteurs, activités...) et à modifier au besoin les valeurs par défaut de leurs attributs. Une autre piste pour SMACC3 serait de le spécialiser en SMACC3-BD (bâtiment) et SMACC3-INFRA (infrastructures). Le premier serait consacré uniquement au bâtiment et pourrait profiter du support du BIM (en réutilisant le *plugin* développé dans Li-BIM). Le second serait consacré aux chantiers d'infrastructures (voiries, réseau d'eau) en intégrant des données géographiques de type SIG (comme

le permet GAMA). Ces différents points restent des idées à explorer, mais qui présentent toutes un fort potentiel.

CORISMA. Le projet CORISMA (*COmmon understanding of Risk Management in transportation infrastructure systems in view of climate change*) a été déposé à l'appel à projets Interreg-Sudoe 2019. Il rassemble près de 20 partenaires publics comme privés, issus de différents pays européens (France, Portugal, Espagne, Andorre). Le projet vise à développer des outils de gestion prévisionnelle des risques à l'usage des autorités régionales et des gestionnaires d'infrastructures. Il propose de développer des modèles et outils pour une gestion des systèmes routiers et ferroviaires permettant une meilleure anticipation des risques et l'amélioration de la résilience des infrastructures. CORISMA a pour enjeu de permettre un partage des connaissances et une meilleure collaboration entre les autorités régionales, les services de protection civile, les gestionnaires d'infrastructures et les chercheurs, afin de faire face aux désordres et catastrophes induites par le changement climatique. Les outils développés dans le projet vont traiter tout à la fois des phases pré-catastrophe (indicateurs de vulnérabilité, modèles prédictifs, atténuation des risques...), de catastrophe (procédures de protection/évacuation...) et post-catastrophe (capitalisation, aide à la remise en état...). CORISMA aborde les quatre problématiques suivantes : (a) la coordination des pratiques des différents pays partenaires et l'identification des verrous qui la limitent, (b) l'élaboration d'une méthodologie et des outils d'évaluation prédictive des risques, (c) l'amélioration de la gestion des catastrophes par la mise en œuvre de stratégies dynamiques de gestion des catastrophes dans les infrastructures de transport et (d) l'élaboration d'outils de remise en état des zones endommagées par la mise en œuvre et la validation d'un protocole spécifique. Mon action se positionnera sur le deuxième point (i.e. outil d'évaluation prédictive des risques), en proposant un modèle Agent permettant de modéliser le comportement des habitants et des utilisateurs des infrastructures afin d'évaluer l'impact social des stratégies de gestion des risques et des conséquences de catastrophe.

SwITCh. Le projet SwITCh (*Simulating the transition of transport Infrastructures Toward smart and sustainable Cities*), dont je suis le porteur, a été déposé à l'appel ANR 2018 (retenu en liste complémentaire) et est redéposé à l'appel 2019. Ce projet rassemble une équipe pluridisciplinaire issue de cinq laboratoires (I2M-Bordeaux, LIG-Grenoble, ThéMA-Dijon, IRIT-Toulouse et RECOVER-Aix-en-Provence). Il vise à aider à l'aménagement urbain et à la gestion des infrastructures de transport en simulant l'introduction progressive d'innovations relatives aux infrastructures, qu'elles soient technologiques (véhicule autonome, *smart* infrastructure...), sociales (télétravail, flexibilité des horaires de travail...) ou d'usage (utilisation du vélo, voiture partagée...). Cela nécessite de concevoir un modèle permettant d'évaluer les impacts de ces innovations sur des indicateurs clés de mobilité, de qualité de service, de sécurité, de coûts économiques et de pollution, tout en intégrant une grande variété de modalités de transport et d'infrastructures associées. Pour cela, le modèle devra inclure les infrastructures et les modalités actuelles et celles prévues dans le futur, et tenir compte du processus de transition entre les situations actuelles et futures.

SwITCh utilise la modélisation Agent et la simulation participative comme cadre unificateur pour coupler différents modèles et différentes échelles, tant temporelles que spatiales, afin de construire un modèle holistique. Il disposera d'un modèle de la ville basé sur des données SIG et d'un modèle réaliste de comportement de la population. Suivant une approche participative pour la modélisation et la simulation, l'outil sera conçu comme un support pour la consultation et la discussion. Il permettra d'aider les différents acteurs, depuis le décideur jusqu'au citoyen, à construire un projet commun pour améliorer les infrastructures afin de répondre au défi de la ville de demain. Le modèle sera flexible, facilement adaptable à n'importe quelle ville et capable d'intégrer une grande variété de scénarios prospectifs. Il conduira à l'élaboration de trois outils : un livre de connaissances, un simulateur interactif des infrastructures de transport et de leur usage, et un jeu sérieux. Le simulateur interactif

sera utilisé par les urbanistes pour explorer l'impact potentiel des innovations face à diverses évolutions du contexte. Il aidera ainsi l'équipe de planification urbaine à prendre des décisions pertinentes concernant l'évolution de leurs infrastructures de transport, en leur permettant de tester et d'évaluer différentes stratégies alternatives. Le simulateur interactif permettra également aux chercheurs de mettre en évidence les évolutions disruptives potentielles ou les effets secondaires inattendus pour les urbanistes, via le recours à la simulation participative. Le jeu sérieux sera utilisé par les étudiants et le grand public afin d'enrichir leur compréhension des enjeux de la ville du futur et des infrastructures de transport. Il s'appuiera sur le simulateur interactif mais sera enrichi par des travaux spécifiques sur la conception du jeu (*game design*) afin d'être un véritable support d'apprentissage et de sensibilisation. Le simulateur interactif et le jeu sérieux seront développés avec la plateforme GAMA et seront utilisés dans un contexte réel pour deux cas d'étude, respectivement à Bordeaux et Dijon. Le projet devrait avoir des impacts socio-économiques significatifs en aidant les gestionnaires d'infrastructures et les urbanistes, à adapter les infrastructures aux besoins futurs, en accélérant la transition vers une ville plus durable. SwITCh fera la synthèse de mes travaux passés et en constituera un naturel prolongement.

4.3. Après...

Après les projets en cours de soumission et les modèles en cours d'initialisation, il me faudra m'impliquer dans de nouveaux projets. Ce « temps d'après » entre en écho avec un changement de poste, avec le passage d'enseignant-chercheur à l'Université de Bordeaux à chercheur à l'IRSTEA d'Aix-en-Provence. Ce glissement de poste induit de nouvelles orientations de recherche. Ces orientations resteront bien évidemment en phase avec les travaux que j'ai pu réaliser jusqu'à présent et matérialisent une évolution logique. Elles se déclinent selon trois axes : la gestion d'ouvrages hydrauliques face aux risques, les aléas en cascade sur un territoire et les infrastructures durables et résilientes. Ces travaux seront donc menés au sein, et en collaboration avec, les chercheurs de l'Unité RECOVER de l'IRSTEA, profitant de leurs connaissances et compétences, et nourrissant encore plus mon réseau de recherche.

Gestion d'ouvrages hydrauliques face aux risques. Bien que les ouvrages hydrauliques soient très utiles pour la société, leurs impacts environnementaux et socio-économiques ne doivent pas être négligés (Hariri-Ardebili 2018). De plus, la défaillance de ces ouvrages, bien que rare, peut avoir des conséquences catastrophiques (e.g. rupture du barrage d'Attapeu au Laos en juillet 2018 : 26 décès confirmés et plus de 130 disparus). Cela rend nécessaire une meilleure prise en compte des risques liés à ces ouvrages, intégrant des enjeux de durabilité, de résilience et de participation du public (CNEGP 2012). C'est dans cette perspective que se place ce projet, centré sur la gestion des risques des ouvrages hydrauliques en phase d'exploitation. Le travail proposé porte sur la conception d'un modèle visant à une meilleure prise en compte des risques dans la gestion des ouvrages hydrauliques par les différents acteurs du périmètre. L'enjeu est de développer un modèle tout à la fois générique et flexible et pouvant réellement s'adapter à un périmètre (i.e. territoire) défini. Le modèle reposera sur une approche probabiliste, associant un modèle HPRM avec des données géographiques (modèle SIG) et une modélisation mécanique et fonctionnelle de l'ouvrage. L'enjeu, en termes méthodologiques, sera d'associer des données géographiques à un modèle HPRM, tout en l'inscrivant dans une démarche rassemblant experts et habitants du périmètre. Ce modèle pourra être implémenté sous O3PRM (L. Torti and Wuillemain 2017). Cet axe pourra bénéficier de mon travail sur les PRMs (Baudrit, Taillandier et al. 2018) et sur le modèle de connaissances FAI-CG (modèle sur les défaillances d'ouvrages (Taillandier, Baudrit et al. 2018)). Il permettra d'instituer une collaboration avec l'I2M-INRA (Cédric Baudrit et Christophe Fernandez) et le LIP6-Sorbonne Université (Lionel

Torti et Christophe Gonzales) qui ont une expertise avancée sur les PRMs et développent la plateforme O3PRM.

Aléas en cascade sur un territoire. Les territoires sont soumis à différents types de risque, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique. Des catastrophes récentes, telles que l'ouragan Katrina (2005) ou la catastrophe nucléaire de Fukushima (2011), ont souligné l'importance des aléas en cascade (effet domino). Ces aléas en cascade peuvent entraîner une augmentation significative des décès et des dommages (Alexander 2000) en raison de l'existence d'interdépendances entre les différents secteurs du système territorial et des infrastructures (Zuccaro, De Gregorio et al. 2018). Cet effet domino a été étudié par différents auteurs (e.g. (Pilone and Demichela 2018, Serre and Heinzlef 2018, Tsavdaroglou, Al-Jibouri et al. 2018, Wang, Yang et al. 2018)), mais les modèles développés restent limités en termes de prise en compte des dynamiques, des incertitudes, du comportement humain et de la dimension géographique. Pour répondre à ce besoin, je souhaiterais proposer un modèle permettant de simuler le déroulement d'aléas en cascade pour tester la capacité d'un territoire à faire face à ce phénomène. Le modèle reposera sur une structure Agent, à laquelle seront associés un modèle géographique du territoire (SIG), comportant la topologie et les principaux éléments bâtis (bâtiments, infrastructures, etc.), et un modèle cognitif pour prendre en compte de façon réaliste le comportement des différents acteurs. Cet axe bénéficiera des modèles Agent que j'ai déjà développés (SMACC (Taillandier, Taillandier et al. 2015, Taillandier, Taillandier et al. 2016), Li-BIM (Taillandier, Taillandier et al. 2017) et SPRITE (Taillandier and Adam 2018)). Par ailleurs, un premier travail exploratoire a déjà été réalisé sur le sujet au Laboratoire GeoRessources, sous la direction de Olivier Deck et Rasool Medihzadeh. J'ai participé à la construction de ce premier modèle portant sur les risques liés à l'inondation et les conséquences induites sur les infrastructures. L'enjeu de ce modèle est d'évaluer la capacité du territoire à résister à des aléas en cascade, et notamment sa résilience. Il peut aussi permettre, en simulant des scénarios alternatifs, d'étudier les actions pouvant être mises en œuvre pour limiter l'impact de tels risques. Le modèle construit avec GeoRessources n'est à ce jour qu'à un stade d'ébauche. L'enjeu serait de le développer en collaboration avec ce laboratoire, en trouvant un terrain d'étude réel, en associant les acteurs locaux. Cet axe de recherche pourrait aussi associer le LIG-Université de Grenoble (Carole Adam) spécialisé dans la modélisation des comportements humains et notamment des émotions. Carole Adam a déjà développé un modèle d'évacuation de population en situation de feux de forêt (Adam and Gaudou 2017) qui pourrait servir de base pour la modélisation cognitive des agents dans notre modèle.

Vers des infrastructures durables et résilientes. Le troisième axe vise à aider à l'aménagement urbain et à la gestion des infrastructures hydrauliques. L'aménagement urbain pose un problème décisionnel complexe et reste un enjeu majeur pour toutes les villes. Les projets d'aménagement doivent tirer parti de l'état actuel et inventer la ville de demain tout en relevant les défis du développement durable et de la résilience. Les différentes dimensions du développement durable (économie, environnement, social) conduisent nécessairement à des objectifs contradictoires qui doivent être conciliés dans le processus décisionnel. Un processus décisionnel s'inscrivant dans une démarche de développement durable doit impliquer les différents acteurs (maire et conseil municipal, administration, experts, habitants, etc.) qui seront affectés par la décision et qui peuvent avoir des points de vue et des objectifs différents (Rey-Valette, Damart et al. 2007, Joerin, Desthieux et al. 2009). Comme j'ai pu l'exprimer dans le **Chapitre 4 partie 4.2**, il existe aujourd'hui peu de modèles d'aide à la décision dédiés aux démarches participatives. Pour répondre à cet enjeu, nous avons développé le modèle AIPA (**Chapitre 4 partie 4.2**) utilisé dans les projets REHA-PARCS et CADAU. Ce travail s'inscrirait dans le prolongement des recherches engagées sur le projet CADAU, en enrichissant le modèle AIPA avec deux dimensions : la prise en compte des incertitudes et de la dimension géographique. Il pourrait rassembler des chercheurs issus de plusieurs laboratoires : I2M-

Bordeaux (Mohammed Elachachi), l'Université Laval-Québec (Irène Abi-Zeid) et IATE-INRA Montpellier (Rallou Thomopoulos) qui ont respectivement une expertise en fiabilité des infrastructures, en aide à la décision multicritère et en argumentation.

5. Conclusion générale

Comme annoncé dans l'introduction, mes recherches prennent place dans différents domaines, traçant une trajectoire réellement pluridisciplinaire, et posant la question de l'humain face aux systèmes du génie civil. Ces travaux qui font appel à des formalismes et des paradigmes différents sont pourtant réunis autour de la notion de modèle. Ainsi, la très grande majorité de mes publications porte sur la présentation de modèles, composant une mosaïque riche et variée auxquelles les interconnexions confèrent un sens global et cohérent.

J'ai essayé dans ce manuscrit, d'illustrer cette richesse et cette cohérence en croisant mes travaux, et en montrant comment ils faisaient écho les uns aux autres. En plus d'exposer mon travail sur les modèles, je me suis attaché à formaliser les réflexions personnelles que ces modèles avaient pu susciter. Dans l'introduction, je posais une question qui servait de guide à ce travail : *Comment la modélisation peut-elle permettre de prendre en compte l'humain dans ses différentes dimensions et de faire face à la complexité en génie civil pour aider à faire comprendre, à faire réfléchir et à décider ?* C'est la question à laquelle que je me suis efforcé de répondre. A cette fin, onze modèles ont été présentés tout au long des chapitres de ce manuscrit.

Dans le **Chapitre 1**, j'ai exposé les enjeux et le contexte de ce travail, au travers d'une étude ontologique des principales notions. Cela a permis de clarifier mon positionnement de chercheur et de poser le cheminement permettant de répondre à la question initiale. Dans les **Chapitre 2, 3 et 4**, j'ai présenté différents modèles permettant de répondre à la problématique, décliné selon trois systèmes. Dans le **Chapitre 2**, je me suis intéressé aux projets de construction et plus précisément, aux risques qui leur sont liés, induisant retard, surcoût et faible qualité. Les différents modèles présentés dans ce chapitre (T-RBS, MMRMP, CP-HPRM, SMACC2 et Domego) proposaient des réponses à la question de la complexité et apportaient des éléments de réflexion quant à la modélisation. Dans le **Chapitre 3**, je me suis intéressé aux enjeux du développement durable relatifs aux bâtiments à travers trois phases du cycle de vie de l'ouvrage : la conception, l'exploitation et la fin de vie des bâtiments. Trois modèles ont été présentés : Li-BIM simulant le comportement d'occupants dans un bâtiment, ARD-Fourmi fournissant une aide au choix de travaux de rénovation et ECO2D2 assistant un chargé d'études dans le choix d'une stratégie de démolition de bâtiments. Le **Chapitre 4** était dédié à la gestion de parcs immobiliers. Plus précisément, je me suis concentré sur la question de l'élaboration d'un plan d'actions pluriannuel de maintenance et de rénovation. Pour répondre à cet enjeu d'aide à la décision, j'ai présenté trois modèles : REMIND, RP-MMK et AIPA. Ces trois modèles induisaient trois positionnements différents des décideurs et donc trois façons d'aborder l'aide à la décision. Enfin, ce dernier chapitre m'a permis de poser un certain nombre de réflexions suscitées par mon parcours et les modèles que j'ai pu développer. J'ai aussi, dans ce chapitre, posé les perspectives de mon travail.

La question est alors de savoir si ce parcours a permis de répondre à la problématique. La réponse ne peut être que nuancée. Les modèles que j'ai présentés permettent de répondre en partie à la problématique. Ils proposent tous une stratégie pour faire face à la complexité, avec le souci de considérer l'humain dans ses multiples dimensions. Cependant, chaque modèle a ses limites et aucun ne permet de rendre compte de la complexité dans toute sa mesure. Notamment, la prise en compte de l'humain, question centrale de ce travail, était très imparfaite. On pourrait s'en satisfaire, en soulignant une avancée notable par rapport aux modèles classiques, notamment ceux utilisés en ingénierie qui font souvent l'impasse sur l'humain. Mais il est évident, que malgré tout, les modèles

peuvent encore progresser. Cela peut se faire déjà par une évolution des modèles génériques. De nombreux travaux méthodologiques sont en cours, notamment dans le domaine de l'intelligence artificielle et devraient conduire à la mise à disposition de nouveaux outils, de nouveaux modèles génériques, voire de nouveaux paradigmes, permettant de modéliser l'humain avec encore plus de finesse. Mais ce n'est là qu'un aspect de la progression à laquelle j'aspire. D'autres enjeux sont soulevés par les perspectives et me semblent autant, voire plus importants. Mes travaux peuvent bénéficier aussi d'un autre apport, non dans les modèles eux-mêmes, mais dans la façon de conduire la modélisation et d'utiliser les modèles afin de mieux prendre en compte l'humain. J'ai commencé à amorcer le virage vers les démarches participatives, que ce soit en modélisation, en simulation ou en aide à la décision. Ce sont des démarches qui tout à la fois me semblent particulièrement intéressantes scientifiquement, mais aussi qui entrent dans mon positionnement de chercheur.

De la place du *Chercheur*, il en a été beaucoup question dans ce manuscrit, à commencer par celle que personnellement j'entends occuper. Cela s'est traduit notamment par l'omniprésence du « je ». Cette démarche peut sembler inhabituelle dans le monde scientifique, où l'on cherche à effacer la singularité. Mais, ce choix assumé, marque ma vision de la pratique scientifique, qui loin d'être objective, se définit toujours dans une nécessaire subjectivité. J'ai déjà discuté dans la **partie 5.3 du Chapitre 4**, de cette subjectivité que beaucoup de chercheurs ont tendance à ignorer ou à nier alors qu'elle est présente dans chaque choix, et donc dans l'acte même de modéliser. Bien évidemment, cela n'induit pas un positionnement purement subjectif ; la science s'inscrit dans une ambition d'objectivité. Mais la pure objectivité n'est jamais accessible, et je préfère expliciter la part subjective de mon travail que de la cacher ou de la nier. Je revendique ainsi, en reprenant les termes posés dans le **Chapitre 1 partie 1**, que l'*objet* ne peut se percevoir, se comprendre, se penser qu'au travers du *sujet*. Le sujet doit aussi affirmer son existence, assumer ses propres choix, justifiant ce recours systématique au « je ». Mais cela ne signifie pas pour autant que ce travail de modélisation émane de ma simple personne. Il est souvent le résultat d'un travail en équipe, d'échanges fructueux entre chercheurs, avec les parties prenantes... La science ne peut avancer que par cet enchevêtrement de compétences et de personnalités qui forme une communauté, ou plutôt des communautés fluctuantes et flexibles. Il me semblait important de réaffirmer ce besoin de collectif pour mener à bien ce travail de modélisation. C'est dans cette perspective que j'ai rédigé la **partie 3.3**.

Finalement, si ce manuscrit a mis en évidence ma vision de la recherche et la façon dont je me positionne en tant que chercheur, il a aussi et surtout cherché à questionner plus généralement la place du *Chercheur*. Au-delà de la problématique, ce manuscrit entend faire œuvre de réflexion. Ces réflexions personnelles, nécessairement liées à un parcours spécifique, m'ont permis, au travers de cet exercice autoréflexif de questionner ma pratique. Un enjeu est de susciter de pareilles réflexions chez le lecteur. Car, si la réponse à la problématique ne peut être que nuancée, c'est aussi que la recherche est avant tout une entreprise de réflexion qui n'apporte jamais de réponse définitive. Elle ne fait que proposer des pistes, des solutions à un temps donné, qui sont appelées à être caduques le temps d'après. Il en va de même pour ces réflexions, qui dans la trajectoire tracée sont amenées à évoluer, à s'affirmer, à disparaître pour laisser place à de nouvelles façons d'aborder la recherche. Mon regard sur la recherche n'a cessé d'évoluer, me conduisant vers de nouvelles envies, que ce soit en termes de systèmes abordés ou de façons de les aborder. Cela traduit une maturation de mon positionnement scientifique qui s'est aussi exprimé au travers de ma montée progressive vers davantage de responsabilités (coordination de projets, proposition de collaborations, implication dans des communautés de chercheurs, etc.). Cette tendance, loin de s'épuiser devrait s'accroître avec l'HDR, qui m'apportera plus d'autonomie quant à l'encadrement des thèses. C'est donc un horizon extrêmement riche d'opportunités et de perspectives qui s'ouvre devant moi, laissant apparaître le fil de ce que pourrait être demain ma recherche.

ANNEXES

Où il sera question de :

Des sigles utilisés dans ce manuscrit,

De mes publications,

De mes projets de recherche,

De mes encadrements scientifiques,

Des références utilisées dans ce manuscrit.

Annexe A

Liste des acronymes et sigles utilisés dans le Manuscrit

Sigle	Type	Signification
ABM	Modèle générique	Agent Based Model – Modèle Agent
AHP	MCDA	Analytic Hierarchy Process
AIPA	Modèle	Argumentation Interface for Participative Approach
ANRT	Organisme	Association Nationale Recherche Technologie
ARD-Fourmi	Modèle	Aide à la réflexion et à la décision pour les <i>Fourmis</i>
AVA	Élément de modèle	Disponibilité du composant
BDI	Modèle générique	Belief Desire Intention model – modèle Croyance Désire Intention
BDS	Organisme	Bordeaux Démolition Service
BIM	Paradigme	Building Information Model – Modèle d’informations du bâtiment
BOR	Paradigme	Behavioral Operational Research – Recherche opérationnelle comportementale
CADAU	Projet	Conception d’une méthode d’Aide à la Décision pour l’Aménagement Urbain
CIFRE	Organisme	Conventions Industrielles de Formation par la Recherche
CMA-ES	Métaheuristique	Covariance matrix adaptation evolution strategy.
CMA-P	Élément de modèle	Conceptual Map - Carte conceptuelle
CNeg	Élément de modèle	Conclusion Négative
COR	Élément de modèle	Conformité réglementaire
CORISMA	Projet	COmmon understanding of RIsk MAManagement in transportation infrastructure systems in view of climate change
CP-HPRM	Modèle	Construction Project Hierarchical Probabilistic Relational Model
CPT	Élément de modèle	Conditional Probability Table - Table de probabilités conditionnelles
CSTB	Organisme	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
CSV	Format	Comma-Separated Values
DBEA	Métaheuristique	Diversity-first sorting based evolutionary algorithm
ECO2D2	Modèle	Economie circulaire et conception d'outil d'optimisation de la stratégie de gestion des déchets de construction
ELECTRE	MCDA	ELimination Et Choix Traduisant la REalité
ESTP	Organisme	Ecole Spéciale des Travaux Publics
FAI-CG	Modèle	Failure analysis model for Civil Engineering structures
FAST	Méthode	Fourier Amplitude Sensitivity Test
HLO	Métaheuristique	High-Level Optimization
HPRM	Modèle générique	Hierarchical Probabilistic Relational Model - modèle relationnel probabiliste multi-niveau
I2M	Organisme	Institut de Mécanique et d’Ingénierie de Bordeaux
IATE	Organisme	Unité Ingénierie des Agro-polymères et Technologies Émergentes
IFC	Format	Industry Foundation Classes
INAD	Élément de modèle	Indice d’inadéquation
LCA/ACV	Modèle générique	Life cycle analysis - Analyse de cycle de vie
Li-BIM	Modèle	Life in Building Information Model
LIG	Organisme	Laboratoire d’Informatique de Grenoble
LOCIE	Organisme	Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l’Environnement
MADS	Modèle générique	Méthodologie d’Analyse des Dysfonctionnements dans les Systèmes
MCDA	Paradigme	MultiCriteria Decision Aiding - Aide à la décision multicritère
MMRMP	Modèle	Multidimensional Model of Risk Management Process - Modèle multidimensionnel de gestion des risques
MO-PSO	Métaheuristique	MultiObjective Particle Swarm Optimization - optimisation par essais particuliers multi-objectif
MOEA/D	Métaheuristique	multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition
MOMKP	Modèle	MultiObjective Multidimensional Knapsack Problem - problème de sac à dos multipoches multi-objectif
MT	Élément de modèle	Micro-Tree - micro-arbres

NSGA	Métaheuristique	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
O3PRM	Logiciel	Open Oriented Object Probabilistic Relational Model
OPTIMAL	Projet	Conception OPTImisée de procédés à MembrAnes visant à l'obtention d'ingrédients Laitiers
PAES	Métaheuristique	Pareto Archived Evolution Strategy
PLU	Réglementation	Plan Local d'Urbanisme
PRM	Modèle générique	Probabilistic Relational Model – Modèle relationnel probabiliste
PSACO	Métaheuristique	Pareto strength ant colony <i>optimization</i>
PSO	Métaheuristique	Particle Swarm Optimization - optimisation par essaims particuliers
RBS	Modèle générique	Risk Breakdown structure – Structure de décomposition des risques
RC	Elément de modèle	Risk Category - Catégorie de risque
RE	Elément de modèle	Risk Event - Evènement risqué
RECOVER	Organisme	Unité Risques, Ecosystèmes, Vulnérabilité, Environnement, Résilience
REMINd	Modèle	Real estate management interactive decision
REPMP	Modèle générique	Real Estate Property Maintenance Problem - Problème de maintenance d'un parc immobilier
RF	Elément de modèle	Risk Factor - Facteur de risque
RNSEA	Métaheuristique	reference vector based non-dominated sorting evolutionary algorithm
RP-MMK	Modèle	Real Property - MultiObjective Multidimensional Knapsack
SA	Elément de modèle	Statement Against
SAT	Elément de modèle	Satisfaction de l'utilisateur
SEN	Elément de modèle	Scénario d'évolution naturelle
SF	Elément de modèle	Statement For
SHADOC	Modèle	Simulation Hydro-Agricole Décivant des modes d'Organisation et de Coordination
SIG	Modèle générique	Système d'Information Géographique
SMACC	Modèle	Stochastic multi-agent model for construction project - Modèle multi-agent stochastique pour les projets de construction
SORIA	Modèle	SOil Risk Analysis for urban planning project
SPEA	Métaheuristique	Strength Pareto Evolutionary Algorithm
SPRITE	Modèle	Modèle de simulation participative pour la gestion des risques territoriaux
SwITCh	Projet	Simulating the transition of transport Infrastructures Toward smart and sustainable Cities
SyRes	Modèle générique	Systemic resilience model - Modèle systémique de la résilience
T-RBS	Modèle	Tailored Risk Breakdown structure
VCF	Organisme	Vinci Construction France
VEGA	Métaheuristique	Vector Evaluated Genetic Algorithm
VMC	Equipement	Ventilation Mécanique Contrôlée

Annexe B Publications

Articles dans des revues Internationales avec Comité de Lecture répertorié

- A1. Baudrit, C., **Taillandier, F.**, Tran T. T. P., & Breysse, D. (2018). Uncertainty Processing and Risk Monitoring in Construction Projects using Hierarchical Probabilistic Relational Models. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, To be published. <http://dx.doi.org/10.1111/mice.12391>
- A2. **Taillandier, F.** & Adam C. (2018). Games Ready to Use: A Serious Game for Teaching Natural Risk Management. *Simulation & Gaming*. To be published. <http://dx.doi.org/10.1177/1046878118770217>
- A3. Lissouck, R.O., R. Pommier, J.K. Mvogo, **F. Taillandier**, D. Breysse, & Ohandja L.M.A. (2018). A decision support tool approach based on Electre TRI-B method, for the valorisation of tropical timbers from the Congo Basin: An application for glulam products. *Southern Forests*. To be published. <http://dx.doi.org/10.2989/20702620.2018.1463153>
- A4. **Taillandier, F.**, Fernandez, C., & Ndiaye, A. (2017). Real Estate Property Maintenance Optimization Based on Multiobjective Multidimensional Knapsack Problem. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(3), 227-251. doi:<http://dx.doi.org/10.1111/mice.12246>
- A5. **Taillandier, F.**, Taillandier, P., Hamzaoui, F., & Breysse, D. (2016). A new agent-based model to manage construction project risks – application to the crossroad of Bab El Karmadine at Tlemcen. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(10), 1197-1213. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2015.1134675>
- A6. **Taillandier, F.**, Mora, L., & Breysse, D. (2016). Decision support to choose renovation actions in order to reduce house energy consumption – An applied approach. *Building and Environment*, 109, 121-134. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.019>
- A7. **Taillandier, F.**, & Breysse, D. (2016). Decision aiding for lower soil risk in urban planning operation. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 1-19. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/10286608.2016.1236595>
- A8. **Taillandier, F.**, Taillandier, P., Tepeli, E., Breysse, D., Mehdizadeh, R., & Khartabil, F. (2015). A multi-agent model to manage risks in construction project (SMACC). *Automation in Construction*, 58, 1-18. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.06.005>
- A9. Hamzaoui, F., **Taillandier, F.**, Mehdizadeh, R., Breysse, D., & Allal, A. (2015). Evolutive Risk Breakdown Structure for managing construction project risks: application to a railway project in Algeria. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(2), 238-262. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2014.939416>
- A10. **Taillandier, F.**, Abi-Zeid, I., Taillandier, P., Sauce, G., & Bonetto, R. (2014). An interactive decision support method for real estate management in a multi-criteria framework – REMIND. *International Journal of Strategic Property Management*, 18(3), 265-278. doi: <http://dx.doi.org/10.3846/1648715X.2014.941432>
- A11. **Taillandier, F.**, & Abi-Zeid, I. (2013). A multicriteria evaluation of real estate properties based on environmental impacts. *International Journal of Multicriteria Decision Making*, 3(4), 303-324. doi: <http://dx.doi.org/10.1504/IJMCDM.2013.056778>
- A12. Mehdizadeh, R., Breysse, D., **Taillandier, F.**, & Niandou, H. (2013). Dynamic and multi perspective risk management in construction with a special view to temporary structures. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 30(2), 115-129. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/10286608.2012.733377>
- A13. Taillandier, P., & **Taillandier, F.** (2012). Multi-criteria diagnosis of control knowledge for cartographic generalisation. *European Journal of Operational Research*, 217(3), 633-642. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2011.10.004>

- A14. Mehdizadeh, R., **Taillandier, F.**, Breyse, D., & Halidou, N. (2012). Methodology and tools for risk evaluation in construction projects using Risk Breakdown Structure. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(sup1), s78-s98. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2012.681959>
- A15. **Taillandier, F.**, Sauce, G., & Bonetto, R. (2011). Method and tools for building maintenance plan arbitration. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 18(4), 343-362. doi:<http://dx.doi.org/10.1108/09699981111145808>
- A16. **Taillandier, F.**, Sauce, G., & Bonetto, R. (2009). Elaboration of a long-term maintenance plan for building stock based on arbitration using a risk approach. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13(4), 383-397. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2009.9693118>
- A17. **Taillandier, F.**, Sauce, G., & Bonetto, R. (2009). Risk-based investment trade-off related to building facility management. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(4), 785-795. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2008.09.005>

Articles acceptés, avec modifications, en cours de ré-expertise

- A18. Queheille, E., **Taillandier, F.**, Saiyouri, N. (2018). Optimization of strategy planning for building deconstruction. *Automation in Construction*, resoumis le 07/09/18.
- A19. Micolier, A., **Taillandier, F.**, Taillandier, P., & Bos, F. (2018) Li-BIM: an advanced cognitive model to simulate the occupant behavior and its indoor comfort from Building Information Modeling, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, resoumis le 28/08/18.
- A20. **Taillandier, F.**, Baudrit, C., Breyse, D., & Tran T. T. P. (2018). Multi-Agent Systems versus Probabilistic Relational Models to process uncertainty and simulate the behavior of construction projects, *Journal of Construction Engineering and Management*, resoumis le 08/09/18.
- A21. Baudrit, C., Boukhelifa, N., **et al.** (2018) Multicriteria reverse engineering for food: Genesis and ongoing advances, *Food Engineering Reviews*, resoumis le 02/09/18.
- A22. Tepeli, E., **Taillandier, F.**, & Breyse, D. (2018) Multidimensional Modelling of Complex and Strategic Construction Projects for a More Effective Risk Management, *International Journal of Construction Management*, resoumis le 05/09/18.

Articles dans des revues Nationales avec Comité de Lecture

1. **Taillandier, F.**, Adam, C., Delay, E., Plattard, O., & Tourni, M. (2017). SPRITE – un modèle de simulation participative pour la sensibilisation au risque de submersion marine sur l'île d'Oléron. *Les Annales du Bâtiment et des travaux Publics*, 68(5-6), 38-47.
2. **Taillandier, F.**, Ndiaye, A., & Fernandez, C. (2012). Optimisation par essaim particulière de la planification des actions de maintenance d'un parc immobilier. *Les Annales du Bâtiment et des travaux Publics*, 6, 48-54.

Communications avec actes dans un congrès international avec comité de lecture

Conférences en informatique (Sélection équivalente à un article de revue et actes publiés)

- C1. **Taillandier, F.**, & Adam, C. (2017, 25-29 september 2017). *A serious game for teaching natural risk management*. Paper presented at the Social Simulation Conference 2017, Dublin (Ireland). To appear in: *Social Simulation for a Digital Society – Applications and Innovations in Computational Social Science*, Springer Proceedings in Complexity series.
- C2. Adam, C., **Taillandier, F.**, Delay, E., Plattard, O., & Toumi, M. (2016). *SPRITE – participatory simulation for raising awareness about coastal flood risk on the Oleron island*. Paper presented at the ISCRAM-med 2016, Madrid (Espagne), published in P. Díaz, N. Bellamine Ben Saoud, J. Dugdale, & C. Hanachi (Eds.), *Information Systems for Crisis Response and Management in Mediterranean Countries: Third International Conference, ISCRAM-med 2016, Madrid, Spain, October 26-28, 2016, Proceedings* (pp. 33-46). Cham: Springer International Publishing.

- C3. **Taillandier, F.,** & Taillandier, P. (2014, 4-6 juin 2014). *Risk Management in Construction Project Using Agent-Based Simulation*. Paper presented at the Agent-based modeling and simulation of complex systems: engineering and applications, Salamanca (Spain), published in J. M. Corchado, J. Bajo, J. Kozlak, P. Pawlewski, J. M. Molina, B. Gaudou, V. Julian, R. Unland, F. Lopes, K. Hallenborg, & P. García Teodoro (Eds.), *Highlights of Practical Applications of Heterogeneous Multi-Agent Systems. The PAAMS Collection: PAAMS 2014 International Workshops, Salamanca, Spain, June 4-6, 2014. Proceedings* (pp. 34-43). Cham: Springer International Publishing.

Autres conférences internationales

- C4. Breysse, D., **Taillandier, F.,** & Baudrit, C. (2018). *Knowledge model for forensics in civil engineering*, IABSE 40th symposium, 17-19 september, Nantes, France.
- C5. Micolier, A., **Taillandier, F.,** Sonnemann, G., & Bos, F. (2018). *How can Agent-based Modeling improve decision making in Life Cycle Assessment?*. Paper presented at the SETAC 2018, 13-17 may, Rome, Italia.
- C6. Tepeli, E., Breysse, D., Khartabil, F., **Taillandier, F.,** Mehdizadeh, R., & Morand, D. (2013). *Project risk management in construction projects: developing modeling tools to favour a multidisciplinary approach*. Paper presented at the 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, New-York, Etats-Unis.
- C7. Loschette, A., Bails, A., Lebert, F., **Taillandier, F.,** Lataste, J. F., Breysse, D., Douguet, J. M. (2013, 27-29 Mai 2013). *Tools for integrating soil and sub-soil in sustainable urban planning*. Paper presented at the 6th International Conference on Sustainable Development and Planning, Kos (Grèce).
- C8. Loschette, A., Bails, A., **Taillandier F.,** Douguet, J. M., Lebert, F., Lataste, J. F., Garnier, M. (2013, 3-5 décembre 2013). *Tools for integrating soil and sub-soil in sustainable urban planning*. Paper presented at the 8th International Conference on Urban Regeneration and Sustainability, Putrajaya (Malaisie).
- C9. **Taillandier, F.,** & Irène, A.-Z. (2013, 18-21 aout 2013). *Multicriteria decision analysis for the choice of timber in building structures*. Paper presented at the International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies, Kyoto (Japon).
- C10. Breysse D., Mehdizadeh, R., & **Taillandier, F.** (2013, 16-17 avril 2013). *Systemic analysis of risks in project management and safety issues*. Paper presented at the Fifth International Conference on Forensic Engineering, Londres (Grande-Bretagne).
- C11. Breysse, D., Tepeli, E., Khartabil, F., **Taillandier, F.,** Mehdizadeh, R., & Morand, D. (2013, 16-20 juin 2013). *Project risk management in construction projects: developing modeling tools to favour a multidisciplinary approach*. Paper presented at the 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, New-York (Etats-Unis).
- C12. Garnier, M., Loschetter, A., Douguet, J. M., & **Taillandier, F.** (2012). *Support decision tools to lower risks in urban planning operation*. Paper presented at the 43rd European Safety, Reliability & Data Association, Rouen, France.
- C13. **Taillandier, F.,** Sauce, G., & Bonetto, R. (2009). *The risk notion to transcend the real estate management complexity*. Paper presented at the The Fifth International Structural Engineering and Construction Conference (ISEC-5).
- C14. **Taillandier, F.,** Sauce, G., & Bonetto, R. (2009). *Apology of the risk as the key to drive the real-estate*. Paper presented at the International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM), Montréal, Canada.
- C15. **Taillandier, F.,** Bonetto, R., & Sauce, G. (2008). *A method for maintenance plan arbitration in buildings facilities management*. Paper presented at the ECPPM 2008, Sophia Antipolis, France.

Communications avec actes dans un congrès national avec comité de lecture

1. Quéheille E., **Taillandier F.**, Saiyouri N., *Optimisation de stratégies de chantier et de gestion des déchets pour la déconstruction de bâtiments*. Paper presented at the 36èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil, Saint-Etienne, France, 20-22 Juin, 2018.
2. Thioub, S., Graziani, O., **Taillandier F.**, *Vers une scénarisation non déterministe de l'usage d'un bâtiment*. Paper presented at the 36èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil, Saint-Etienne, France, 20-22 Juin, Poster, 2018.
3. **Taillandier F.**, Micolier A., Chaplain M., *Domego, un jeu sérieux pour l'apprentissage de la gestion d'une opération de construction*. Paper presented at the 36èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil, Saint-Etienne, France, 20-22 Juin, 2018.
4. Ndinga Okina S., **Taillandier F.**, Baudrit C., Breysse D., Louzolo-Kimbembe P., *Ontologie intégrée à l'analyse de dysfonctionnement d'ouvrages existants*. Paper presented at the 36èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil, Saint-Etienne, France, 20-22 Juin, 2018.
5. Delhomme, B., **F. Taillandier** and L. Mora (2018). *Un outil participatif d'aide à la décision appuyé par un système d'argumentation pour la réhabilitation thermique d'un parc de bâtiments*. Paper presented at the IBPSA. Bordeaux.
6. Micolier, A., **F. Taillandier**, P. Taillandier and F. Bos (2018). *Li-BIM: un modèle cognitif avancé simulant le comportement de l'occupant et son confort à partir d'une maquette numérique*. Paper presented at the IBPSA. Bordeaux.
7. Delhomme, B., **Taillandier, F.**, & Mora, L. (2018). *Aide à la rénovation d'un parc immobilier de logements sociaux par le couplage d'aide à la décision multicritère et d'approche argumentative*. Paper presented at the JFMS, Bordeaux.
8. **Taillandier, F.**, Baudrit, C., Hoang, Q. A., Okina, S. N., & Breysse, D. (2018). *Modèle de connaissance pour l'ingénierie forensique en Génie Civil*. Paper presented at the JFMS, Bordeaux.
9. Baudrit, C., **Taillandier, F.**, Tran, P. T. T., & Breysse, D. (2018). *Modèles relationnels probabilistes pour gérer l'incertitude dans le déroulement des projets de construction*. Paper presented at the JFMS, Bordeaux.
10. **Taillandier, F.**, Delhomme, B., Abi-Zeid, I., Thomopoulos, R., Baudrit, C., & Mora, L. (2017). *Designing an argumentative decision-aiding method for urban planning*. Paper presented at the 7ème colloque du réseau OPDE, Montpellier (France).
11. **Taillandier, F.**, & Adam, C. (2017). *SPRITE, un jeu sérieux pour l'enseignement de la gestion des risques naturels à l'Université de Bordeaux*. Paper presented at the Journée "jeux informatisés & IA" @ PFIA, Caen, France.
12. **Taillandier, F.**, & Adam, C. (2017). *SPRITE, un jeu sérieux pour l'enseignement de la gestion des risques naturels à l'Université de Bordeaux*. Paper presented at the Jeux et Enjeux, La Rochelle, France.
13. **Taillandier, F.**, Taillandier, P., & Micolier, A. (2017). *Li-BIM – Simulation du comportement des occupants d'un bâtiment à partir d'une maquette numérique*. Paper presented at the 35èmes RUGC, Nantes.
14. Queheille, E., Saiyouri, N., **Taillandier, F.**, & Guerlou, P. (2017). *Économie Circulaire et conception d'Outil d'Optimisation de la stratégie de gestion des Déchets de Déconstruction (ECO2D2) – Présentation du projet et du contexte d'étude*. Paper presented at the 35èmes RUGC, Nantes.
15. Micolier, A., **Taillandier, F.**, N'Diaye, A., Perry, N., Sonnemann, G., & Bos, F. d. r. (2017). *Couplage de la qualité de l'air intérieur et des performances environnementales dans un outil d'aide à la décision en phase conception des bâtiments*. Paper presented at the 35èmes RUGC, Nantes.
16. Hoang, Q. A., Breysse, D., **Taillandier, F.**, & Baudrit, C. (2017). *Aggregate heterogeneous knowledge about civil engineering failures by means of ontology to improve practices*. Paper presented at the 35èmes RUGC, Nantes.

17. **Taillandier, F.**, Adam, C., Delay, E., Plattard, O., & Tourni, M. (2016). *SPRITE – un modèle de simulation participative pour la sensibilisation au risque de submersion marine sur l'île d'Oléron*. Paper presented at the 34èmes RUGC (Belgique).
18. Tran, T. T. P., **Taillandier, F.**, Baudrit, C., & Breysse, D. (2016). *Coupling Ontology and Probability to manage risks in construction projects*. Paper presented at the 34èmes RUGC, Liège (Belgique).
19. Hamzaoui, F., **Taillandier, F.**, & Breysse, D. (2016). *Management des risques dans les projets de construction par le couplage du modèle agent SMACC avec la méthode MADS MOSAR – Application au projet de barrage TAHT à Mascara en Algérie*. Paper presented at the 34èmes RUGC, Liège (Belgique).
20. Baudrit, C., Tran, T. T. P., **Taillandier, F.**, & Breysse, D. (2016). *Représentation holistique des projets de construction à l'aide de modèles relationnels probabilistes*. Paper presented at the 27èmes Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances, Montpellier (France).
21. **Taillandier, F.**, Mora, L., Breysse, D., & Sarrazin, M. (2015). *Aide au choix d'un bouquet de travaux pour diminuer les consommations énergétiques d'une maison -Application au quartier de Malartic à Gradignan*. Paper presented at the 33èmes RUGC, Anglet.
22. **Taillandier, F.**, Hamzaoui, F., Taillandier, P., & Breysse, D. (2015). *Un nouveau modèle à base d'agents pour gérer les risques d'un projet de construction -Application au carrefour de Bab El Karmadine à Tlemcen*. Paper presented at the 33èmes RUGC, Anglet.
23. Ndiaye, A., **Taillandier, F.**, Leconte, N., Garnier-Lambrouin, F., Sobantka, A., Fernandez, C., & Gésan-Guiziou, G. (2015). *Knowledge book on milk microfiltration: An INRA project to identify key actions in research on proteins fractionation*. Paper presented at the 10th European Congress of Chemical Engineering, Nice (France).
24. **Taillandier, F.**, Taillandier, P., & Breysse, D. (2014). *Recours à un modèle multi-agent (SMACC) pour la maîtrise des risques dans les projets de construction*. Paper presented at the JFMS, Aix-en-Provence.
25. Bennabi, A., Elachachi, S.M., **Taillandier, F.**, & Talon, A. (2018). *Gestion patrimoniale d'un réseau d'assainissement : incertitudes, robustesse et solution optimale* Paper presented at the JFMS, Aix-en-Provence.
26. **Taillandier, F.** (2014). *Aide à la décision pour l'aménagement urbain par une approche argumentative*. Paper presented at the 32èmes RUGC, Orléans.
27. Rodney, E., Khartabil, F., **Taillandier, F.**, Hamzaoui, F., Breysse, D., Ducq, Y., & Ledoux, Y. (2014). *Apport de l'ingénierie des connaissances au management des risques de projets de construction*. Paper presented at the 32èmes RUGC, Orléans.
28. Tepeli, E., Breysse, D., **Taillandier, F.**, Niandou, H., Demilecamps, L., Denat, A., & Hudrisier, B. (2013). *Processus Formalisé et Systémique de Management des Risques pour des Projets de Construction Complexes et Stratégiques*. Paper presented at the 21ème Congrès Français de Mécanique, Bordeaux.
29. Sbartai, Z. M., & **Taillandier, F.** (2013). *Aide à la priorisation de bâtiments à rénover par le recours à la CND et à une analyse multicritère*. Paper presented at the 21ème Congrès Français de Mécanique, Bordeaux.
30. Khartabil, F., Breysse, D., & **Taillandier, F.** (2013). *On the risk management of construction project: a knowledge-based approach*. Paper presented at the 21ème Congrès Français de Mécanique, Bordeaux.
31. Tepeli, E., Breysse, D., **Taillandier, F.**, Demilecamps, L., Denat, A., & Hudrisier, B. (2013). *Processus formalisé et systémique de management des risques pour des projets de construction complexes et stratégiques*. Paper presented at the 31èmes RUGC, Cachan.
32. **Taillandier, F.**, Aries, S., Ndiaye, A., Leblanc, B., Fernandez, C., & Labat, F. (2013). *Comment améliorer les performances thermiques de ma maison ? Une affaire d'expert !* Paper presented at the 31èmes RUGC, Cachan.

33. Sbartai, Z. M., & **Taillandier, F.** (2013). *Hiérarchisation de la maintenance d'un parc immobilier par auscultation visuelle et CND - développement méthodologique et étude de cas.* Paper presented at the 31èmes RUGC, Cachan.
34. Khartabil, F., Breysse, D., & **Taillandier, F.** (2013). *Développement d'une base de connaissance pour la maîtrise de risques de projets de construction.* Paper presented at the 31èmes RUGC, Cachan.
35. **Taillandier, F.**, & Taillandier, P. (2013). *SMACC : Gestion des risques dans les projets de construction par simulation multi-agent.* Paper presented at the Modélisation Agents pour les Systèmes Complexes, Lille.
36. Tepeli, E., Breysse, D., Demilecamps, L., **Taillandier, F.**, Denat, A., & Hudrisier, B. (2012). *Etude de l'environnement d'un projet de construction complexe et stratégique.* Paper presented at the Journées de l'Association Universitaire de Génie Civil, Chambéry.
37. **Taillandier, F.**, Hamzaoui, F., Mehdizadeh, R., Breysse, D., & Allal, A. (2012). *Gestion des projets de construction par des RBS évolutives – Application à un réseau de voie ferrée en Algérie.* Paper presented at the Journées de la Fiabilité des Matériaux et des Structures, Chambéry.
38. Reboza, A., Talon, A., Elachachi, S. M., Breul, P., & **Taillandier, F.** (2012). *Prise en compte des incertitudes pour sélectionner une stratégie de gestion des réseaux d'assainissement.* Paper presented at the Journées de l'Association Universitaire de Génie Civil, Chambéry.
39. Lissouk, R. O., Pommier, R., Castera, P., Ayina-Ohandja, L. M., Njungab, E., **Taillandier, F.**, . . . Lanvin, J. D. (2012). *Ingénierie du bois comme outil de conservation de la diversité des essences ligneuses des forêts tropicales : cas du bassin du Congo.* Paper presented at the Journées de l'Association Universitaire de Génie Civil, Chambéry.
40. **Taillandier, F.**, Mehdizadeh, R., & Breysse, D. (2011). *Evaluation et agrégation des risques pour les projets de construction par le recours aux Risk Breakdown Structures.* Paper presented at the 29èmes Rencontre Universitaires de Génie Civil, Tlemcen (Algérie).
41. **Taillandier, F.**, & Abi-Zeid, I. (2011). *Stratégie environnementale dans la gestion d'un parc immobilier.* Paper presented at the 29ième Rencontres de l'AUGC, Tlemcen (Algérie).
42. Mehdizadeh, R., Breysse, D., **Taillandier, F.**, & Niandou, H. (2011). *Advanced methodology of Risk breakdown structure developing for risk management of tunneling and construction projects.* Paper presented at the 29èmes Rencontre Universitaires de Génie Civil, Tlemcen (Algérie).
43. Mehdizadeh, R., Breysse, D., **Taillandier, F.**, & Niandou, H. (2011). *RBS (Risk breakdown structure) : une méthodologie pour la gestion des risques des projets de construction.* Paper presented at the Journées Techniques Génie Civil, Cachan.
44. **Taillandier, F.**, Sauce, G., & Bonetto, R. (2009). *Modélisation de la prise de décision pour piloter un parc immobilier.* Paper presented at the 27ième Rencontres de l'AUGC, Saint-Malo.
45. **Taillandier, F.**, Sauce, G., & Bonetto, R. (2008). *Elaboration d'un plan pluriannuel de maintenance d'un parc immobilier sur la base d'un arbitrage par les risques.* Paper presented at the 26ième Rencontres de l'AUGC, Nancy.

Communications sans actes dans un Congrès International ou National

1. **Taillandier, F.**, Delhomme, B., Abi-Zeid, I., Thomopoulos, R., Baudrit, C., & Mora, L. (2017). *Designing an argumentative decision-aiding method for urban planning.* Paper presented at the 86th Meeting of the European Working Group «Multiple Criteria Decision Aiding», Paris.
2. **Taillandier, F.**, Pommier, R., Fernandez, C. Ndiaye A. & Oum Lissouck, R. *Optimisation de l'utilisation du pin maritime.* Paper presented at the 80th Meeting of the European Working Group «Multiple Criteria Decision Aiding», Québec, Canada.
3. **Taillandier, F.**, & Abi-Zeid, I. (2010). *Multicriteria decision support for real estate property management: Elaboration of an environmental action plan.* Paper presented at the 71st Meeting of the European Working Group «Multiple Criteria Decision Aiding», Turin, Italy.

Annexe C

Projets de recherche

Projets ANR

- P1. **REHA-PARCS (2015-2019)** : Aide à la décision interactive pour la réhabilitation de parcs de bâtiments. **Responsable** de la tâche 4. **Co-encadrement** d'une thèse commencée en décembre 2016 (Benjamin Delhomme), sur le développement d'une approche d'aide à la décision interactive pour le choix d'une stratégie de rénovation du parc immobilier de bailleurs sociaux.
- P2. **INCERDD (2011-2015)** : Prise en compte des incertitudes pour des décisions durables **Participation** au projet et à l'encadrement du post-doctorat d'Amine Bennabi sur l'élaboration d'une stratégie de maintenance des réseaux d'eau usée.
- P3. **D2SOU (2010-2014)** : Les sols et sous-sols comme critères de durabilité des opérations d'aménagement : développement durable et sols urbains ; **Participation** au projet, élaboration d'un outil quantitatif d'aide à la décision à destination des aménageurs pour leur permettre de mieux prendre en considération les risques liés au sol et sous-sol.
- P4. **GERMA (2007-2011)** : Maitrise et Gestion des Risques liés au Management des projets complexes de génie civil, **Participation** au projet et à la thèse de Rasool Mehdizadeh ayant conduit à des publications.

Projet Région Aquitaine / Nouvelle Aquitaine

- P5. **ECO2D2 (2016-2019)** : Economie circulaire et conception d'outil d'optimisation de la stratégie de gestion des déchets de construction – **Co-encadrement** d'une thèse commencée en octobre 2016 (Eva Queheille) sur l'élaboration d'un outil d'aide à la décision pour le choix d'une stratégie de déconstruction.
- P6. **QUALIPIN (2015-2019)** : Caractériser mécaniquement et chimiquement le bois issu des nouvelles ressources en pin maritime en Aquitaine pour ensuite pouvoir aider la filière à s'adapter à ces ressources. **Participation** au volet 3 : « Composites structuraux et critères de qualité associés : panachage de performances et d'essences ».
- P7. **FOURMINERGIE (2011-2015)** : Développement d'un outil d'aide à la décision pour l'amélioration thermique de l'habitat – Application au quartier de Malartic à Gradignan **Participation** au projet et développement de l'outil d'aide à la décision.

Autres types de projet

- P8. **ADEME-ECOMATFIB (2014-2018)** : Eco-conception et optimisation multi-objectifs de matériaux isolants à base de fibres de bois. **Participation** au projet et à l'élaboration de l'outil d'aide à la décision prévu dans le projet.
- P9. **BAITYKOOL (2016-2018)** : Projet de maison solaire pour participer au concours international Solar Decathlon Middle East. **Encadrement** d'étudiants en Génie civil pour l'ingénierie de la maison solaire.
- P10. **AAP Bretagne OPTIMAL (2017-2020)** : Conception optimisée de procédés à membranes visant à l'obtention d'ingrédients Laitiers. **Participation** à l'élaboration de l'outil d'optimisation et à la réalisation d'un livre de connaissance.

Coordination de projet

P11. CNRS PICS-CADAU (2017-2020) : Conception d'une méthode d'Aide à la Décision pour l'Aménagement Urbain.

Partenaires : Université de Bordeaux (I2M/GCE), Université Laval (Canada) et UMR IATE (Montpellier).

Résumé du projet : L'aménagement urbain est un enjeu important pour toutes les villes. Mais concevoir un projet d'aménagement est complexe, encore plus dans une perspective de développement durable, où l'on doit considérer les dimensions économiques, sociales et environnementales, les enjeux à long terme ainsi que les différents points de vue (de l'aménageur, des riverains, etc.). Pour répondre à ce défi, nous proposons d'utiliser une approche d'aide à la décision couplant une méthode multicritère avec l'approche argumentative. Cette approche est basée sur une modélisation dynamique et la formalisation explicite des opinions et des préférences des différents acteurs leur permettant de voir la décision se construire tout en mesurant leur contribution à cette décision. Cela permet, in fine, à chacun de mieux accepter la décision finale. Cette approche innovante et émergente n'a pour l'instant jamais été utilisée pour l'aménagement durable. Ce projet permettra aussi des développements méthodologiques autour de l'approche argumentative et son utilisation pour formaliser le problème décisionnel.

Projet déposé dans les AAP 2018 en tant que coordinateur

P12. Porteur d'un projet ANR PRC SwITCh (Simulating the transition of transport Infrastructures Toward smart and sustainable Cities). **Projet accepté pour la deuxième phase** (soumission d'une proposition complète).

Partenaires : Université de Bordeaux (I2M/GCE), Université de Grenoble (LIG/MAGMA), Université de Toulouse (IRIT/SMAC), Université de Bourgogne-Franche-Comté (ThéMA/MCT)

Résumé du projet : Les infrastructures de transport participent à la définition de ce que sera la ville de demain (intelligente et durable). Le projet SwITCh vise à proposer un outil d'aide à l'aménagement urbain capable de (a) simuler les infrastructures de transport urbain, en termes de dynamique journalière (trafic) et annuelle (dégradation des routes), en considérant la transition vers la ville du futur (voitures autonomes, infrastructures connectées...), (b) mesurer leur impact selon des indicateurs de performance (pollution, impact économique...), (c) permettre à l'utilisateur de modifier les infrastructures et de tester différentes stratégies de gestion. SwITCh utilise la modélisation agent et la simulation participative comme cadre unificateur pour coupler différents modèles et différentes échelles (modèle holistique). Il intégrera un modèle de la ville basé sur des données SIG et un modèle réaliste de comportement de la population. L'outil sera utilisé pour deux cas d'études : Bordeaux et Dijon.

Annexe D

Encadrements scientifiques

Doctorat

Doctorat en cours (encadrement officiel)

- F1. **Benjamin Delhomme** : Aide à la décision interactive pour la réhabilitation d'un parc de bâtiments.
Début : 01/12/2016
Financement : projet ANR REHA-PARCS
Autres encadrants : Laurent Mora et Denys Bresse
Publications : D1, D4, E1
- F2. **Alice Micolier** : Optimisation couplée de la performance énergétique et de la qualité de l'air des bâtiments en phase de conception.
Début : 01/10/2016
Financement : Allocation Université de Bordeaux
Autres encadrants : Guido Sonnemann, Nicolas Perry et Frederic Bos
Publications : A18, A23, C14, D9
- F3. **Eva Queheille** : Conception d'un outil d'aide à la décision pour optimiser la déconstruction de bâtiments.
Début : 01/10/2016
Financement : CIFRE (BDS) et projet ECO2D2
Autres encadrants : Nadia Saiyouri
Publications : A17, D8
- F4. **Quynh Anh Hoang** : Analyzing data from civil engineering failures and formalizing knowledge for improving construction practice
Début : 01/03/2016
Financement : Gouvernement vietnamien
Autres encadrants : Denys Breysse et Cédric Baudrit
Publications : D2, D10

Doctorat en cours (participation active à l'encadrement)

- F5. **Maellis Belna** : Développement d'un système informatisé d'aide à la conception de procédés optimisés de fractionnement de protéines.
Début : 01/10/2017
Financement : CIFRE (Boccard) & projet Région Bretagne OPTIMAL
Autres encadrants : Amadou Ndiaye et Geneviève Gésan-Guiziou

Doctorat achevé

- F6. **Thi Thuy Phuong Tran** : Maîtrise des risques des projets de construction et modélisation de la connaissance.
Début : 01/10/2014
Soutenance : 14/02/2018
Financement : Gouvernement vietnamien
Autres encadrants : Denys Breysse et Cédric Baudrit
Publications : A19, A23, D3, D12
Devenir post-thèse : Actuellement à Brest (son mari y est en post-doc) en « congés maternité » (naissance de jumeaux en décembre 2017).

Doctorat achevé (participation active à l'encadrement et au jury)

- F7. **Esra Tepeli** : Management des risques de projets de construction complexes et stratégiques.
Début : 15/04/2011
Soutenance : 07/07/2014
Financement : CIFRE (Vinci Construction France)
Autres encadrants : Denys Breysse et Halidou Niandou
Publications : A7, A20, C4, C9, D22, D25, D30
Devenir post-thèse : Consultante en gestion de projet à PMI (Project Management Institute), aux Etats-Unis.
- F8. **Rasool Mehdizadeh** : Dynamic and multi-perspective risk management of construction projects using tailor-made Risk Breakdown Structures
Début : 01/04/2009
Soutenance : 04/06/2012
Financement : Projet ANR GERMA
Autres encadrants : Denys Breysse et Halidou Niandou
Publications : A7, A8, A11, A13, C4, C8, C9, D31, D34, D36, D37
Devenir post-thèse : Maître de Conférences à l'Ecole des Mines de Nancy.

Doctorat achevé (participation à la production scientifique)

- F9. **Mohamad Hobballah** : Conception multi-objectifs d'un isolant thermique bio-sourcé optimisé : du recueil des connaissances à l'aide à la décision interactive
Début : 13/10/2014
Soutenance : 12/12/17
Financement : ADEME (Projet ECOMATFIB)
Encadrants : Mark Irle, Amadou Ndiaye et Franck Michaud.
Publications : A24
Devenir post-thèse : Post-doctorat à l'INRIA (Grenoble).
- F10. **René Oum Lissouck** : Classification multicritère et collage structural d'essences de bois du bassin du Congo, limitant l'impact sur la biodiversité
Début : 14/03/2011
Soutenance : 02/07/2014
Financement : Projet
Encadrants : Régis Pommier, Denys Breysse et Louis max Ohandja ayina.
Publications : A2, D33, E2
Devenir post-thèse : Enseignant chercheur à l'Université de Yaoundé 1.

Post-Doctorat

G1. **Amine Bennabi** : Elaboration d'une stratégie de maintenance des réseaux d'eau usée.

Dates : du 15/09/2013 au 15/09/14

Financement : Projet ANR-INCERDD

Autres encadrants : Mohammed Elachachi

Publications : A25, D19

Master

H1. **Vincent Glachant** : Eco-conception d'un bâtiment par une approche systémique.

Dates : du 02/02/2015 au 31/07/2015

Autres encadrants : Nicolas Perry et Amadou Ndiaye

Annexe E

Références

- Abdellaoui, M., A. Driouchi and O. L'Haridon (2011). "Risk aversion elicitation: reconciling tractability and bias minimization." *Theory and Decision* 71(1): 63-80.
- Abdi, H. (2007). *Discriminant correspondence analysis*. Encyclopedia of Measurement and Statistics, Thousand Oaks (CA): Sage.
- Abdullah, A. and C. J. Anumba (2002). - Decision model for the selection of demolition techniques. *Advances in Building Technology*. M. Anson, J. M. Ko and E. S. S. Lam. Oxford, Elsevier: 1671-1679.
- Abrahamson, P., O. Salo, J. Ronkainen and J. Warsta (2002). *Agile software development methods: Review and analysis*, 478.
- Adam, C. and B. Gaudou (2017). "Modelling Human Behaviours in Disasters from Interviews: Application to Melbourne Bushfires." *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 20(3).
- Adeli, H. and K. C. Sarma (2006). *Cost Optimization of Structures: Fuzzy Logic, Genetic Algorithms, and Parallel Computing*, John Wiley & Sons, Inc.
- Alan, S. K. (1994). "Why Do We Worry When Scientists Say There Is No Risk?" *Disaster Prevention and Management: An International Journal* 3(2): 15-22.
- Alanne, K. (2004). "Selection of renovation actions using multi-criteria "knapsack" model." *Automation in Construction* 13(3): 377-391.
- Alexander, D. E. (2000). *Confronting Catastrophe: New Perspectives on Natural Disasters*, Oxford University Press.
- Ali, R., S. James, W. I. Liang and L. Cynthia (2015). "Risk management implementation in small and medium enterprises in the UK construction industry." *Engineering, Construction and Architectural Management* 22(1): 91-107.
- Almeida-Dias, J., J. R. Figueira and B. Roy (2010). "Electre Tri-C: A multiple criteria sorting method based on characteristic reference actions." *European Journal of Operational Research* 204(3): 565-580.
- Alwash, M., D. Breyse And Z.-M. Sbartai (2015). *Amélioration de la méthodologie d'évaluation non destructive de la résistance mécanique du béton dans les structures existantes*. Rencontres Universitaires de Génie Civil. Bayonne, France.
- Amblard, F., J. Rouchier, P. Bommel, F. Varenne and D. Phan (2006). *Evaluation et validation de modèles multi-agents. Modélisation et simulation multi-agents : applications aux Sciences de l'Homme et de la Société*. P. D. Amblard Frédéric. Paris, France, Hermes Science Publications: 103-140.
- Amgoud, L. and J. Ben-Naim (2013). *Ranking-Based Semantics for Argumentation Frameworks. Scalable Uncertainty Management*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- Amgoud, L., J.-F. Bonnefon and H. Prade (2005). *An Argumentation-Based Approach to Multiple Criteria Decision*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- Andersen, R. K., V. Fabi and S. P. Corngati (2016). "Predicted and actual indoor environmental quality: Verification of occupants' behaviour models in residential buildings." *Energy and Buildings* 127: 105-115.
- Anderson, K., S. Lee and C. Menassa (2014). "Impact of Social Network Type and Structure on Modeling Normative Energy Use Behavior Interventions." *Journal of Computing in Civil Engineering* 28(1): 30-39.
- Antona, M. and F. Bousquet (2017). *Une Troisième voix entre l'Etat et le Marché - Echanges avec Elinor Ostrom*. Paris, Editions Quae.

Anumba, C. J., Z. Ren, A. Thorpe, O. O. Ugwu and L. Newnham (2003). "Negotiation within a multi-agent system for the collaborative design of light industrial buildings." *Advances in Engineering Software* 34(7): 389-401.

Arroyo, P. (2014). *Exploring Decision-Making Methods for Sustainable Design in Commercial Buildings*, University of California.

Asafuddoula, M., T. Ray and R. Sarker (2013). *A Decomposition Based Evolutionary Algorithm for Many Objective Optimization with Systematic Sampling and Adaptive Epsilon Control*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.

Asch, S. E. (1951). *Effects of group pressure upon the modification and distortion of judgments. Groups, leadership and men; research in human relations*. Oxford, England, Carnegie Press: 177-190.

Assaf, S. A. and S. Al-Hejji (2006). "Causes of delay in large construction projects." *International Journal of Project Management* 24(4): 349-357.

Atkinson, K., T. Bench-Capon and S. Modgil (2006). *Argumentation for Decision Support. Database and Expert Systems Applications*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.

Atkinson, R. (1999). "Project management: cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, its time to accept other success criteria." *International Journal of Project Management* 17(6): 337-342.

Azar, E. and C. Menassa Carol (2012). "Agent-Based Modeling of Occupants and Their Impact on Energy Use in Commercial Buildings." *Journal of Computing in Civil Engineering* 26(4): 506-518.

Bahrami, M., D. H. Bazzaz and S. M. Sajjadi (2012). "Innovation and Improvements In Project Implementation and Management; Using FMEA Technique." *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 41: 418-425.

Bahri, O., E.-G. Talbi and N. Ben Amor (2018). "A generic fuzzy approach for multi-objective optimization under uncertainty." *Swarm and Evolutionary Computation* 40: 166-183.

Baker, R., E. Matulich and R. Papp (2007). "Teach Me In The Way I Learn: Education And The Internet Generation." *Journal of College Teaching & Learning* 4(4): 27-32.

Baldi, P., P. Sadowski and Z. Lu (2017). "Learning in the machine: The symmetries of the deep learning channel." *Neural Networks* 95: 110-133.

Bamdad, K., M. E. Cholette, L. Guan and J. Bell (2017). "Ant colony algorithm for building energy optimisation problems and comparison with benchmark algorithms." *Energy and Buildings* 154: 404-414.

Bana e Costa, C. A. (1986). "A multicriteria decision aid methodology to deal with conflicting situations on the weights." *European Journal of Operational Research* 26(1): 22-34.

Bana E Costa, C. A. (2001). "The use of multi-criteria decision analysis to support the search for less conflicting policy options in a multi-actor context: case study." *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 10(2): 111-125.

Banias, G., C. Achillas, C. Vlachokostas, N. Moussiopoulos and I. Papaioannou (2011). "A web-based Decision Support System for the optimal management of construction and demolition waste." *Waste Management* 31(12): 2497-2502.

Barreau, H. (2013). *L'épistémologie*. Paris, PUF.

Barreteau, O., M. Antona, P. D'Aquino, S. A. S., S. Boissau, F. Bousquet, W. Daré, M. Etienne, C. L. Page, R. Mathevet, G. Trébuil and J. Weber (2003). "Our Companion Modelling Approach." *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 6(1).

Barreteau, O., F. Bousquet, M. Etienne, V. Souchère and P. D'Aquino (2010). *La modélisation d'accompagnement : une méthode de recherche participative et adaptative. La modélisation d'accompagnement: une démarche d'appui au développement durable*, Editions Quae.

Battiti, R. and G. Tecchiolli (1994). "The Reactive Tabu Search." *ORSA Journal on Computing* 6(2): 126-140.

Baudrit, C., F. Taillandier, T. T. P. Tran and D. Breyse (2018). "Uncertainty Processing and Risk Monitoring in Construction Projects Using Hierarchical Probabilistic Relational Models." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 0(0).

Baumann, O., S. d'Auzon and C. Bourdoiseau (2015) "Grands projets : pourquoi ça dérape ?" *Le Moniteur*.

Baykasoğlu, A. and F. B. Ozsoydan (2014). "An improved firefly algorithm for solving dynamic multidimensional knapsack problems." *Expert Systems with Applications* 41(8): 3712-3725.

Becu, N., M. Amalric, B. Anselme, E. Beck, X. Bertin, E. Delay, N. Long, N. Marilleau, C. Pignon-Mussaud and F. Rousseaux (2017). "Participatory simulation to foster social learning on coastal flooding prevention." *Environmental Modelling and Software* 98(Supplement C): 1-11.

Belazi, W., S.-E. Ouldboukhitine, A. Chateaufneuf and A. Bouchair (2018). "Uncertainty analysis of occupant behavior and building envelope materials in office building performance simulation." *Journal of Building Engineering* 19: 434-448.

Belton, V. and T. Stewart (2010). *Problem Structuring and Multiple Criteria Decision Analysis. Trends in Multiple Criteria Decision Analysis.* M. Ehrgott, J. R. Figueira and S. Greco. Boston, MA, Springer US: 209-239.

Bench-Capon, T. J. M. (2003). "Persuasion in Practical Argument Using Value-based Argumentation Frameworks." *Journal of Logic and Computation* 13(3): 429-448.

Bennabi, A., S. M. Elachachi, F. Taillandier and A. Talon (2014). *Gestion patrimoniale d'un réseau d'assainissement : incertitudes, robustesse et solution optimale.* JFMS, Aix-en-Provence.

Bertalanffy, L. v. (2012). *théorie générale des systèmes.* Paris, Dunod.

Bhowmik, S. and S. Ray (2018). "An improved crack propagation model for plain concrete under fatigue loading." *Engineering Fracture Mechanics* 191: 365-382.

Bisquert, P., P. Buche, M. Croitoru, N. Karanikolas and R. Thomopoulos (2017). *Selection of agro-waste valorisation routes based on a computational social choice and argumentation decision support tool.* To be published in EFITA.

Bona, A. (2016). *Modélisation de l'affordance dans le domaine des constructions durables.* PhD, Université de Bordeaux.

Bonetto, R. and G. Sauce (2006). *Gestion du patrimoine immobilier – Les activités de références,* Edition CSTB.

Bonyadi, M. R. and Z. Michalewicz (2012). *A fast particle swarm optimization algorithm for the multidimensional knapsack problem.* 2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation.

Boonyasopon, P., A. Riel, W. Uys, L. Louw, S. Tichkiewitch and N. du Preez (2011). "Automatic knowledge extraction from manufacturing research publications." *CIRP Annals* 60(1): 477-480.

Bouleau, N., K. Chatzis and O. Coutard (2004). *Modèles (les), obstacles et enjeux de la critique.* Paris, Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.

Bouquet, F., S. Chipeaux and C. Lang (2014). *Chapitre 1. Introduction à l'approche agent. Simulation spatiale à base d'agents avec Netlogo,* ISTE Edition.

Bourgais, M., P. Taillandier and L. Vercouter (2018). *Enhancing the Behavior of Agents in Social Simulations with Emotions and Social Relations. Multi-Agent Based Simulation XVIII,* Cham, Springer International Publishing.

Bousquet, F., O. Barreteau, P. D'Aquino, M. Etienne, S. Boissau, S. Aubert, C. Le Page, D. Babin and J.-C. Castella (2002). *Multi-agent systems and role games : Collective learning processes for ecosystem management. Complexity and ecosystem management : The theory and practice of multi-agent systems.* A. Janssen Marco. Cheltenham, Royaume-Uni, E. Elgar: 249-285.

Bouyssou, D. (1993). "Décision multicritère ou aide multicritère?" *Newsletter of the European working group "Multicriteria aid for decisions"*.

Buche, P., S. Dervaux, J. Dibie, L. Soler, L. Ibanescu and R. Touhami (2013). "Intégration de données hétérogènes et imprécises guidée par une ressource termino-ontologique." *Revue des*

Sciences et Technologies de l'Information - Série RIA : Revue d'Intelligence Artificielle 27(4-5): 539-568.

Buhler, T., C. Buhe, C. Berdier and J.-F. Boscato (2007). Pertinence et faisabilité d'une application d'aide à la planification/gestion de déchets de chantier : Du chantier à la gestion territoriale 25èmes Rencontres AUGC. Bordeaux.

Cadoz, C. (2006). Retour au réel : le sens du feedback. Rencontres Musicales Pluridisciplinaires. Lyon.

Cai, S., B. Zhang and L. Cremaschi (2017). "Review of moisture behavior and thermal performance of polystyrene insulation in building applications." *Building and Environment* 123: 50-65.

Caillou, P., B. Gaudou, A. Grignard, C. Q. Truong and P. Taillandier (2017). A Simple-to-use BDI architecture for Agent-based Modeling and Simulation. *Advances in Social Simulation*, Springer.

Cali, D., T. Osterhage, R. Streblov and D. Müller (2016). "Energy performance gap in refurbished German dwellings: Lesson learned from a field test." *Energy and Buildings* 127: 1146-1158.

Camerer, C., G. Loewenstein and D. Prelec (2005). "Neuroeconomics: How Neuroscience Can Inform Economics." *Journal of Economic Literature* 43(1): 9-64.

Cao, T. M. (2009). An analysis of incremental knowledge acquisition. PhD, The University of New South Wales.

Carr, V. and J. H. M. Tah (2001). "A fuzzy approach to construction project risk assessment and analysis: construction project risk management system." *Advances in Engineering Software* 32(10): 847-857.

CGDD (2012). Repère – Chiffres clefs de l'énergie - Edition 2012. C. G. a. D. Durable.

Chakraborty, S. and R. Chowdhury (2017). "Towards 'h-p adaptive' generalized ANOVA." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 320: 558-581.

Chalmers, D. J. (2002). Strong and Weak Emergence. *The Re-Emergence of Emergence*. P. Clayton and P. Davies. Oxford, Oxford University Press.

Chang, C.-Y. and J.-W. Ko (2017). "New Approach to Estimating the Standard Deviations of Lognormal Cost Variables in the Monte Carlo Analysis of Construction Risks." *Journal of Construction Engineering and Management* 143(1): 06016006.

Chein, M. and M. L. Mugnier (2009). *Graph-based Knowledge Representation and Reasoning. Computational Foundations of Conceptual Graphs*. London, Springer.

Chih, M. (2015). "Self-adaptive check and repair operator-based particle swarm optimization for the multidimensional knapsack problem." *Applied Soft Computing* 26: 378-389.

Chiu, C.-K. and Y.-F. Lin (2014). "Multi-objective decision-making supporting system of maintenance strategies for deteriorating reinforced concrete buildings." *Automation in Construction* 39: 15-31.

Choudhry, R. M. and D. Fang (2008). "Why operatives engage in unsafe work behavior: Investigating factors on construction sites." *Safety Science* 46(4): 566-584.

Christensen, F. M., O. Andersen, N. J. Duijm and P. Harremoës (2003). "Risk terminology—a platform for common understanding and better communication." *Journal of Hazardous Materials* 103(3): 181-203.

Cinelli, M., S. R. Coles and K. Kirwan (2014). "Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment." *Ecological Indicators* 46: 138-148.

CNEGP (2012). Risk analysis applied to management of dam safety, SPANCOLD. 1.

Conklin, J. and M. L. Begeman (1988). gIBIS: a hypertext tool for exploratory policy discussion. *Proceedings of the 1988 ACM conference on Computer-supported cooperative work*. Portland, Oregon, USA, ACM: 140-152.

Crocco, F., K. Offenholley and C. Hernandez (2016). "A Proof-of-Concept Study of Game-Based Learning in Higher Education." *Simulation & Gaming* 47(4): 403-422.

- Crookall, D. (2010). "Serious Games, Debriefing, and Simulation/Gaming as a Discipline." *Simulation & Gaming* 41(6): 898-920.
- D'Oca, S. and T. Hong (2015). "Occupancy schedules learning process through a data mining framework." *Energy and Buildings* 88: 395-408.
- Davis, A., O. Dieste, A. Hickey, N. Juristo and A. M. Moreno (2006). Effectiveness of Requirements Elicitation Techniques: Empirical Results Derived from a Systematic Review. *Proceedings of the 14th IEEE International Requirements Engineering Conference*, IEEE Computer Society: 176-185.
- Davis, F. D., R. P. Bagozzi and P. R. Warshaw (1989). "User Acceptance of Computer Technology: A Comparison of Two Theoretical Models." *Management Science* 35(8): 982-1003.
- De Rosnay, J. (1975). *Le Macroscopie*. Paris, Seuil.
- Deb, K., S. Agrawal, A. Pratap and T. Meyarivan (2000). *A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- Dejours, C. (2010). *Le facteur humain*. Paris, Presses Universitaires de France.
- Demeter, K., L. Szász and A. Kő (2018). "A text mining based overview of inventory research in the ISIR special issues 1994–2016." *International Journal of Production Economics*.
- Desmedt, J., G. Vekemans and D. Maes (2009). "Ensuring effectiveness of information to influence household behaviour." *Journal of Cleaner Production* 17(4): 455-462.
- Deterding, S., D. Dixon, R. Khaled and L. Nacke (2014) "Du game design au gamefulness : définir la gamification." *Sciences du jeu*.
- Devaraj, M. and R. Velkennedy (2016). "Study of Construction Delays Causing Risk on Time and Cost over Runs." *International Journal & Magazine of Engineering, Technology, Management and Research* 4(4): 284-287.
- Dey, P. and S. Ogunlana (2004). "Selection and application of risk management tools and techniques for build-operate-transfer projects." *Industrial Management & Data Systems* 104(4): 334-346.
- Djaouti, D. (2011). *Serious Game Design : considérations théoriques et techniques sur la création de jeux vidéo à vocation utilitaire*.
- Donais, F. M., I. Abi-Zeid and R. Lavoie (2017). *Building a Shared Model for Multi-criteria Group Decision Making. Group Decision and Negotiation. A Socio-Technical Perspective*, Cham, Springer International Publishing.
- Dubois, D. and H. Prade (2010). *Formal Representations of Uncertainty. Decision-making Process*. D. D. D. Bouyssou, M. Pirlot and H. Prade, Wiley Online Library.
- Dumont, A., A. Jacquet, C. E. Bourge, P. Gosselin, B. Ingelaere, C. Legrand and C. Mertens. (2004). "MédDéCo Métré Déchets Construction : Manuel de l'utilisateur ", from <http://www.marco-construction.be/>
- Dung, P. M. (1995). "On the acceptability of arguments and its fundamental role in nonmonotonic reasoning, logic programming and n-person games." *Artificial Intelligence* 77(2): 321-357.
- Dunne, P. E., A. Hunter, P. McBurney, S. Parsons and M. Wooldridge (2011). "Weighted argument systems: Basic definitions, algorithms, and complexity results." *Artificial Intelligence* 175(2): 457-486.
- Dwyer, C. P., M. J. Hogan and I. Stewart (2010). "The evaluation of argument mapping as a learning tool: Comparing the effects of map reading versus text reading on comprehension and recall of arguments." *Thinking Skills and Creativity* 5(1): 16-22.
- Ebrahimnejad, S., S. M. Mousavi and H. Seyrafiyanpour (2010). "Risk identification and assessment for build–operate–transfer projects: A fuzzy multi attribute decision making model." *Expert Systems with Applications* 37(1): 575-586.
- EC (2008). *Directive 2008/98/CE relative aux déchets*

EC (2014). European Commission - Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions on resource efficiency opportunities in the building sector. Brussels.

Ecorys. (2016). "EU Construction & Demolition waste management protocol." from https://ec.europa.eu/growth/content/eu-construction-and-demolition-waste-protocol-0_en.

El-Diraby, T. A., C. Lima and B. Feis (2005). "Domain Taxonomy for Construction Concepts: Toward a Formal Ontology for Construction Knowledge." *Journal of Computing in Civil Engineering* 19(4): 394-406.

El-Sayegh, S. M. (2008). "Risk assessment and allocation in the UAE construction industry." *International Journal of Project Management* 26(4): 431-438.

Ellsberg, D. (1961). "Risk, Ambiguity, and the Savage Axioms." *The Quarterly Journal of Economics* 75(4): 643-669.

Engineers, U. A. C. o. (2011). "BUILDER Engineered Management System.", from <http://www.cecer.army.mil/td/tips/product/details.cfm?ID=64>.

Etienne, M. (2010). *La modélisation d'accompagnement - Une démarche participative en appui au développement durable*. Versailles, Editions Quae.

Evans, R. and I. Kotchetkova (2009). "Qualitative research and deliberative methods: promise or peril?" *Qualitative Research* 9(5): 625-643.

Feldman, J. (2002) "Objectivité et subjectivité en science. Quelques aperçus " *Revue européenne des sciences sociales* DOI: 10.4000/ress.577

Ferber, J. (1995). *Les Systèmes Multi-Agents. Vers une intelligence collective*. Paris, InterEditions.

Ferréol, G. (2015). *Sentiments et émotions : Essai sur les sciences sociales*, EME éditions.

FFB. (2016). "Déchets de Chantier." from <http://www.dechets-chantier.ffbatiment.fr/rechercher-centres.aspx>.

Fidan, G., I. Dikmen, A. M. Tanyer and M. T. Birgonul (2011). "Ontology for Relating Risk and Vulnerability to Cost Overrun in International Projects." *Journal of Computing in Civil Engineering* 25(4): 302-315.

Fielden, S. L., M. J. Davidson, A. W. Gale and C. L. Davey (2000). "Women in construction: the untapped resource." *Construction Management and Economics* 18(1): 113-121.

Figueira, J. R., S. Greco, B. Roy and R. Słowiński (2010). *ELECTRE Methods: Main Features and Recent Developments. Handbook of Multicriteria Analysis*. C. Zopounidis and P. M. Pardalos. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg: 51-89.

Fischhoff, B., S. R. Watson and C. Hope (1984). "Defining risk." *Policy Sciences* 17(2): 123-139.

Flores-Colen, I. and J. de Brito (2010). "A systematic approach for maintenance budgeting of buildings façades based on predictive and preventive strategies." *Construction and Building Materials* 24(9): 1718-1729.

Foucault, J.-P. and G. Leclerc (2003). *Le tableau de bord MAESTRO pour la gestion des installations*. Paris, Presses internationales polytechniques.

Fowler, M. and J. Highsmith (2001) "The Agile Manifesto." *Software development Magazine*.

Fréville, A. (2004). "The multidimensional 0-1 knapsack problem: An overview." *European Journal of Operational Research* 155(1): 1-21.

Friedman, C., N. Becker and E. Erell (2014). "Energy retrofit of residential building envelopes in Israel: A cost-benefit analysis." *Energy* 77: 183-193.

Gallagher, S., L. Richardson, S. L. Ventura and W. F. Eddy (2017) "SPEW: Synthetic Populations and Ecosystems of the World." *ArXiv e-prints*.

- Genre, J. L., S. Marietan, E. Meier, G. A. Meylan, N. Kholer, N. Rumo, B. Rüst and M. Rutz (1992). *Méthode de diagnostic sommaire MERIP*. Bern, Office fédéral des questions conjoncturelles.
- Getoor, L., N. Friedman, D. Koller and A. Pfeffer (2007). *Learning Probabilistic Relational Model*. Relational Data Mining. L. N. Džeroski S. Berlin, Heidelberg, Springer.
- Gilbert, D. (2006). *Stumbling on Happiness*. New-York, Knopf Doubleday Publishing Group.
- Girard, C., J. Ecalte and A. Magnan (2013). "Serious games as new educational tools: how effective are they? A meta-analysis of recent studies." *Journal of Computer Assisted Learning* 29(3): 207-219.
- Go, H., J.-S. Kim and D.-H. Lee (2013). "Operation and preventive maintenance scheduling for containerships: Mathematical model and solution algorithm." *European Journal of Operational Research* 229(3): 626-636.
- Goldwasser, S., S. Micali and C. Rackoff (1989). "The Knowledge Complexity of Interactive Proof Systems." *SIAM Journal on Computing* 18(1): 186-208.
- Gonzales, C., L. Torti and P.-H. Wuillemin (2017). *aGrUM: A Graphical Universal Model Framework*, Cham, Springer International Publishing.
- Govindan, K. and M. B. Jepsen (2016). "ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications." *European Journal of Operational Research* 250(1): 1-29.
- Gram-Hanssen, K. (2014). "Retrofitting owner-occupied housing: remember the people." *Building Research & Information* 42(4): 393-397.
- Grignard, A., P. Taillandier, B. Gaudou, D.-A. Vo, N.-Q. Huynh and A. Drogoul (2013). "GAMA 1.6: Advancing the Art of Complex Agent-Based Modeling and Simulation." *Computer Science* 8291: 117-131.
- Guagnano, G. A., P. C. Stern and T. Dietz (1995). "Influences on Attitude-Behavior Relationships: A Natural Experiment with Curbside Recycling." *Environment and Behavior* 27(5): 699-718.
- Guitouni, A. and J.-M. Martel (1998). "Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method." *European Journal of Operational Research* 109(2): 501-521.
- Guy, B. (2014) "Pour un nouveau paradigme. La dichotomie conceptuelle entre espace et temps est (devenue) un obstacle aux progrès de la pensée : commençons par le mouvement " HAL.
- Hadikusumo, B. H. W., S. Petchpong and C. Charoenggam (2005). "Construction material procurement using Internet-based agent system." *Automation in Construction* 14(6): 736-749.
- Hadka, D. (2017). "MOEA Framework." from <http://moeaframework.org/index.html>
- Haes, H. A. U., R. Heijungs, S. Suh and G. Huppes (2008). "Three Strategies to Overcome the Limitations of Life-Cycle Assessment." *Journal of Industrial Ecology* 8(3): 19-32.
- Halfawy, M., L. Newton and D. Vanier (2005). *Municipal Infrastructure Asset Management Systems: State-of-the-Art Review*, National Research Council of Canada. 48339.
- Hamari, J., J. Koivisto and H. Sarsa (2014). *Does Gamification Work? -- A Literature Review of Empirical Studies on Gamification*. 2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences.
- Hamzaoui, F., F. Taillandier, R. Mehdizadeh, D. Breysse and A. Allal (2015). "Evolutive Risk Breakdown Structure for managing construction project risks: application to a railway project in Algeria." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 19(2): 238-262.
- Hanus, N., G. Wong-Parodi, M. J. Small and I. Grossmann (2018). "The role of psychology and social influences in energy efficiency adoption." *Energy Efficiency* 11(2): 371-391.
- Hariri-Ardebili, M. A. (2018). "Risk, Reliability, Resilience (R3) and beyond in dam engineering: A state-of-the-art review." *International Journal of Disaster Risk Reduction* 31: 806-831.
- Harkouss, F., F. Fardoun and P. H. Biwole (2018). "Multi-objective optimization methodology for net zero energy buildings." *Journal of Building Engineering* 16: 57-71.

Hathout, M., C. Carvajal, M. Vuillet, L. Peyras and Y. Diab (2018). Elicitation, Calibration, Aggregation and debiasing "EiCAD" approach to expert judgment for the probabilistic evaluation of the structural reliability of river levees. 10èmes journées Fiabilité des Matériaux et des Structures, Bordeaux, France.

Hegazy, T. and R. Rashedi (2013). "Large-Scale Asset Renewal Optimization Using Genetic Algorithms plus Segmentation." *Journal of Computing in Civil Engineering* 27(4): 419-426.

Hembecke, F., H. S. Lopes and W. Godoy (2007). Particle Swarm Optimization for the Multidimensional Knapsack Problem. *Adaptive and Natural Computing Algorithms*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.

Hénault, A. (1979). *Les enjeux de la sémiotique. Vol. 1, Introduction à la sémiotique générale*. Paris, PUF.

Hendrickx, P. and J. Perret (2003). *Gestion technique de l'immobilier d'entreprise - Guide pratique*. Paris, Eyrolles.

Hersing, W. S. (2017). "Managing cognitive bias in safety decision making: Application of emotional intelligence competencies." *Journal of Space Safety Engineering* 4(3): 124-128.

Heydarian, A., E. Pantazis, J. P. Carneiro, D. Gerber and B. Becerik-Gerber (2016). "Lights, building, action: Impact of default lighting settings on occupant behaviour." *Journal of Environmental Psychology* 48: 212-223.

Hickey, A. M. and A. M. Davis (2003). Elicitation Technique Selection: How Do Experts Do It? *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Requirements Engineering*, IEEE Computer Society: 169.

Hirsch, L., M. Saeedi, J. Cornillon and L. Litosseliti (2004). "A structured dialogue tool for argumentative learning." *Journal of Computer Assisted Learning* 20(1): 72-80.

Hites, R., Y. De Smet, N. Risse, M. Salazar-Neumann and P. Vincke (2006). "About the applicability of MCDA to some robustness problems." *European Journal of Operational Research* 174(1): 322-332.

Hoballah, M. H. (2017). *Conception multiobjectifs d'un isolant thermique biosourcé optimisé : du recueil des connaissances à l'aide à la décision interactive*. PhD, Université Bretagne Loire.

Hoballah, M. H. (2018). *Conception multiobjectifs d'un isolant thermique biosourcé optimisé : du recueil des connaissances à l'aide à la décision interactive*. PhD, Ecole Centrale de Nantes.

Hoballah, M. H., A. Ndiaye, F. Michaud and M. Irle (2018). "Formulating preliminary design optimization problems using expert knowledge: Application to wood-based insulating materials." *Expert Systems with Applications* 92: 95-105.

Hoes, P., J. L. M. Hensen, M. G. L. C. Loomans, B. de Vries and D. Bourgeois (2009). "User behavior in whole building simulation." *Energy and Buildings* 41(3): 295-302.

Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, University of Michigan Press.

Holzmann, V. and I. Spiegler (2011). "Developing risk breakdown structure for information technology organizations." *International Journal of Project Management* 29(5): 537-546.

Hutchel, A. and H. Molet (1986). "Rational modelling in understanding and aiding human decision-making: About two case studies." *European Journal of Operational Research* 24(1): 178-186.

Hyun, K.-C., S. Min, H. Choi, J. Park and I.-M. Lee (2015). "Risk analysis using fault-tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) applicable to shield TBM tunnels." *Tunnelling and Underground Space Technology* 49: 121-129.

Ibn-Mohammed, T., R. Greenough, S. Taylor, L. Ozawa-Meida and A. Acquaye (2014). "Integrating economic considerations with operational and embodied emissions into a decision support system for the optimal ranking of building retrofit options." *Building and Environment* 72: 82-101.

Igel, C., N. Hansen and S. Roth (2007). "Covariance Matrix Adaptation for Multi-objective Optimization." *Evolutionary Computation* 15(1): 1-28.

INSEE. (2008). "Omphale : un outil de projections de population." from <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1289993>.

Ishizaka, A. and P. Nemery (2013). *Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software*, Wiley.

ISO (2003). 10006 : Systèmes de management de la qualité — Lignes directrices pour le management de la qualité dans les projets, ISO.

ISO (2006). 14040 : Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Principes et cadre.

ISO (2009). Guide 73 : 2009 - Management du risque. Vocabulaire.

Itard, I., F. Meijer, E. Vriens and H. Hoiting (2008). *Building renovation and modernisation in Europe: state of the art review. Final Report ERABUILD*, Delft University of Technology.

Jaggs, M. and J. Palmer (2000). "Energy performance indoor environmental quality retrofit — a European diagnosis and decision making method for building refurbishment." *Energy and Buildings* 31(2): 97-101.

Jang, H. and J. Kang (2016). "A stochastic model of integrating occupant behaviour into energy simulation with respect to actual energy consumption in high-rise apartment buildings." *Energy and Buildings* 121: 205-216.

Jmal, A., F. Michaud, M. Irle and A. Ndiaye (2011). *Structuring and representation of scientific knowledge for a transfer through an electronic knowledge-book*. 2011 IEEE International Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA).

Joerin, F., G. Desthieux, S. B. Beuze and A. Nembrini (2009). "Participatory diagnosis in urban planning: Proposal for a learning process based on geographical information." *Journal of Environmental Management* 90(6): 2002-2011.

Joffre, O. M., R. H. Bosma, A. Ligtenberg, V. P. D. Tri, T. T. P. Ha and A. K. Bregt (2015). "Combining participatory approaches and an agent-based model for better planning shrimp aquaculture." *Agricultural Systems* 141: 149-159.

Jonsson, P. (2018). "Constants and finite unary relations in qualitative constraint reasoning." *Artificial Intelligence* 257: 1-23.

Jouvent, M. (1995). *Évaluer vos performances en maintenance grâce à des indicateurs de maintenance standardisés*. Paris, Journée du 27 mars 1995. Association APOGEE.

Jozefowicz, N. (2013). *Optimisation combinatoire multi-objectif : des méthodes aux problèmes, de la Terre à (presque) la Lune*, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse).

Juan, Y.-K., P. Gao and J. Wang (2010). "A hybrid decision support system for sustainable office building renovation and energy performance improvement." *Energy and Buildings* 42(3): 290-297.

Jugert, P., K. H. Greenaway, M. Barth, R. Büchner, S. Eisentraut and I. Fritsche (2016). "Collective efficacy increases pro-environmental intentions through increasing self-efficacy." *Journal of Environmental Psychology* 48: 12-23.

Juignet, P. (2015) "Deux conceptions philosophiques du monde." *Philosophie, science et société*.

Juignet, P. (2015) "Le réductionnisme dogmatique." *Philosophie, science et société*.

Kansou, K. (2010). *Elaboration d'un système à base de connaissances hétérogènes pour la panification française*.

Keeney, R. L. (1982). "Decision Analysis: An Overview." *Operations Research* 30(5): 803-838.

Kennedy, J. and R. Eberhart (1995). *Particle swarm optimization*. Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks.

Kennedy, J. and R. C. Eberhart (1997). *A discrete binary version of the particle swarm algorithm*. 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation.

Kheiri, F. (2018). "A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 92: 897-920.

Kim, M., T. Hiroyasu, M. Miki and S. Watanabe (2004). SPEA2+: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2. Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VIII, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.

Klein, L., J.-y. Kwak, G. Kavulya, F. Jazizadeh, B. Becerik-Gerber, P. Varakantham and M. Tambe (2012). "Coordinating occupant behavior for building energy and comfort management using multi-agent systems." *Automation in Construction* 22: 525-536.

Kleine, M., P. Langenbach and L. Zhurakhovska (2017). "How voice shapes reactions to impartial decision-makers: An experiment on participation procedures." *Journal of Economic Behavior & Organization* 143: 241-253.

Knowles, J. and D. Corne (1999). The Pareto archived evolution strategy: a new baseline algorithm for Pareto multiobjective optimisation. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406).

Kodikara, P. N., B. J. C. Perera and M. D. U. P. Kularathna (2010). "Stakeholder preference elicitation and modelling in multi-criteria decision analysis – A case study on urban water supply." *European Journal of Operational Research* 206(1): 209-220.

Koesten, J. (2015). Grands principes de la réglementation relative à la gestion des déchets du BTP Journée Technique des Déchets du BTP, CEREMA.

Kohler, N., P. Steadman and U. Hassler (2009). "Research on the building stock and its applications." *Building Research & Information* 37(5-6): 449-454.

Kong, M. and P. Tian (2006). Apply the Particle Swarm Optimization to the Multidimensional Knapsack Problem. Artificial Intelligence and Soft Computing – ICAISC 2006, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.

Kong, M., P. Tian and Y. Kao (2008). "A new ant colony optimization algorithm for the multidimensional Knapsack problem." *Computers & Operations Research* 35(8): 2672-2683.

Koushki, P. A., K. Al-Rashid and N. Kartam (2005). "Delays and cost increases in the construction of private residential projects in Kuwait." *Construction Management and Economics* 23(3): 285-294.

Kunc, M., J. Malpass and L. White (2016). *Behavioral Operational Research : Theory, Methodology and Practice*. London, Springer.

Kutut, V., E. K. Zavadskas and M. Lazauskas (2014). "Assessment of priority alternatives for preservation of historic buildings using model based on ARAS and AHP methods." *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 14(2): 287-294.

L. Torti and P. Wuillemin. (2017). "O3PRM Language Specification." from http://o3prm.gitlab.io/pdfs/o3prm_reference.pdf.

Labreuche, C. (2011). "A general framework for explaining the results of a multi-attribute preference model." *Artificial Intelligence* 175(7): 1410-1448.

Lamperti, F., A. Roventini and A. Sani (2018). "Agent-based model calibration using machine learning surrogates." *Journal of Economic Dynamics and Control* 90: 366-389.

Langevin, J., J. Wen and P. L. Gurian (2015). "Simulating the human-building interaction: Development and validation of an agent-based model of office occupant behaviors." *Building and Environment* 88: 27-45.

Le Moigne, J.-L. (1977). *La théorie du système général - théorie de la modélisation*, Archive.org.

Lee, Y. S. and A. M. Malkawi (2014). "Simulating multiple occupant behaviors in buildings: An agent-based modeling approach." *Energy and Buildings* 69: 407-416.

Leite, F., A. Akcamete, B. Akinci, G. Atasoy and S. Kiziltas (2011). "Analysis of modeling effort and impact of different levels of detail in building information models." *Automation in Construction* 20(5): 601-609.

Leplat, J. (1994). "collective activity in work: some lines of research." *Le Travail Humain* 57(3): 209-226.

- Li, G., Z. Lu, L. Li and B. Ren (2016). "Aleatory and epistemic uncertainties analysis based on non-probabilistic reliability and its kriging solution." *Applied Mathematical Modelling* 40(9): 5703-5716.
- Li, H. and Q. Zhang (2009). "Multiobjective Optimization Problems With Complicated Pareto Sets, MOEA/D and NSGA-II." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 13(2): 284-302.
- Li, Y. and X. Zhang (2013). "Web-based construction waste estimation system for building construction projects." *Automation in Construction* 35: 142-156.
- Liew, A. (2007). "Understanding Data, Information, Knowledge And Their Inter-Relationships." *Journal of Knowledge Management Practice* 8(2).
- Lin, X., C. M. F. Ho and G. Q. P. Shen (2017). "Who should take the responsibility? Stakeholders' power over social responsibility issues in construction projects." *Journal of Cleaner Production* 154: 318-329.
- Lingard, H. (2003). "The impact of individual and job characteristics on 'burnout' among civil engineers in Australia and the implications for employee turnover." *Construction Management and Economics* 21(1): 69-80.
- Lippi, M. and P. Torroni (2016). "MARGOT: A web server for argumentation mining." *Expert Systems with Applications* 65: 292-303.
- Lissitsa, S. and O. Kol (2016). "Generation X vs. Generation Y – A decade of online shopping." *Journal of Retailing and Consumer Services* 31: 304-312.
- Lissouck, R. O., R. Pommier, F. Taillandier, J. K. Mvogo, D. Breyse and L. M. A. Ohandja (2018). "A decision support tool approach based on the Electre TRI-B method for the valorisation of tropical timbers from the Congo Basin: an application for glulam products." *Southern Forests: a Journal of Forest Science*: 1-11.
- Liu, Z., J. Rommel and S. Feng (2018). "Does It Pay to Participate in Decision-making? Survey Evidence on Land Co-management in Jiangsu Province, China." *Ecological Economics* 143: 199-209.
- Lounis, Z. and D. J. Vanier (2000). "A Multiobjective and Stochastic System for Building Maintenance Management." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 15(5): 320-329.
- Lundberg, J. and B. J. E. Johansson (2015). "Systemic resilience model." *Reliability Engineering & System Safety* 141: 22-32.
- Lust, T. and J. Teghem (2012). "The multiobjective multidimensional knapsack problem: a survey and a new approach." *International Transactions in Operational Research* 19(4): 495-520.
- Mao, J., Y. Fu, A. Afshari, P. R. Armstrong and L. K. Norford (2018). "Optimization-aided calibration of an urban microclimate model under uncertainty." *Building and Environment* 143: 390-403.
- Marilleau, N. (2016). *Distributed Approaches based on Agent Based Systems to model and simulate complex systems with a space*, Université Pierre & Marie Curie - Paris 6.
- Martello, S. and P. Toth (1990). *Knapsack problems: algorithms and computer implementations*, John Wiley & Sons, Inc.
- Marttunen, M., J. Lienert and V. Belton (2017). "Structuring problems for Multi-Criteria Decision Analysis in practice: A literature review of method combinations." *European Journal of Operational Research* 263(1): 1-17.
- Marvuglia, A., S. Rege, T. Navarrete Gutiérrez, L. Vanni, D. Stilmant and E. Benetto (2017). "A return on experience from the application of agent-based simulations coupled with life cycle assessment to model agricultural processes." *Journal of Cleaner Production* 142: 1539-1551.
- Matt, P.-A. and F. Toni (2008). *A Game-Theoretic Measure of Argument Strength for Abstract Argumentation. Logics in Artificial Intelligence*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- Mazars, J. (1984). *Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure*, [s.n.].

Medina-Oliva, G., P. Weber and B. Iung (2013). "PRM-based patterns for knowledge formalisation of industrial systems to support maintenance strategies assessment." *Reliability Engineering & System Safety* 116: 38-56.

Mehdizadeh, R. (2012). *Dynamic and multi-perspective risk management of construction projects using tailor-made Risk Breakdown Structures*. PhD, Université de Bordeaux.

Mehdizadeh, R., D. Breysse, F. Taillandier and H. Niandou (2013). "Dynamic and multi perspective risk management in construction with a special view to temporary structures." *Civil Engineering and Environmental Systems* 30(2): 115-129.

Mehdizadeh, R., F. Taillandier, D. Breysse and N. Halidou (2012). "Methodology and tools for risk evaluation in construction projects using Risk Breakdown Structure." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 16(sup1): s78-s98.

Memarzadeh, M. and M. Pozzi (2015). "Integrated Inspection Scheduling and Maintenance Planning for Infrastructure Systems." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 31(6): 403-415.

Mendes, R., J. Kennedy and J. Neves (2004). "The fully informed particle swarm: simpler, maybe better." *Trans. Evol. Comp* 8(3): 204-210.

Meyer, M. H. and K. F. Curley (1991). "An applied framework for classifying the complexity of knowledge-based systems." *MIS Q.* 15(4): 455-472.

Michael, D. and S. Chen (2006). *Serious games: Games that educate, train, and inform*. Boston.

Michaud, F., P. Castéra, C. Fernandez and A. Ndiaye (2009). "Meta-heuristic Methods Applied to the Design of Wood—Plastic Composites, with Some Attention to Environmental Aspects." *Journal of Composite Materials* 43(5): 533-548.

Micolier, A., F. Taillandier, P. Taillandier and F. Bos (2018). *Li-BIM: un modèle cognitif avancé simulant le comportement de l'occupant et son confort à partir d'une maquette numérique IBPSA*. Bordeaux.

Miller, G. A. (2003). "The cognitive revolution: a historical perspective." *Trends in Cognitive Science* 7(3).

Moezzi, M. and L. Lutzenhi (2010). *What's Missing in Theories of the Residential Energy User ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*.

Morelli, M., M. Harrestrup and S. Svendsen (2014). "Method for a component-based economic optimisation in design of whole building renovation versus demolishing and rebuilding." *Energy Policy* 65: 305-314.

Morgenstern, O. and J. V. Neumann (1944). *Theory of games and economic behavior*. Princeton, Princeton University Press.

Morin, E. (2004). *Introduction à la pensée complexe*. Paris, Points.

Moslemi, H. and M. Zandieh (2011). "Comparisons of some improving strategies on MOPSO for multi-objective (r,Q) inventory system." *Expert Systems with Applications* 38(10): 12051-12057.

Mullins, J., Y. Ling, S. Mahadevan, L. Sun and A. Strachan (2016). "Separation of aleatory and epistemic uncertainty in probabilistic model validation." *Reliability Engineering & System Safety* 147: 49-59.

Munir, K. and M. Sheraz Anjum (2018). "The use of ontologies for effective knowledge modelling and information retrieval." *Applied Computing and Informatics* 14(2): 116-126.

Naivinit, W., C. Le Page, G. Trébuil and N. Gajaseeni (2010). "Participatory agent-based modeling and simulation of rice production and labor migrations in Northeast Thailand." *Environmental Modelling & Software* 25(11): 1345-1358.

Nielsen, A. N., R. L. Jensen, T. S. Larsen and S. B. Nissen (2016). "Early stage decision support for sustainable building renovation – A review." *Building and Environment* 103: 165-181.

Norese, M. F. (1996). "A Process Perspective and Multicriteria Approach in Decision-Aiding Contexts." *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 5(2): 133-144.

O'Faircheallaigh, C. (2010). "Public participation and environmental impact assessment: Purposes, implications, and lessons for public policy making." *Environmental Impact Assessment Review* 30(1): 19-27.

Oberti, P. (2004). *Décision publique et recherche procédurale : illustration d'une démarche multicritère à la localisation participative d'un parc éolien en région corse*. Journées de l'Association Française de Science Economique. Rennes.

Oliva, G. M., P. Weber, E. Levrat and B. Iung (2010). "Use of Probabilistic Relational Model (PRM) for Dependability Analysis of Complex Systems." *IFAC Proceedings Volumes* 43(8): 501-506.

Oliveira, C., M. Cintra and F. M. Neto (2013). *Learning Risk Management in Software Projects with a Serious Game Based on Intelligent Agents and Fuzzy Systems*. 8th conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT-13).

Ostrom, E. (2005). *Understanding Institutional Diversity*. Princeton, Princeton University Press.

Ozkan, M. and B. Solmaz (2015). "The Changing Face of the Employees – Generation Z and Their Perceptions of Work (A Study Applied to University Students)." *Procedia Economics and Finance* 26: 476-483.

Paulus, P. B. and B. A. Nijstad (2003). *Group Creativity: Innovation through Collaboration*. New York, Oxford University Press.

Pelletier, P. (2008). *Comité opérationnel « rénovation des bâtiments existants » : rapport d'étape, ministre de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables*. d. d. d. Ministère de l'écologie.

Peng, C., D. Yan, R. Wu, C. Wang, X. Zhou and Y. Jiang (2012). "Quantitative description and simulation of human behavior in residential buildings." *Building Simulation* 5(2): 85-94.

Peng, F. and Y. Ouyang (2013). "Optimal Clustering of Railroad Track Maintenance Jobs." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 29(4): 235-247.

Perrin, L., F. Muñoz-Giraldo, O. Dufaud and A. Laurent (2012). "Normative barriers improvement through the MADS/MOSAR methodology." *Safety Science* 50(7): 1502-1512.

Perrotta, C., G. Featherstone, H. Aston and E. Houghton (2013). *Game-based learning: Latest evidence and future directions*, NFER Research Programme: Innovation in Education.

Petersen, D. (2005). "Setting goals measuring performance." *Professional Safety* 50: 43-48.

Petitot, J. (1998) "Nature et enjeux de la modélisation en sciences sociales." *Interdisciplinarités*.

Pfeffer, J. and R. I. Sutton (2006). "Evidence-Based Management." *Harvard Business Review* 84: 62-74.

Pilone, E. and M. Demichela (2018). "A semi-quantitative methodology to evaluate the main local territorial risks and their interactions." *Land Use Policy* 77: 143-154.

PMI (2008). *Project Management Institute Standards Committee: A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide)*. Newtown Square, Project Management Institute.

Poli, R. (2008). "Analysis of the publications on the applications of particle swarm optimisation." *J. Artif. Evol. App.* 2008: 1-10.

Policastro, C. A., A. C. P. L. F. Carvalho and A. C. B. Delbem (2006). "Automatic knowledge learning and case adaptation with a hybrid committee approach." *Journal of Applied Logic* 4(1): 26-38.

Queheille, E., F. Taillandier and N. Saiyouri (2018). "Optimization of strategy planning for building deconstruction." *Automation in construction* To be published.

Raillon, L. and C. Ghiaus (2018). "An efficient Bayesian experimental calibration of dynamic thermal models." *Energy* 152: 818-833.

Rapanta, C. and D. Walton (2016). "The Use of Argument Maps as an Assessment Tool in Higher Education." *International Journal of Educational Research* 79: 211-221.

Ren, Z., C. J. Anumba and O. O. Ugwu (2003). "Multiagent System for Construction Claims Negotiation." *Journal of Computing in Civil Engineering* 17(3): 180-188.

Rey-Valette, H., S. Damart and S. Roussel (2007). "A multicriteria participation-based methodology for selecting sustainable development indicators: an incentive tool for concerted decision making beyond the diagnosis framework." *International Journal of Sustainable Development* 10(1-2): 122-138.

Rezaei, F., H. R. Safavi, A. Mirchi and K. Madani (2017). "f-MOPSO: An alternative multi-objective PSO algorithm for conjunctive water use management." *Journal of Hydro-environment Research* 14: 1-18.

Rodney, E. (2016). Développement d'une méthode de gestion des risques de projet et d'aide à la décision en contexte incertain : application au domaine des énergies renouvelables.

Rojas, E. M. and A. Mukherjee (2006). "Multi-Agent Framework for General-Purpose Situational Simulations in the Construction Management Domain." *Journal of Computing in Civil Engineering* 20(3): 165-176.

Roussat, N., C. Dujet and J. Méhu (2009). "Choosing a sustainable demolition waste management strategy using multicriteria decision analysis." *Waste Management* 29(1): 12-20.

Roy, B. (1990). *The Outranking Approach and the Foundations of Electre Methods*. Readings in Multiple Criteria Decision Aid. C. Bana e Costa, Springer Berlin Heidelberg: 155-183.

Roy, B. (1996). *Multicriteria methodology for decision aiding*. Boston, Kluwer Academic.

Roy, B. (2010). "Robustness in operational research and decision aiding: A multi-faceted issue." *European Journal of Operational Research* 200(3): 629-638.

Rüppel, U. and K. Schatz (2011). "Designing a BIM-based serious game for fire safety evacuation simulations." *Advanced Engineering Informatics* 25(4): 600-611.

Russ, J. and C. Leguil (2012). *Conclusion – L'éthique, une présence humaine dans le monde de la technique. La pensée éthique contemporaine*. Paris cedex 14, Presses Universitaires de France: 118-121.

Russell, S., P. Norvig, F. Popineau, M.-C. Baland, D. d. Loenzien and P. Haond (2010). *Intelligence artificielle*, Pearson.

Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New-York, McGraw-Hill.

Saaty, T. L. (2005). *The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for the Measurement of Intangible Criteria and for Decision-Making. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. New York, NY, Springer New York: 345-405.

Saha, P., R. Liu, C. Melson and S. D. Boyles (2014). "Network Model for Rural Roadway Tolling with Pavement Deterioration and Repair." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 29(5): 315-329.

Saito, H. (2017). "Application of the Wood Degradation Model to an Actual Roof Assembly subjected to Rain Penetration." *Energy Procedia* 132: 399-404.

Sallak, M., F. Aguirre and W. Schon (2013). *Incertitudes aléatoires et épistémiques, comment les distinguer et les manipuler dans les études de fiabilité ? QUALITA2013*. Compiègne, France.

Samsonovich, A. V. (2012). "On a roadmap for the BICA Challenge." *Biologically Inspired Cognitive Architectures* 1: 100-107.

Samsonovich, A. V. (2013). "Emotional biologically inspired cognitive architecture." *Biologically Inspired Cognitive Architectures* 6: 109-125.

Sauvé, L., L. Renaud and M. Gauvin (2007). "Une analyse des écrits sur les impacts du jeu sur l'apprentissage, *Revue des Sciences de l'Éducation*." *Revue des sciences de l'éducation* 33(1): 89-107.

Schärlig, A. (1985). *Décider sur plusieurs critères, panorama de l'aide à la décision multicritère*. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes.

Schneider, W. and R. M. Shiffrin (1977). "Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention." *Psychological Review* 84(1): 1-66.

Schultmann, F., B. Pitzini-Duée, T. Zundel and O. Rentz (1998). "Développement d'un logiciel d'audit de bâtiment avant démolition (Development of a software for building audit before demolition)." *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*.

Seidita, V. and A. Chella (2017). "Representing social intelligence: An agent-based modeling application." *Biologically Inspired Cognitive Architectures* 22: 35-43.

Serpell, A., X. Ferrada and N. L. Rubio (2017). "Fostering the effective usage of risk management in construction." *Journal of Civil Engineering and Management* 23(7): 858-867.

Serre, D. and C. Heinzlef (2018). "Assessing and mapping urban resilience to floods with respect to cascading effects through critical infrastructure networks." *International Journal of Disaster Risk Reduction* 30: 235-243.

Shannon, C. E. (1948). "A Mathematical Theory of Communication." *The Bell System Technical Journal*, 27: 379-423.

Shealy, T. (2016). "Do Sustainable Buildings Inspire More Sustainable Buildings?" *Procedia Engineering* 145: 412-419.

Shelokar, P. S., P. Siarry, V. K. Jayaraman and B. D. Kulkarni (2007). "Particle swarm and ant colony algorithms hybridized for improved continuous optimization." *Applied Mathematics and Computation* 188(1): 129-142.

Shove, E. (2010). "Beyond the ABC: Climate Change Policy and Theories of Social Change." *Environment and Planning A* 42(6): 1273-1285.

Sierra, M. R. and C. A. Coello Coello (2005). *Improving PSO-Based Multi-objective Optimization Using Crowding, Mutation and ϵ -Dominance*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.

Simon, H. A. (1962). "The Architecture of Complexity." *Proceedings of the American Philosophical Society* 106(6): 467-482.

Siskos, E. and N. Tsotsolas (2015). "Elicitation of criteria importance weights through the Simos method: A robustness concern." *European Journal of Operational Research* 246(2): 543-553.

Sowa, J. F. (1984). *Conceptual Structures: Information Proc. in Mind and Machine*. Wesley, Addison.

Studer, R., V. R. Benjamins and D. Fensel (1998). "Knowledge engineering: Principles and methods." *Data & Knowledge Engineering* 25(1): 161-197.

Suciu, I., A. Jmal, B. Le Blanc, M. Irle, F. Michaud, C. Fernandez, C. Raboutet and A. Ndiaye (2014). *Acquisition, représentation et transfert de connaissances scientifiques via un livre de connaissances*. 1. Colloque International CIA « Connaissances et Informations en Action » « Transfert et organisation des connaissances en contexte », Bordeaux, France.

Svennevig, J. (2000). *Getting Acquainted in Conversation*, John Benjamins.

Taillandier, F. (2009). *The risk notion as a key to pilot a real estate*, Université de Savoie.

Taillandier, F. and I. Abi-Zeid (2010). *Multicriteria decision support for real estate property management : Elaboration of an environmental action plan*. 71st Meeting of the European Working Group «Multiple Criteria Decision Aiding», Turin, Italy.

Taillandier, F. and I. Abi-Zeid (2013). "A multicriteria evaluation of real estate properties based on environmental impacts." *International Journal of Multicriteria Decision Making* 3(4): 303-324.

Taillandier, F., I. Abi-Zeid, P. Taillandier, G. Sauce and R. Bonetto (2014). "An interactive decision support method for real estate management in a multi-criteria framework – REMIND." *International Journal of Strategic Property Management* 18(3): 265-278.

Taillandier, F. and C. Adam (2018). "Games Ready to Use: A Serious Game for Teaching Natural Risk Management." *Simulation & Gaming* 49(4): 441-470.

Taillandier, F., S. Aries, A. Ndiaye, B. Leblanc, C. Fernandez and F. Labat (2013). *Comment améliorer les performances thermiques de ma maison ? Une affaire d'expert ! 31èmes Rencontre Universitaires de Génie Civil*. Cachan.

Taillandier, F., C. Baudrit, Q. A. Hoang, S. N. Okina and D. Breysse (2018). *Modèle de connaissance pour l'ingénierie forensique en Génie Civil*. JFMS. Bordeaux.

Taillandier, F. and D. Breysse (2016). "Decision aiding for lower soil risk in urban planning operation." *Civil Engineering and Environmental Systems*: 1-19.

Taillandier, F., B. Delhomme, I. Abi-Zeid, R. Thomopoulos, C. Baudrit and L. Mora (2017). *Designing an argumentative decision-aiding method for urban planning*. 86th Meeting of the European Working Group «Multiple Criteria Decision Aiding». Paris.

Taillandier, F., C. Fernandez and A. Ndiaye (2017). "Real Estate Property Maintenance Optimization Based on Multiobjective Multidimensional Knapsack Problem." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 32(3): 227-251.

Taillandier, F., R. Mehdizadeh and D. Breysse (2011). *Evaluation et agrégation des risques pour les projets de construction par le recours aux Risk Breakdown Structures*. 29èmes Rencontre Universitaires de Génie Civil. Tlemcen (Algérie).

Taillandier, F., A. Micolier and M. Chaplain (2018). *Domego, un jeu sérieux pour l'apprentissage de la gestion d'une opération de construction*. 36èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil. Saint-Etienne (France).

Taillandier, F., L. Mora and D. Breysse (2016). "Decision support to choose renovation actions in order to reduce house energy consumption – An applied approach." *Building and Environment* 109: 121-134.

Taillandier, F., A. Ndiaye and C. Fernandez (2012). "Optimisation par essaim particulière de la planification des actions de maintenance d'un parc immobilier." *Les Annales du BTP* 6: 48-54.

Taillandier, F., G. Sauce and R. Bonetto (2009). "Elaboration of a long-term maintenance plan for building stock based on arbitration using a risk approach." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 13(4): 383-397.

Taillandier, F., G. Sauce and R. Bonetto (2009). "Risk-based investment trade-off related to building facility management." *Reliability Engineering & System Safety* 94(4): 785-795.

Taillandier, F., G. Sauce and R. Bonetto (2011). "Method and tools for building maintenance plan arbitration." *Engineering, Construction and Architectural Management* 18(4): 343-362.

Taillandier, F. and P. Taillandier (2014). *Risk Management in Construction Project Using Agent-Based Simulation. Highlights of Practical Applications of Heterogeneous Multi-Agent Systems*. The PAAMS Collection: PAAMS 2014 International Workshops, Salamanca, Spain, June 4-6, 2014. Proceedings. J. M. Corchado, J. Bajo, J. Kozlak et al. Cham, Springer International Publishing: 34-43.

Taillandier, F., P. Taillandier, F. Hamzaoui and D. Breysse (2016). "A new agent-based model to manage construction project risks – application to the crossroad of Bab El Karmadine at Tlemcen." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 20(10): 1197-1213.

Taillandier, F., P. Taillandier and A. Micolier (2017). *Li-BIM – Simulation du comportement des occupants d'un bâtiment à partir d'une maquette numérique*. 35èmes Rencontre Universitaires de Génie Civil. Nantes.

Taillandier, F., P. Taillandier, E. Tepeli, D. Breysse, R. Mehdizadeh and F. Khartabil (2015). "A multi-agent model to manage risks in construction project (SMACC)." *Automation in Construction* 58: 1-18.

Taillandier, P., M. Bourgeois, P. Caillou, C. Adam and B. Gaudou (2016). *A BDI agent architecture for the GAMA modeling and simulation platform*. MABS 2016 Multi-Agent-Based Simulation, Singapore, Singapore.

Taillandier, P., E. Daudé, F. Rousseaux, N. Bécu, F. Amblard, B. Gaudou, P. Caillou, N. Marilleau, A. Grignard, C. Adam and V. Bagneux. (2015). "Agents Cognitifs Territorialisés pour l'Etude des dynamiques Urbaines et des Risques (ACTEUR)." Retrieved 2018, from <http://www.acteur-anr.fr/>.

Taillandier, P., C. Duchêne and A. Drogoul (2008). *Knowledge revision in systems based on an informed tree search strategy : application to cartographic generalisation*. Knowledge Revision; Problem Solving; Informed Tree Search Strategy; Cartographic Generalisation., Paris, France, IEEE.

- Taillandier, P. and F. Taillandier (2012). "Multi-criteria diagnosis of control knowledge for cartographic generalisation." *European Journal of Operational Research* 217(3): 633-642.
- Talbi, E.-G. (2009). *Metaheuristics: from design to implementation*, Wiley.
- Tamani, N. and M. Croitoru (2014). *Fuzzy Argumentation System for Decision Support. Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*, Cham, Springer International Publishing.
- Taroun, A. (2014). "Towards a better modelling and assessment of construction risk: Insights from a literature review." *International Journal of Project Management* 32(1): 101-115.
- Tepeli, E. (2014). *Processus formalisé et systémique de management des risques par des projets de construction complexes et stratégiques*. PhD, Université de Bordeaux.
- Tepeli, E., D. Breysse, F. Khartabil, F. Taillandier, R. Mehdizadeh and D. Morand (2013). *Project risk management in construction projects: developing modeling tools to favour a multidisciplinary approach*. 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, New-York, Etats-Unis.
- Tervonen, T., J. R. Figueira, R. Lahdelma, J. A. Dias and P. Salminen (2009). "A stochastic method for robustness analysis in sorting problems." *European Journal of Operational Research* 192(1): 236-242.
- Tesfaye, E., E. Berhan and D. Kitaw (2016). "A Comprehensive Literature Review on Construction Project Risk Analysis." *Int. J. Risk Conting. Manag.* 5(4): 1-15.
- Thimm, M. and S. Villata (2017). "The first international competition on computational models of argumentation: Results and analysis." *Artificial Intelligence* 252: 267-294.
- Thioub, S., O. Graziani and F. Taillandier (2018). *Vers une scénarisation non déterministe de l'usage d'un bâtiment 36èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil*. Saint-Etienne (France).
- Thøgersen, J. (1995). "Understanding of consumer behaviour as a prerequisite for environmental protection." *Journal of consumer policy* 18(4): 345-385.
- Thomas, P. J. (2016). "Measuring risk-aversion: The challenge." *Measurement* 79: 285-301.
- Thomopoulos, R., M. Croitoru and N. Tamani (2015). "Decision support for agri-food chains: A reverse engineering argumentation-based approach." *Ecological Informatics* 26, Part 2: 182-191.
- Tifkitsis, K. I., T. S. Mesogitis, G. Struzziero and A. A. Skordos (2018). "Stochastic multi-objective optimisation of the cure process of thick laminates." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 112: 383-394.
- Tissot, J.-Y. and C. Prieur (2012). *Variance-based sensitivity analysis using harmonic analysis*.
- Torti, L. and P.-H. Wuillemin. (2017). "O3PRM Language Specification." from http://o3prm.gitlab.io/pdfs/o3prm_reference.pdf.
- Toulmin, S. E. (2003). *The Uses of Argument*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Tran, T. T. P. (2018). *Representation and simulation of construction projects tainted with uncertainties by using probabilistic relational models*, Université de Bordeaux.
- Tricot, A., F. Plégat-Soutjis, J.-F. Camps, A. Amiel, G. Lutz and A. Morcillo (2003). *Utilité, utilisabilité, acceptabilité: interpréter les relations entre trois dimensions de l'évaluation des EIAH. Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain*. Strasbourg.
- Tsavidaroglou, M., S. H. S. Al-Jibouri, T. Bles and J. I. M. Halman (2018). "Proposed methodology for risk analysis of interdependent critical infrastructures to extreme weather events." *International Journal of Critical Infrastructure Protection* 21: 57-71.
- Tuffery, S. (2017). *Data Mining et statistique décisionnelle*. Paris, Technip.
- Vaast, E. (2008). "Travail en réseau et réalités hiérarchiques - Ce que révèlent les systèmes d'information." *Informations sociales* 147: 48-57.
- Vadhan, S. (2007). *The Complexity of Zero Knowledge*. FSTTCS 2007: Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.

- Vadim, K. (2018). "Overview of different approaches to solving problems of Data Mining." *Procedia Computer Science* 123: 234-239.
- Vansnick, J.-C. (1986). "On the problem of weights in multiple criteria decision making (the noncompensatory approach)." *European Journal of Operational Research* 24(2): 288-294.
- Verner-Filion, J., M.-A. K. Lafrenière and R. J. Vallerand (2012). "On the accuracy of affective forecasting: The moderating role of passion." *Personality and Individual Differences* 52(7): 849-854.
- Volk, R., J. Stengel and F. Schultmann (2014). "Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs." *Automation in Construction* 38: 109-127.
- Vorobiev, I. and A. V. Samsonovich (2018). "A Conceptually Different Approach to the Empirical Test of Alan Turing." *Procedia Computer Science* 123: 512-521.
- Walewski, J. and E. G. Gibson (2003). *International Project Risk Assessment: Methods, Procedures and Critical Factors*. Center Construction Industry Studies Report. Austin, University of Texas. 31.
- Wallace, L. G. and S. D. Sheetz (2014). "The adoption of software measures: A technology acceptance model (TAM) perspective." *Information & Management* 51(2): 249-259.
- Wang, B., X. Xia and J. Zhang (2014). "A multi-objective optimization model for the life-cycle cost analysis and retrofitting planning of buildings." *Energy and Buildings* 77: 227-235.
- Wang, L., R. Yang, H. Ni, W. Ye, M. Fei and P. M. Pardalos (2015). "A human learning optimization algorithm and its application to multi-dimensional knapsack problems." *Applied Soft Computing* 34: 736-743.
- Wang, R., W. Ji, M. Liu, X. Wang, J. Weng, S. Deng, S. Gao and C.-a. Yuan (2018). "Review on mining data from multiple data sources." *Pattern Recognition Letters* 109: 120-128.
- Wang, W., S. Yang, F. Hu, H. E. Stanley, S. He and M. Shi (2018). "An approach for cascading effects within critical infrastructure systems." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 510: 164-177.
- Wenger, E. (2005). *La théorie des communautés de pratique. Apprentissage, sens et identité* Québec, Presses de l'Université Laval.
- Wette, R. (2017). "Using mind maps to reveal and develop genre knowledge in a graduate writing course." *Journal of Second Language Writing* 38: 58-71.
- Wiener, N. (2014). *La cybernétique : Information et régulation dans le vivant et la machine*. Paris, Seuil.
- Wiltshire, T. J., S. F. Warta, D. Barber and S. M. Fiore (2017). "Enabling robotic social intelligence by engineering human social-cognitive mechanisms." *Cognitive Systems Research* 43: 190-207.
- Wolpert, D. H. and W. G. Macready (1997). "No free lunch theorems for optimization." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 1(1): 67-82.
- Wouters, P., E. D. v. d. Spek and H. v. Oostendorp (2009). *Current Practices in Serious Game Research: A Review from a Learning Outcomes Perspective*. Games-Based Learning Advancements for Multi-Sensory Human Computer Interfaces: Techniques and Effective Practices. C. Thomas, S. Mark and B. Liz. Hershey, PA, USA, IGI Global: 232-250.
- Wu, J.-Z. and P.-J. Tiao (2018). "A validation scheme for intelligent and effective multiple criteria decision-making." *Applied Soft Computing* 68: 866-872.
- Wu, R., G. Mavromatidis, K. Orehounig and J. Carmeliet (2017). "Multiobjective optimisation of energy systems and building envelope retrofit in a residential community." *Applied Energy* 190: 634-649.
- Wu, W.-S., C.-F. Yang, J.-C. Chang, P.-A. Château and Y.-C. Chang (2015). "Risk assessment by integrating interpretive structural modeling and Bayesian network, case of offshore pipeline project." *Reliability Engineering & System Safety* 142: 515-524.
- Xiao, R., Y. Zhang and Z. Huang (2015). "Emergent computation of complex systems: a comprehensive review." *International Journal of Bio-Inspired Computation* 7(2): 75-97.

Xiaohui, H. and R. Eberhart (2002). Multiobjective optimization using dynamic neighborhood particle swarm optimization. Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. CEC'02 (Cat. No.02TH8600).

Xiaohui, H., R. C. Eberhart and S. Yuhui (2003). Swarm intelligence for permutation optimization: a case study of n-queens problem. Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium. SIS'03 (Cat. No.03EX706).

Xu, J., J.-H. Kim, H. Hong and J. Koo (2015). "A systematic approach for energy efficient building design factors optimization." *Energy and Buildings* 89: 87-96.

Xue, X., X. Li, Q. Shen and Y. Wang (2005). "An agent-based framework for supply chain coordination in construction." *Automation in Construction* 14(3): 413-430.

Yang, S. T., K. F. Li and C. Q. Li (2017). "Numerical determination of concrete crack width for corrosion-affected concrete structures." *Computers & Structures*.

Yeh, C.-H., R. J. Willis, H. Deng and H. Pan (1999). "Task oriented weighting in multi-criteria analysis." *European Journal of Operational Research* 119(1): 130-146.

Yepes, V., C. Torres-Machi, A. Chamorro and E. Pellicer (2016). "Optimal pavement maintenance programs based on a hybrid Greedy Randomized Adaptive Search Procedure Algorithm." *Journal of Civil Engineering and Management* 22(4): 540-550.

Zanakis, S. H., A. Solomon, N. Wishart and S. Dublisch (1998). "Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods." *European Journal of Operational Research* 107(3): 507-529.

Zhang, L.-x., J. Qin, Y.-x. He, Y. Ye and L.-l. Ni (2015). "Network-level optimization method for road network maintenance programming based on network efficiency." *Journal of Central South University* 22(12): 4882-4889.

Zhang, R., W. Y. Yun and I. Moon (2009). "A reactive tabu search algorithm for the multi-depot container truck transportation problem." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 45(6): 904-914.

Zhang, Z., F. Vanderhaegen and P. Millot (2006). *Prediction of Human Behaviour Using Artificial Neural Networks*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.

Zhao, W., Z. Luan and C. Wang (2018). "Parameter optimization design of vehicle E-HHPS system based on an improved MOPSO algorithm." *Advances in Engineering Software* 123: 51-61.

Zhi, H. (1995). "Risk management for overseas construction projects." *International Journal of Project Management* 13(4): 231-237.

Zhong, B. and Y. Li (2015). "An Ontological and Semantic Approach for the Construction Risk Inferring and Application." *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 79(3): 449-463.

Zitrou, A., T. Bedford and A. Daneshkhah (2013). "Robustness of maintenance decisions: Uncertainty modelling and value of information." *Reliability Engineering & System Safety* 120: 60-71.

Zuccaro, G., D. De Gregorio and M. F. Leone (2018). "Theoretical model for cascading effects analyses." *International Journal of Disaster Risk Reduction* 30: 199-215.