

Intérêts et usages de la théorie des fonctions de croyance pour les systèmes d'aide à la décision fondés sur les systèmes multi-agents.

Application à l'entomologie médico-légale.

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 08 décembre 2010

pour l'obtention du

Doctorat de l'université d'Artois

(spécialité : Génie Informatique et Automatique)

par

Alexandre Veremme

Composition du jury

Président :

Rapporteurs : Arnaud Martin Professeur des Universités (IRISA, Université de Rennes 1)
Jean-Pierre Müller Docteur, HDR (CIRAD de Montpellier)

Examineur : Zied Elouedi Maître de Conférences (Institut Supérieur de Gestion de Tunis)

Directeur de thèse : Daniel Jolly Professeur des Universités (LGI2A, Université d'Artois)

Co-encadrants : Daniel Dupont Enseignant-chercheur, HDR (HEI, Université Catholique de Lille)
Eric Lefèvre Maître de Conférences (LGI2A, Université d'Artois)

Membres invités : Philippe Kubiak Maître de Conférences (LAGIS, Université de Lille 1)
Benoît Vincent Institut de Recherche Criminelle de la Gendarmerie Nationale

Remerciements

Pour leur soutien, leur bienveillance et leurs conseils, je remercie chaleureusement mes trois encadrants de thèse : Daniel Jolly – professeur et directeur du Laboratoire de Génie Informatique et d’Automatique de l’Artois (LGI2A, Béthune) –, Eric Lefèvre – maître de conférences à l’IUT de Béthune et chercheur au LGI2A – ainsi que Daniel Dupont – enseignant-chercheur (HDR) à l’école des Hautes Etudes d’Ingénieur (HEI, Lille). Tous trois sont à l’origine de ces travaux et ont contribué à leur aboutissement.

Je tiens à exprimer mes profonds respects aux membres du jury, ayant accepté d’évaluer ces travaux.

Pour tous ces moments de discussion et d’échange passés à leurs côtés, je remercie mes proches collègues et maintenant amis : Damien Charabidze – chercheur post-doctoral au laboratoire d’entomologie de l’Institut de Médecine Légale (IML, Lille) – et Gildas Morvan – maître de conférences à l’IUT de Béthune et chercheur au LGI2A.

Je remercie la Fondation Norbert Ségard (FNS)¹ et l’école des Hautes Etudes d’Ingénieur (HEI, Lille) pour m’avoir accordé un financement durant ces trois années et accueilli dans leurs locaux. J’exprime ainsi ma profonde reconnaissance à Jean-Marc Idoux – directeur général de HEI –, Benoît Robyng – directeur de la recherche (HEI) – et Antoine Henneon – adjoint de la recherche (HEI) – ainsi qu’à Bernard Deltête – président de la FNS –, Elisabeth Baumelou-Torck – présidente du comité scientifique de la FNS –, Paul Astier, André Cochetoux, Maurice Cotte, Olivier Devienne et Arnaud Ségard – membres du comité exécutif de la FNS.

J’adresse également mes remerciements aux membres du département Timtex (HEI) pour ces agréables moments passés en leur compagnie : Edith Leleu, Chiraz El Ghoul, Julie Boulenguez, Denis Deranton, Daniel Steen et Daniel Dupont.

Je souhaite remercier les membres du LGI2A : Milka Uzunova, Vesela Dryankova, Magali Houlette, Bernadette Phellion, Gilles Goncalves, David Mercier, Issam Nouaouri, Mohamed Amir Esseghir, Kamel Boumediene, Yamine Bouzembrak, Guillem Lefait, Hassane Abouaissa, Hamid Allaoui, François Delmotte, Yuhan Guo, Tienté Hsu et Roman Potarusov.

Je remercie Philippe Kubiak – maître de conférences au LAGIS (Lille) – qui le premier, m’a ouvert les portes de ce groupe de recherche. Je remercie également toutes les personnes, qui chacune à leur manière, m’ont aidé au cours de ces trois ans : Annie Grière (HEI), Laurent Peyrodie – enseignant-chercheur à HEI –, Benoît Bourel et Cédric Devigne – du Laboratoire Environnement et Santé (Univ. Catholique, Lille).

¹C.f., <http://www.norbert-segard.org>.

Je remercie les enseignants et l'administration de l'Institut de Génie Informatique et Industriel (IG2I, Lens) pour la formation d'ingénieur dispensée lors des cinq années précédant la thèse. Je n'oublie pas que l'IG2I a participé à la réussite de ces travaux.

J'adresse mes remerciements à Denis Roegel, maître de conférence à l'Université de Nancy 2, pour la mise à disposition de la classe LaTeX *thloria*. La structure de ce rapport est basée sur ses travaux, offrant souplesse et qualité pour ce genre de rédaction. C.f., <http://www.loria.fr/~roegel/TeX/TL.html>.

Je te remercie Amélie, pour ton soutien, ton enthousiasme, ta présence, ton amour, tes critiques, tes analyses, tes remarques, etc., et ton œil attentif lors de la relecture de ce manuscrit. Je n'oublie pas ce soir d'été – tu étais d'ailleurs debout, regardant la mer, l'air était si doux, et dans la lumière, tes yeux brillaient – où, par tes conseils, j'ai pris la décision de poursuivre en doctorat.

Je pense bien évidemment à ma famille qui me supporte et m'encourage depuis plus de 26 ans : mes parents Dominique et Stéphane ; mon frère et mes sœurs : Antoine, Céline, Aurélie et Aline. Une pensée particulière est destinée à ma grand-mère, ainsi qu'à Maïté et Baudoin pour leur soutien et les corrections des articles anglophones.

Enfin, j'adresse un petit clin d'œil aux adeptes de l'*asticot mou* : Emeline, Juliette, Camille, Julie, Alette, Sonia, Nico, Thomas, François, Adrien, Damien, Tanguy, Pierre et les autres : Simon et les Rouennaises, Gaëlle, Steuf' et NoNo.

À Raymonde.

Table des matières

Table des figures	ix
Liste des tableaux	xi
<hr/>	
Introduction générale	2
<hr/>	
Partie I Systèmes complexes et traitement des informations imparfaites	6
Introduction	7
Chapitre 1 Complexité : apparition, évolution, définition, modélisation et simulation	8
1.1 Introduction	8
1.2 Une ère de pensées <i>pré-complexes</i>	9
1.2.1 Des pensées présocratiques	9
1.2.2 La pensée platonicienne	11
1.2.3 La pensée aristotélicienne	12
1.2.4 La pensée cartésienne	13
1.2.5 Synthèse	20
1.3 Vers un paradigme général de la complexité...	22
1.3.1 Une nécessaire remise en question	22
1.3.2 Introduction : le <i>nouveau discours de la méthode</i> de J.-L. Le Moigne	23
1.3.3 Notions essentielles de la complexité	25
1.3.4 Synthèse	28
1.4 Modélisation et simulation de systèmes complexes	29
1.4.1 Modèle et modélisation	29
1.4.2 Simulation	29
1.4.3 De la simulation aux systèmes multi-agents, bref historique	31
1.4.4 Les systèmes multi-agents	32
1.4.5 Les automates cellulaires	37

1.5	Conclusion	39
Chapitre 2 Traitement des informations imparfaites et théorie des fonctions de croyance		40
2.1	Introduction	40
2.2	Fusion d'informations imparfaites	42
2.2.1	Informations imparfaites	42
2.2.2	Fusion d'informations et systèmes de fusion	44
2.3	Théorie des fonctions de croyance et Modèle des Croyances Transférables	45
2.3.1	Introduction	45
2.3.2	Représentation des croyances	46
2.3.3	Manipulation des connaissances	50
2.3.4	Prise de décision	60
2.4	Estimations des fonctions de masse de croyance	62
2.4.1	Contexte	63
2.4.2	Approche fondée sur le calcul de distances	64
2.4.3	Approche fondée sur le calcul de vraisemblances	65
2.4.4	Approches fondées sur des matrices de confusion	66
2.4.5	Autres approches d'estimation	67
2.5	Conclusion	67
Conclusion		68

Partie II Architecture d'un Système Evidentiel Multi-Agents d'Aide à la Décision 70

Introduction 71

Chapitre 3 Architecture générale d'un Système Evidentiel d'Aide à la Décision 72

3.1	Introduction	72
3.2	Du système réel	73
3.2.1	Contexte simplifié	73
3.2.2	Nécessité d'un raisonnement <i>abductif</i>	74
3.3	... au système d'aide à la décision	76
3.3.1	Modèles prédictifs	76
3.3.2	Processus d' <i>Etalonnage</i> simplifié	77
3.4	Extensions et <i>evidentialisation</i> de l' <i>Etalonnage</i>	81
3.4.1	Motivations	81
3.4.2	Méta-informations, notations	82
3.4.3	<i>Evidentialisation</i> des processus	83
3.5	Architecture	87
3.5.1	Processus de <i>Décision</i>	87

3.5.2	Processus de <i>Rétroaction</i>	89
3.6	Commentaires et perspectives	90
3.6.1	Commentaires	90
3.6.2	Perspectives	92
3.7	Conclusion	93
Chapitre 4 Validation évidentielle de simulations orientées agents		94
4.1	Introduction	94
4.1.1	Aperçu des méthodes d'observation et de validation de SOA	95
4.1.2	Motivations	96
4.2	Validation évidentielle dynamique de SOA	98
4.2.1	Notations, principes et architecture pyramidale	98
4.2.2	Comportement des agents <i>sondés ag_j</i>	100
4.2.3	Comportement des <i>Agents-Paramètre p_i</i>	101
4.2.4	Comportement de l' <i>Agent-Validation</i>	105
4.2.5	Comportement de l' <i>Agent-Launcher</i>	107
4.2.6	Algorithme de synthèse	108
4.3	Liens avec le processus de <i>Manipulation_s</i>	109
4.3.1	Processus de <i>Manipulation_s</i> et extension vide	109
4.3.2	Combinaison finale	110
4.4	Conclusions et perspectives	111
Conclusion		112

Partie III ForenSeek : un système évidentiel multi-agents d'aide à la décision dédié à l'entomologie médico-légale 114

Avant-propos 115

Chapitre 5 De l'entomologie médico-légale au SEAD ForenSeek 117

5.1	Introduction	117
5.2	L'entomologie médico-légale	118
5.2.1	Principes et chronologie d'une expertise entomologique	118
5.2.2	Température et développement des diptères	121
5.2.3	Problématiques et imperfections des expertises	125
5.3	Modélisation et simulation de la dégradation d'un corps	129
5.3.1	Modélisation du cadavre	129
5.3.2	Modélisation des agents du système	130
5.3.3	Multiplicité et initialisation des modèles multi-agents	131
5.4	ForenSeek : objectifs, architecture et implémentation	132
5.4.1	Architecture et implémentation	133
5.4.2	Agentification généralisée	134
5.4.3	<i>Validation</i> d'une simulation multi-agents	135

5.4.4	Processus de <i>Manipulation_{finale}</i> au sein de ForenSeek	136
5.5	Résultats	137
5.5.1	Expertise a	138
5.5.2	Expertise b	139
5.5.3	Expertise c	141
5.5.4	Expertise d	142
5.6	Perspectives et conclusions de l'application	144

Conclusions et perspectives générales	146
--	------------

Annexes	149
----------------	------------

Annexe A Implémentation du projet ForenSeek : les principaux diagrammes de classes	150
A.1 Package <i>forenseek</i>	150
A.1.1 Sous-packages	150
A.1.2 Classes principales	151
A.2 Package <i>db</i>	152
A.2.1 Package <i>operation</i>	153
A.2.2 Package <i>model</i>	154
A.2.3 Package <i>body</i>	155
A.2.4 Package <i>climaticData</i>	156
A.2.5 Package <i>validation</i>	157
Annexe B Interfaces graphiques : aperçus des principaux écrans	158

Bibliographie	165
Références de l'auteur	184

Table des figures

1.1	Classification positiviste d'Auguste Comte.	19
1.2	Evolution temporelle et influences des pensées dominantes.	21
1.3	La boucle tétralogique.	25
1.4	Le concept trinitaire.	26
1.5	Les trois domaines de l'IA.	32
1.6	Métamodèle organisationnel AGR.	36
1.7	Exemple d'automate à états finis.	36
2.1	Relations entre les différentes mesures de croyance.	49
2.2	Opérations de grossissement et de raffinement.	57
2.3	Positionnement de l'étape d'estimation. Contexte 1.	64
2.4	Positionnement de l'étape d'estimation. Contexte 2.	66
3.1	Schématisation du raisonnement abductif.	75
3.2	Processus global d'étalonnage.	77
3.3	Exemple d'étalonnage d'un unique modèle.	80
3.4	Processus d' <i>Observation</i> évidentialisé.	84
3.5	Processus de <i>Validation</i> évidentialisé.	86
3.6	Processus de <i>Sélection</i> évidentialisé.	87
3.7	Architecture générale du SEAD.	88
3.8	Echanges de messages entre les <i>Processus</i> et <i>Sources</i>	91
4.1	Architecture pyramidale de validation évidentielle.	99
4.2	Comportement d'un agent ag_j	100
4.3	Comportement d'un <i>Agent-Paramètre</i> p_i	101
4.4	Obtention de la fonction de masse exprimant la validité.	103
4.5	Obtention du facteur d'affaiblissement en fonction du temps.	104
4.6	Comportement de l' <i>Agent-Validation</i>	105
4.7	Exemple de <i>Validation</i>	107
4.8	Opération de grossissement dans le cadre de la validation.	109
4.9	Processus évidentiel de <i>Manipulation_s</i>	110
1	Interactions des trois principaux protagonistes du projet ForenSeek.	116
5.1	Schématisation de l'écosystème <i>cadavre</i>	119
5.2	Cycle de développement <i>holométabole</i> des diptères <i>Calliphoridae</i>	120

5.3	Schématisation du processus d'expertise entomologique.	122
5.4	Exemple de séries de données de développement.	124
5.5	Observation de l'inertie thermique d'un cadavre en décomposition.	127
5.6	Autorégulation de la température d'une masse de larves.	128
5.7	Structure spaciale du modèle de cadavre utilisé dans ForenSeek.	130
5.8	Cycle comportemental des <i>Agents-Larve</i>	131
5.9	Echanges de messages entre l' <i>Agent-Expertise</i> et les <i>Agents-Launcher</i>	134
5.10	Expertise <i>a</i> : probabilités pignistiques des heures de pontes estimées.	140
5.11	Expertise <i>b</i> : probabilité pignistique des heures de pontes estimées.	140
5.12	Expertise <i>c</i> : probabilités pignistiques des heures de pontes estimées.	143
5.13	Expertise <i>d</i> : probabilités pignistiques des heures de pontes estimées.	143
A.1	Le package <i>forenseek</i>	150
A.2	Classes du package <i>forenseek</i>	151
A.3	Le package <i>db</i>	152
A.4	Le package <i>operation</i>	153
A.5	Le package <i>model</i>	154
A.6	Le package <i>body</i>	155
A.7	Le package <i>climaticData</i>	156
A.8	Le package <i>validation</i>	157
B.1	Ecran d'accueil de ForenSeek.	158
B.2	Ecran de choix.	159
B.3	Ecran de chargement des expertises.	159
B.4	Ecran de définition de l'intervalle <i>post mortem</i> maximum.	159
B.5	Ecran de saisie des températures ambiantes.	160
B.6	Ecran de spécifications des caractéristiques du cadavre.	160
B.7	Ecran définition de l'écosystème.	161
B.8	Ecran de définition des modèles biologiques.	162
B.9	Ecran d'enregistrement des prélèvements effectués.	163
B.10	Ecran de finalisation.	163
B.11	Ecran d'affichage de l'évolution en temps réel.	164
B.12	Ecrans d'affichage des résultats.	164

Liste des tableaux

1.1	Les trois axiomes de la logique disjonctive d'Aristote.	12
1.2	Les quatre préceptes du Discours de la méthode de René Descartes.	15
1.3	Les quatre préceptes du nouveau discours de J.-L. Le Moigne.	24
2.1	Les principaux opérateurs de combinaison.	57

Introduction générale

Tout est complexe. Pourtant, nos capacités de perception et de décision nous permettent-elles de (ré)agir correctement face à la complexité qui nous entoure et nous constitue ? L'Histoire semble vouloir nous rappeler que des visions trop simplifiées de la réalité, peuvent avoir des effets néfastes sur nos raisonnements et actions destinés aux systèmes qui nous englobent. Les illustrations sont nombreuses, p. ex. : crises des systèmes financiers, sociaux, énergétiques. Certains de ces échecs sont le résultat d'un *axe de pensées* guidant philosophes et scientifiques de nos sociétés occidentales – lire p. ex. [158]. Le *Discours de la méthode* [81] de René Descartes et ses quatre préceptes *d'évidence*, de *réduction*, de *causalité* et *d'exhaustivité* forment l'une des plus célèbres représentations du « paradigme de simplification » imposant de disjoindre et de réduire [192].

Mais, les solutions à nos problèmes se trouvent-elles uniquement dans la décomposition et la réduction ? Face aux déceptions véhiculées par les *méthodes cartésiennes*, des penseurs, de Blaise Pascal à Edgar Morin, ont ainsi proposé de nombreuses alternatives. En France, la *pensée complexe* d'Edgar Morin [189] est d'ailleurs le symbole contemporain de ces courants alternatifs. Elle fait intervenir un ensemble de notions comme le *désordre*, l'*ordre*, l'*organisation*, l'*interaction*, la *rétroaction*, l'*émergence*, etc., essentiel à la caractérisation de tout système. Elle et ses théories associées – p. ex., théorie de l'information, théorie des systèmes – participent ainsi à l'élaboration d'une vision différente du monde.

Les apports des alternatives complexes, amplifiés par les progrès techniques et technologiques du siècle dernier, ont conduit à la démocratisation de l'*informatique*. Les ordinateurs et leur puissance de calcul, privilégiés dans nos tâches quotidiennes, restent cependant sous-employés pour appréhender les *systèmes complexes*. Les difficultés inhérentes à l'observation de ces systèmes, composés d'un grand nombre d'acteurs hétérogènes en interaction, peuvent en effet être limitées par des outils comme la *simulation numérique*. Les simulations orientées agents (SOA) [263] et les simulations par automates cellulaires (AC) [262] présentent des avantages certains pour reproduire les phénomènes complexes et prendre en compte les connaissances issues de différents niveaux, du *microscopique* au *macroscopique* [198].

Par nature, les informations des systèmes complexes sont imparfaites – c.-à-d., imprécises, incertaines, etc. Ainsi, pour expliquer ou anticiper les états de ces systèmes, un formalisme de représentation et de manipulation des informations paraît nécessaire. Si les simulations numériques permettent de modéliser un système complexe, elles doivent être accompagnées d’un outil pour considérer les imperfections et prendre des décisions. Parmi les *théories de l’incertain*, la *théorie des fonctions de croyance* [233] est particulièrement bien adaptée aux systèmes complexes [68] et à la modélisation des différents types d’imperfection.

Ces travaux s’appuient sur le *socle* formé par les simulations orientées agents, les simulations par automates cellulaires et les fonctions de croyance. Les objectifs sont de proposer des solutions aux problèmes complexes et de développer une architecture de système d’aide à la décision (SAD) organisée autour de ces trois *outils*. Dans la mesure où ce système fait appel à la théorie des fonctions de croyance – aussi appelée *théorie de l’évidence* –, nous l’avons nommé SEAD, c.-à-d., système évidentiel d’aide à la décision. Le SEAD tente de fournir des explications à une observation effectuée sur un système réel complexe. Il utilise :

- les SOA et les AC pour simuler le système d’étude ;
- les fonctions de croyance pour représenter et manipuler les informations *au sein et autour* des simulations.

Le cœur du SEAD se base sur un processus itératif dont le but est de faire correspondre un modèle au système d’étude. Il s’agit en fait de *valider* et d’*étalonner* successivement un modèle simulé [276]. L’*étalonnage* est le processus qui consiste à choisir un jeu de paramètres à tester. Le processus de *validation* contrôle le niveau de conformité d’une simulation – initialisée avec un jeu de paramètres préalablement choisi – par rapport à une réalité connue. Mais alors que le coût algorithmique d’une simulation orientée agents peut être important, il augmente significativement lorsqu’un traitement – comme une étape de validation – est effectué [199]. Ainsi, la validation de simulations orientées agents, considérée comme « une des tâches les plus difficiles et importantes à laquelle un modélisateur peut être confronté » [20, *trad. p. 388*], est l’une de ces tâches gourmandes en ressources computationnelles – p. ex., temps de calcul – que cette thèse aborde. Elle montre l’intérêt des fonctions de croyance pour cette opération délicate.

Tout d’abord présentée de manière théorique, l’architecture est ensuite validée par une mise en pratique. Il s’agit de développer un système d’aide à la décision dédié aux experts en entomologie médico-légale. Lorsqu’une personne décède et que les conditions le permettent, son cadavre est colonisé par des insectes nécrophages. Trois jours après le décès, les techniques médico-légales habituelles de datation de la mort – p. ex., mesure de la température rectale – ne sont plus efficaces. L’entomologie médico-légale est alors le seul procédé d’estimation de cet instant : à partir de la détermination des espèces et âges

des insectes prélevés sur le cadavre. Basée sur des principes relativement simples, cette technique est pourtant confrontée à un ensemble de phénomènes complexes, difficilement perceptibles des experts et ayant des impacts sur leurs décisions finales [43]. Ces travaux présentent donc un logiciel d'aide à la décision, baptisé ForenSeek, ayant recours aux SOA et aux AC pour modéliser la dégradation d'un cadavre par les insectes nécrophages. Il intègre un grand nombre de paramètres écosystémiques et, pour améliorer la fiabilité et réduire la subjectivité des expertises, teste une quantité importante de modèles biologiques. La théorie des fonctions de croyance est au centre de ce système de fusion. Des premiers résultats à partir de véritables expertises judiciaires sont présentés.

Ce manuscrit se décompose en trois parties. La partie I présente un état des connaissances et détaille les motivations à l'origine des choix effectués. Après une description des pensées dominantes de l'Antiquité à nos jours – c.f., section 1.2 –, ayant conduit à la *pensée complexe* – c.f., section 1.3 –, le chapitre 1 met en valeur les outils de modélisation et de simulation adaptés à la complexité – c.f., section 1.4. Le chapitre 2 revient sur la théorie des fonctions de croyance. L'ensemble des étapes relatives à un système de fusion d'informations imparfaites est ainsi avancé : de l'estimation des croyances – c.f., section 2.4 – à la prise de décision – c.f., sous-section 2.3.4. Le système évidentiel d'aide à la décision intervient dans la partie II. Le chapitre 3 détaille l'ensemble des sous-processus prenant part à la décision globale. Chacun de ces processus répond à des questions intermédiaires et exprime ses croyances dans le cadre de la théorie des fonctions de croyance. Le processus de validation est précisé pour des simulations orientées agents dans le chapitre 4. Enfin, l'application en entomologie médico-légale est présentée dans la partie III. La description du contexte applicatif, des problèmes auxquels sont confrontés les experts et du logiciel développé se trouve dans le dernier chapitre. Les décisions du logiciel sont confrontées à des décisions d'experts issues d'expertises judiciaires – c.f., section 5.5.

Première partie

Systemes complexes et traitement des informations imparfaites

Introduction

La première partie de ce manuscrit propose une approche historique de la complexité. Elle débute en retraçant l'évolution temporelle de la pensée dominante occidentale – c.f., section 1.2 du chapitre 1. Ce chapitre révèle les aspects historiques, depuis l'Antiquité, de la *pensée complexe*. Celle-ci apparaît alors comme une conséquence nécessaire de l'évolution des pensées de nos sociétés – c.f., section 1.3. Les notions essentielles des systèmes dits complexes sont avancées. Puis, dans la section 1.4, les systèmes multi-agents (SMA) et les automates cellulaires (AC) – ainsi que les simulations orientées agents et les simulations par automates cellulaires – sont présentés comme des outils puissants pour modéliser et simuler la complexité.

Après avoir mis en avant les imperfections des informations véhiculées au sein des systèmes complexes, la théorie des fonctions de croyance est introduite. En effet, elle apparaît adaptée à la représentation et la manipulation des informations imparfaites – c.f., chapitre 2. La présentation des principales opérations de la théorie intervient dans ce chapitre.

Les objectifs de cette partie sont de décrire les SMA, AC et fonctions de croyance, avant de révéler leurs liens dans les parties suivantes. Ils constituent le socle du système d'aide à la décision.

Chapitre 1

Complexité : apparition, évolution, définition, modélisation et simulation

Sommaire

1.1	Introduction	8
1.2	Une ère de pensées <i>pré-complexes</i>	9
1.2.1	Des pensées présocratiques	9
1.2.2	La pensée platonicienne	11
1.2.3	La pensée aristotélicienne	12
1.2.4	La pensée cartésienne	13
1.2.5	Synthèse	20
1.3	Vers un paradigme général de la complexité...	22
1.3.1	Une nécessaire remise en question	22
1.3.2	Introduction : le <i>nouveau discours de la méthode</i> de J.-L. Le Moigne	23
1.3.3	Notions essentielles de la complexité	25
1.3.4	Synthèse	28
1.4	Modélisation et simulation de systèmes complexes	29
1.4.1	Modèle et modélisation	29
1.4.2	Simulation	29
1.4.3	De la simulation aux systèmes multi-agents, bref historique	31
1.4.4	Les systèmes multi-agents	32
1.4.5	Les automates cellulaires	37
1.5	Conclusion	39

1.1 Introduction

Au cours de l'Histoire, de l'Antiquité à nos jours, différents courants de pensée se sont succédés, enchevêtrés, inspirés, ignorés, etc. Dans nos sociétés occidentales, la pensée dominante, initialement exposée en 1637 dans le *Discours de la méthode* [81] de René

Descartes², aussi connue sous le nom de *pensée cartésienne* ou encore de *cartésianisme*, a gouverné scientifiques et philosophes pendant plus de trois cents ans « comme une règle de vie intellectuelle dogmatique et paisible »³. Déjà à l'époque de René Descartes, des penseurs, comme Blaise Pascal [209], s'opposaient au discours cartésien⁴, mais ces derniers n'auront jamais le même retentissement. Pourtant, depuis la fin du XIX^e siècle, plusieurs travaux importants, ayant abouti⁵ aux célèbres écrits d'Edgar Morin [189], suggèrent d'opposer à la pensée cartésienne, une (des) pensée(s) complexe(s).

Mais, bien avant Descartes et jusqu'à nos jours, d'autres pensées, concrétisées pour certaines par des théories, se sont également distinguées. Ce premier chapitre de thèse s'attache ainsi à mettre en évidence l'évolution de la pensée humaine occidentale au cours du temps – section 1.2 – et à révéler son influence sur les théories systémique, constructiviste et de la complexité – section 1.3. Arrivant progressivement à la présentation des systèmes complexes, les paradigmes de modélisations couramment mis en avant dans la littérature sont alors présentés ; plus spécifiquement, les systèmes multi-agents et les automates cellulaires, deux des trois socles de cette thèse, sont exposés – section 1.4. Le chapitre se poursuit sur les nécessaires prérequis introduisant le troisième socle de ces travaux, présenté dans le chapitre 2.

1.2 Une ère de pensées *pré-complexes*

1.2.1 Des pensées présocratiques

La littérature épistémologique contemporaine a pour habitude de remonter aux philosophies hellénistes antiques pour détailler le cheminement de pensée vers l'approche complexe, p. ex., [212], [158]. Les différents développements consistent souvent en la confrontation de deux visions antiques du monde à des pensées *plus récentes*, comme les pensées cartésienne et complexe, érigées plusieurs siècles plus tard. En effet, dans l'Antiquité, des écoles de pensées, bien que majoritairement considérées comme holistes^{6, 7}, ressortent les deux pères fondateurs du *logos* : Parménide (VI^e siècle - V^e siècle av. J.-C.)⁸ et Héra-

²Le *Discours de la méthode* est librement et facilement accessible sur Internet.

³Citation de Gaston Bachelard [18] reprise par Jean-Louis Le Moigne dans [158] : « On sent bien d'ailleurs que ces règles n'ont plus, dans la culture moderne, aucune valeur dramatique. En fait, il n'y a pas un lecteur sur cent pour lequel le Discours soit un événement intellectuel personnel. Qu'on dépouille alors le Discours de son charme historique, qu'on oublie son ton si attachant d'abstraction innocente et première, et il apparaîtra au niveau du bon sens, comme une règle de vie intellectuelle dogmatique et paisible. »

⁴Dans la littérature, divers développements concernant l'opposition – autre que religieuse – entre Blaise Pascal et René Descartes, ont été publiés ; p. ex., [35].

⁵Peut-on réellement parler d'aboutissement lorsqu'on parle de pensée complexe ? C.f., [158, p. 15-16] : « [...] La logique même de La Méthode est d'être processus beaucoup plus que résultat : achevée, il faudra la reprendre ! »

⁶C.-à-d., opposées au réductionnisme.

⁷Même si l'on peut faire ressortir une tendance globale au globalisme, de nombreuses démarcations, bien sûr, existaient, p. ex., épicurisme, stoïcisme, scepticisme, etc.

⁸Parménide, d'origines pythagoriciennes, a eu pour principal disciple Zénon d'Élée, connu pour ses fameux paradoxes sur les représentations continue/discrète du temps et de l'espace, p. ex., Achille et la

clite (VI^e siècle - V^e siècle av. J.-C.).

Le premier, auteur de « l'Être est, le non-Être n'est pas »⁹, est l'un des principaux philosophes, avec son disciple Zénon, de l'école d'Élée ou *éléatique*. Parménide considérait que la conception exacte des choses ne pouvait être obtenue que par « l'abstraction de la multiplicité et de la mutabilité des choses sensibles » [297], ne prenant en compte que la raison et omettant ainsi les sens. Le mode de raisonnement éléatique et plus spécifiquement parménidien, recherchant des invariants et privilégiant les idées pures et certaines, fut alors l'un des précurseurs des philosophies platonicienne et cartésienne ; cette dernière ayant plus tard influencé le positivisme scientifique d'Auguste Comte [52]. En anticipant légèrement la sous-section 1.2.4, notons que ce sont « ces paradigmes *cartésiano-positivistes* » [159] qui auront alors, dans nos sociétés occidentales¹⁰, régné en maître pendant plus de trois siècles.

En contraste avec la précédente, une seconde pensée antique, la pensée héraclitéenne, qui considérait « Polemos [*i.e.*, *le conflit*] comme le père de toute chose » et qui concevait « la pluralité dans l'un », a mis en évidence l'importance de la contradiction et du mouvement. C'est cette lignée de pensée¹¹ qui mettra en avant l'importance et l'implication de l'observateur dans l'analyse des systèmes, p. ex., considération nécessaire de l'imperfection des sens, ainsi que, l'ampleur du désordre¹² et de la désorganisation dans l'organisation. Comme l'a rappelé Edgar Morin dans [189, tome 1, p. 146-147], en citant le philosophe antique : « C'est Héraclite qui a exprimé avec le sens le plus intense de la complexité le lien complémentaire/antagoniste entre *ce qui est complet et ce qui ne l'est pas, ce qui concorde et ce qui discord, ce qui est en harmonie et ce qui est en désaccord.* » La pensée d'Héraclite sera, par la suite, une des sources du relativisme et du scepticisme¹³, et aura

tortue [224].

⁹Traduction du poème *De la Nature* de Parménide par Paul Tannery [259].

¹⁰Il est important de mettre l'accent sur ce point : seules les pensées occidentales auront ici été considérées ; d'autres « voies », pouvant être assimilées à une pensée complexe, p. ex., le taoïsme, ont « dominé » des pensées orientales. Certains de leurs concepts, aussi présents dans la pensée complexe, p. ex., le « macrocosme » et le « microcosme », étaient déjà pris en compte dans ces sociétés, p. ex., [116] : « La conformation des êtres humains reproduit l'architecture du monde, et avec toutes deux, s'accorde la structure sociale. La société, l'homme, le monde sont l'objet d'un savoir global. Valable pour le macrocosme et pour tous les microcosmes qui s'emboîtent en lui, ce savoir se constitue par le seul usage de l'analogie. »

¹¹Héraclite a eu deux principaux élèves : Protagoras (V^e siècle av. J.-C.), dont la pensée essentielle est « l'Homme est à la mesure de toute chose », ne concevait la connaissance que par les sens. Protagoras est un des initiateurs du relativisme. Selon [110] : « Protagoras est, sans aucun doute, un cas exemplaire d'individu à la pensée complexe ». Le deuxième élève d'Héraclite est Cratyle (V^e siècle av. J.-C.), dont Platon aurait été un des élèves avant d'être influencé par Socrate.

¹²Notion formalisée bien plus tard, en 1948, par Claude Shannon avec sa théorie de l'information et son entropie [235]. La théorie de l'information sera ensuite considérée comme l'une des bases de la pensée complexe d'Edgar Morin.

¹³P. ex., Ænésidème (I^e siècle av. J.-C. - I^e siècle ap. J.-C.), considéré comme l'un des premiers grands philosophes antiques sceptiques, s'inspira de la philosophie héraclitéenne [228] : « Ænésidème soutient, d'après Héraclite, que la partie est la même chose que le tout et une chose différente. En effet, l'être est tout et partie à la fois : tout, si l'on considère le monde ; partie, si l'on considère la nature de tel ou tel animal. La partie s'entend aussi de deux façons ; tantôt comme différent de la partie proprement dite,

des incidences sur les pensées de Nietzsche ou encore de Paul Valéry [212]. Ce dernier a aussi eu des impacts sur les pensées constructivistes et la théorie générale du système¹⁴, pouvant toutes deux être intégrées au paradigme général de la complexité.

1.2.2 La pensée platonicienne

Abordant la philosophie antique, il semble difficile d'omettre Socrate et son célèbre disciple Platon (V^e et IV^e siècles av. J.-C.). Ce dernier, bien que disciple de Cratyle – lui-même disciple d'Héraclite, c.f., note de bas de page 11 – et donc sensibilisé à la pensée héraclitienne du mouvement et étant resté « fidèle à cette doctrine »¹⁵, fut ensuite plus affecté par la pensée de Socrate.

Partant des doctrines antérieures¹⁶, Platon développa sa *théorie des Idées*. Dans celle-ci, les Idées, immuables et sûres, sont indépendantes du monde réel et visible. Ainsi, s'inspirant aussi de la pensée d'Héraclite, pour qui rien n'est permanent, Platon dut opposer deux mondes pour expliquer la connaissance : l'un, *le monde des Idées*, permettant d'expliquer l'acte de la connaissance dans l'autre, *le monde sensible*. Selon cette dialectique, l'Homme, s'il parvient à s'extraire du *monde sensible* et à s'affranchir de ses sens – on retrouve ici des thèses parménidiennes –, accède à la connaissance et aux lois générales du système – voir à ce sujet, p. ex., l'Allégorie de la Caverne [215]. Cette opposition *matière/idées* se retrouvera par la suite chez Descartes – c.f., le premier précepte du *Discours de la méthode* où apparaît le principe du *doute cartésien*, sous-section 1.2.4 – puis dans des théories « post-cartésiennes », comme le positivisme¹⁷ au XIX^e siècle ou le scientisme au XX^e siècle.

comme quand on dit que la partie est elle-même partie de la partie, par exemple le doigt, de la main; l'oreille, de la tête; tantôt comme étant proprement la partie du tout. C'est en ce sens que l'on regarde la partie comme composant le tout. »

¹⁴C.f., [158, p. 10] : « Vinci, Vico, Valéry : les trois V du Constructivisme ».

¹⁵C.f., la *Métaphysique* d'Aristote, Livre I. P. ex., une traduction des écrits d'Aristote a été faite par [214, p. 31].

¹⁶C.f., [136, p. 35-36] : « De part et d'autre l'être réel avait été exclu de la nature, de la pensée et du discours. Socrate ramena les hommes à l'étude d'eux-mêmes, il leur apprit à douter, et en leur mettant entre les mains l'instrument nouveau de la définition, il prépara une science plus sûre. Cette science, Platon essaya de la créer. Il connaissait à fond les doctrines de son temps. Philolaüs l'avait mis en commerce avec Pythagore, Cratyle, avec Héraclite, Euclide de Mégare lui avait transmis la pensée, raffinée sans doute, mais fidèle encore du grand Parménide. Toutes ces inspirations s'unirent dans le système de Platon. De ces affluents divers se forma le flot de sa doctrine; mais la source principale fut la méthode de Socrate. »

¹⁷Le positiviste s'attachera à *retrouver* « les lois effectives » de la *Nature*. C.f., [52, p. 63] : « Dans l'état positif, l'esprit humain, reconnaissant l'impossibilité d'obtenir des notions absolues, renonce à chercher l'origine et la destination de l'univers, et à connaître les causes intimes des phénomènes, pour s'attacher uniquement à découvrir, par l'usage bien combiné du raisonnement et de l'observation, leurs lois effectives, c'est-à-dire leurs relations invariables de succession et de similitude. L'explication des faits, réduite alors à ses termes réels, n'est plus désormais que la liaison établie entre les divers phénomènes particuliers et quelques faits généraux dont les progrès de la science tendent de plus en plus à diminuer le nombre. »

1.2.3 La pensée aristotélicienne

Bien qu’Aristote (IV^e siècle av. J.-C.) fut influencé par Platon – en particulier en intégrant son *Académie* – il s’opposa cependant à certaines de ses idées. Il refuta, en particulier, la *théorie des Idées* ; selon lui, « la séparation de l’idée est un travail contre la nature ». Alain, [2], ira même jusqu’à dire que, selon Aristote, « on se fatigue d’être Platonicien ». Ainsi, pour Aristote, seuls les individus existent et non les idées. Il se rapproche, en ce sens, d’une pensée héraclitéenne – c.f., sous-section 1.2.1 – qui tend à « nous réconcilier à notre nature ». De plus, même s’il n’est pas correct de qualifier Aristote de penseur complexe, il pourrait être considéré comme un des initiateurs de la pensée systémique avec son illustre formule, « le tout est supérieur à la somme des parties »¹⁸ ; formule rejetée plus tard dans le réductionnisme cartésien.

Pourtant, malgré l’apparente vision systémique de la philosophie aristotélicienne¹⁹ et quelques pensées anticipatrices reprises dans la théorie générale du système ou la théorie constructiviste – p. ex., le *doute*²⁰ à propos duquel Aristote disait qu’il « est le commencement de la sagesse » [11] –, Aristote aura souvent été rapproché de Descartes. Ce dernier sera même considéré comme son principal héritier [95]. En particulier, ayant consacré une grande partie de sa vie à vouloir expliquer la *Nature*, Aristote a formulé trois axiomes – fondements de notre *logique formelle* actuelle –, formant la *logique disjonctive*. Comme l’a rapellé Jean-Louis Le Moigne, lors de [157], « il semble nécessaire de [la] rappeler tant cette logique nous semble toujours intuitivement acceptable et évidente pour nos esprits occidentaux exclusivement formés, de manière cachée, aux pratiques de l’analyse », c.f. *tab.* 1.1.

Nom	Interprétation	Symbolique associée
Axiome d’identité	<i>Ce qui est, est.</i>	$p \vdash p$
Axiome de non-contradiction	<i>Rien ne peut à la fois être et ne pas être.</i>	$\neg(p \wedge \neg p)$
Axiome du tiers exclu	<i>Chaque chose doit être ou ne pas être.</i>	$p \vee \neg p$

TAB. 1.1 – *Les trois axiomes de la logique disjonctive d’Aristote.*

¹⁸Cette formule reflète une *philosophie* générale d’Aristote et se ressent dans plusieurs écrits du philosophe, p. ex., [10, 12, 13]. P. ex., Denuit [78, *chap. VIII*], écrit : « Ainsi Aristote écrit-il au livre II de la *Politique* : “il est clair que rechercher une trop grande unité pour la cité n’est pas le meilleur : une famille se suffit mieux à elle-même qu’un individu, et une cité mieux qu’une famille, mais sa volonté d’être une cité apparaît vraiment dès que la masse associée arrive à se suffire à elle-même ; si donc une plus grande autarcie est préférable, une unité moindre est préférable à une plus grande.” La préférence pour l’autarcie exprime le souhait d’une cité une et identique à soi, de telle sorte que le Tout soit supérieur à la somme des parties. »

¹⁹La vision systémique aristotélicienne peut être étayée par une étude de la *Métaphysique* [13], avec, par exemple, les notions telles que *Être/Forme/Matière* – pouvant être rapprochées des notions de *système, sous-système* etc. –, des notions telles que *Acte/Puissance* – pouvant être reliées à des notions de *transition, état* d’un système etc. –, ou encore des notions de *causes (matérielle, formelle, efficiente et finale* ; la *cause finale* étant sans doute la plus importante dans la pensée d’Aristote) – pouvant être associées aux concepts d’émergence etc..

²⁰Le doute aristotélicien évoqué ici est « opposé » au doute cartésien évoqué dans la sous-section 1.2.2.

Cette logique aristotélicienne, accompagnée de la syllogistique formelle²¹ axiomatisée par le philosophe ainsi que les « principes de réduction et d'abstraction » cartésiens constitueront ce qu'Edgar Morin appelle « le paradigme de simplification » [192, p.18-20]. Cependant, même si dans la littérature, la logique d'Aristote a subi de nombreuses attaques pour le moins virulentes, comme le précise [55], « elle n'est pour autant pas fautive, elle est seulement extrêmement limitée et pauvre en regard des développements de la logique contemporaine. »

1.2.4 La pensée cartésienne

1.2.4.1 D'Aristote à Descartes

La transition, peut-être soudaine, de la pensée aristotélicienne à la pensée cartésienne peut apparaître ici comme un raccourci simpliste. Environ vingt siècles séparent en effet les deux philosophes et il semble évident que la pensée ne s'est pas arrêtée à l'Antiquité pour reprendre à la Renaissance²². Pourtant, si le Moyen-Âge (500-1500 ap. J.-C.) fut majoritairement dominé par les pensées religieuses monothéistes, il est clair que, comme le signale L. M. De Rijk [61], « au Moyen-Âge, tout comme dans d'autres périodes, la notion de "philosophie" n'est pas isolée ». En Occident, les philosophes de cette époque tentèrent de faire cohabiter les pensées antiques avec la doctrine chrétienne pour « réconcilier la foi et la raison » ; c'est ce qu'on appellera la *scolastique*. Ainsi, Platon et Aristote eurent parfois des positions dominantes mais la pensée chrétienne enrichit aussi considérablement la philosophie antique²³. Émergeant de cette époque, « comme la performance la plus impressionnante de la pensée philosophique et théologique du XIII^e siècle » [61, p. 78], le théologien Saint Thomas d'Aquin (XIII^e siècle) est une figure marquante de la scolastique médiévale. Ce dernier s'inspira principalement de la pensée aristotélicienne, accompagnée d'une vision qu'on pourrait qualifier d'holiste²⁴.

S'opposant à la pensée aristotélicienne, « assistant à la décadence [...] et aux exagérations » [82] de la scolastique et s'inspirant des pensées de Michel de Montaigne²⁵

²¹Un syllogisme est un raisonnement logique constitué de deux *prémisses* (la *majeure* et la *mineure*), de trois termes (*majeur*, *mineur* et *moyen terme*) et d'une conclusion. Voir les travaux de [55] pour une introduction à la logique par la logique aristotélicienne.

²²D'autres auteurs ont pourtant déjà volontairement fait abstraction de cette époque [221] : « Qu'on le veuille ou non, le Moyen-Âge philosophique reste une parenthèse. C'est vraiment l'entre-deux, l'âge du milieu, comme l'implique une dénomination qui n'est pas aussi injuste qu'on a bien voulu le croire. »

²³C.f., [61, p. 71], pour l'influence de la théologie sur la scolastique : « L'incarnation et la résurrection, tout comme la conscience du péché et la morale intériorisée de la Bible où, à côté de l'action, la disposition et l'intention sont décisives, ont modifié l'anthropologie, au moins implicitement [...] . » ; ou encore c.f., [1, p. 74], pour les influences de Platon et d'Aristote : « Aussi dans la scolastique, en apparence, tout est péripatéticien, et la méthode et le langage ; car on n'avait pas d'autres ouvrages philosophiques que ceux d'Aristote. »

²⁴C.f., [61, chap. 6, p. 142] : « La grandeur particulière de la supériorité technique [de Thomas d'Aquin] réside dans la combinaison d'une force réflexive intrépide, qui n'est entravée par aucun préjugé personnel, et dans la capacité de reconnaître l'harmonie et l'ordre dans l'Univers [...] . »

²⁵C.f., [38, p. 21] : « [...] Montaigne a libéré Descartes. [...] Descartes reproduit les phrases les plus typiques des *Essais* dans le *Discours* sans avoir besoin d'indiquer l'origine de ses emprunts, comme on

(1533-1592), René Descartes (1596-1650) voulut réconcilier les sciences et la religion, en dissociant, bien sûr, cette dernière de la scolastique. Il entreprit, pour cela, un processus de remise en cause de ses acquis et critiqua la logique scolastique, la jugeant « stérile, ne servant à exposer ce que l'on sait déjà » et proposa d'y opposer une logique « féconde », capable de découvertes [83]. Le philosophe rejettera donc les thèses des péripatéticiens²⁶ et des sceptiques – notamment Montaigne – pour faire entrer en scène une philosophie basée sur les mathématiques. C'est ainsi qu'il proposera son *Discours de la méthode, pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences* [81]²⁷.

1.2.4.2 Le Discours de la méthode

Comme l'ont fait plusieurs auteurs contemporains traitant de la pensée complexe, p. ex., [158], il est intéressant de faire apparaître dans ce manuscrit les quatre préceptes de la méthode cartésienne ; ils serviront ensuite de support à l'introduction de la pensée complexe, c.f., *tab.* 1.2. Ces quatre préceptes, *d'évidence* (1), *réductionniste* (2), *causaliste* (3) et *d'exhaustivité* (4), qui font encore notre quotidien, étaient considérés par l'auteur du *Discours* comme de « longues chaînes de raisons, toutes simples et faciles » à mettre en œuvre pour résoudre les problèmes les plus difficiles²⁸. Pourtant, diverses critiques peuvent leur être adressées.

A propos du précepte d'évidence, Jean-Louis Le Moigne [158] en dira que la confiance de nos sociétés envers lui est fondée sur « la peur collective de l'absurde et de l'incertitude », le qualifiant de « concept douteux »... L'évidence existe quand le besoin s'en fait sentir tandis qu'il semble évident que de nombreuses évidences peuvent être remises en doute. Par ce précepte premier, Descartes souhaitait sortir du scepticisme ambiant²⁹, pour que le doute ne soit plus un obstacle et devienne une source de progrès. En fait, pour les cartésiens, ce précepte palie le problème des doutes en général : celui de l'erreur des sens – p. ex., la métaphore des mirages –, celui de la folie potentielle – c.-à-d., ne suis-je pas fou au point de ne pas m'en rendre compte ? Si j'étais fou, pourrais-je le savoir ? – et celui du rêve³⁰.

citait la Bible ou l'Évangile [...] . »

²⁶C.-à-d., ensemble des courants de pensée *descendants* de l'aristotélisme.

²⁷Le *Discours de la méthode* fut édité et commenté de nombreuses fois après 1637. P. ex., voici des premières lignes d'introduction rédigées par Paul Landormy en 1899 [84], intéressantes par rapport à la position du *Discours* dans le temps : « Le Discours de la méthode *pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences* fut achevé d'imprimer le 8 juin 1637, à Leyde, chez Jean Maire... A vrai dire, les premiers lecteurs ne s'arrêtèrent pas beaucoup à ce Discours préliminaire et s'occupèrent surtout des trois essais dont il était suivi : la *Dioptrique*, les *Météores* et la *Géométrie*... Depuis, l'intérêt s'est déplacé. Aujourd'hui, les trois *Essais* n'ont qu'une valeur historique ; la science a depuis longtemps dépassé les conceptions de Descartes ; le *Discours de la méthode* apparaît au contraire, de plus en plus, à mesure que la pensée moderne prend conscience d'elle-même, comme la définition encore enveloppée, mais très exacte dans son contenu implicite, du rôle véritable et des moyens réels de la philosophie. »

²⁸*N.B.*, il ne s'agit pas encore de problèmes complexes...

²⁹Le *scepticisme* pourra aller jusqu'à remettre en cause l'existence toute entière.

³⁰Pour corroborer les propos de Paul Landormy [84] de la note de bas de page n°27, il semble, malheureusement, que les cartésiens se soient arrêtés au *doute méthodique* du *Discours de la méthode*. Différents doutes existent dans la philosophie de Descartes : le *doute empirique*, c.-à-d., sceptique – c.-à-d., personne

1. *Le premier était de ne recevoir jamais aucune chose pour vraie que je ne la connusse évidemment être telle, c'est-à-dire d'éviter soigneusement la précipitation et la prévention, et de ne comprendre rien de plus en mes jugements que ce qui se présenterait si clairement et si distinctement à mon esprit, que je n'eusse aucune occasion de le mettre en doute ;*
2. *Le second, de diviser chacune des difficultés que j'examinerais en autant de parcelles qu'il se pourrait et qu'il serait requis pour les mieux résoudre ;*
3. *Le troisième, de conduire par ordre mes pensées, en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu comme par degrés jusque à la connaissance des plus composés, et supposant même de l'ordre entre ceux qui ne se précèdent point naturellement les uns des autres ;*
4. *Et le dernier, de faire partout des dénombrements si entiers et des revues si générales, que je fusse assuré de ne rien omettre.*

TAB. 1.2 – *Les quatre préceptes du Discours de la méthode de René Descartes.*

La deuxième règle, réductionniste, peut être considérée comme l'emblème de la méthode cartésienne. C'est en effet, sans aucun doute, la règle qui aura fait le plus parler d'elle dans la littérature, p. ex. :

- Blaise Pascal (1623-1662), tenant « pour impossible de connaître les parties sans connaître le tout non plus que de connaître le tout sans connaître particulièrement les parties » [209] ;
- Leibniz³¹ (1646-1716), considérant que « la règle de Descartes est, de peu d'utilité tant que l'art de diviser... reste inexpliqué. En divisant le problème en parties inappropriées, on peut en accroître la difficulté » [38, p. 346] ;
- Paul Valéry (1871-1945), stigmatisant ce vice de « prendre la partie pour le tout » [266] ;
- Henri Atlan (né en 1931), disant que « le simple fait d'analyser un organisme à partir de ses constituants entraîne une perte d'information sur cet organisme » [15] ;
- voir encore, P. A. Weiss, R. L. Ackoff, E. Morin etc.

ne sait rien – et le *doute hyperbolique*, c.-à-d., généralisé – le *métadoute* de la métaphysique. Ainsi, tout n'était pas qu'évidence chez René Descartes. P. ex., [37, p. 114] : « “Par exemple (écrit Descartes dans la Troisième Méditation) je trouve dans mon esprit deux idées du soleil toutes diverses : l'une tire son origine des sens... par laquelle il me paraît extrêmement petit ; l'autre est prise des raisons de l'astronomie, c'est-à-dire de certaines notions nées avec moi, ou enfin est formée par moi-même de quelque sorte que ce puisse être, par laquelle il me paraît plusieurs fois plus grand que toute la terre.” Pour que la seconde idée soit retenue comme vraie, il faut bien que la première ait été mise en doute, et ce doute implique la réalité d'un *moi* qui prend conscience de soi dans l'affirmation de son existence : *Cogito ergo sum.* »

³¹Et pourtant, une des caractéristiques souvent prêtée à Leibniz est *ultra-cartésianisme* [38].

Comme le précise d'ailleurs ce dernier, dans *sa méthode* [189, tome I, p. 124] : « il ne s'agit pas de sous-estimer les éclatants succès remportés par la visée "réductionniste" : la recherche de l'élément premier a fait découvrir la molécule, puis l'atome, puis la particule ; la recherche d'unités manipulables et d'effets vérifiables a permis de manipuler, en fait, tous systèmes, par manipulation de ses éléments » ; mais, cette règle aura eu des effets secondaires non-négligeables, tous interdépendants, allant de l'abstraction des interactions³² à la fermeture, « naturellement sécurisante pour l'esprit » [158], des systèmes.

Le troisième précepte, causaliste, implique le précédent qui l'implique lui-même à son tour : le réductionnisme n'existe pas sans le causalisme, et réciproquement. Car, après la division d'un problème en de multiples éléments, la méthode de René Descartes consiste en leur organisation minutieuse en *supposant* même de l'ordre lorsqu'il n'y en a pas. Cette méthodologie causaliste, linéaire, a progressivement instauré, dans l'inconscient collectif occidental, la recherche permanente de la cause d'un effet observé³³ ; méthodologie parfaitement bien illustrée par l'expression d'Honoré de Balzac, parue en 1829 dans sa *physiologie du mariage* – lorsqu'il propose des solutions au *problème* de l'infidélité – : « sublatâ causâ, tollitur effectus », signifiant « pas d'effet sans cause » [60]. Pascal revenant sur ce précepte cartésien, précisera, en totale opposition, que les choses sont pourtant à la fois « causées et causantes » [209]. Progressivement, la relation cause-effet se transformera en une relation fins/moyens au travers de laquelle il s'agira de s'interroger sur la finalité de l'objet à connaître³⁴.

Enfin, selon Jean-Louis Le Moigne, « l'exhaustivité [*du dernier précepte*] est aisée à récuser ». Bien que pendant un temps, avec le développement de l'électronique et la puissance croissante de l'informatique, il eut été possible de croire en une exhaustivité parfaite, le réductionnisme infini atteint bien ses limites et il est acquis, même chez les cartésiens, que le dénombrement complet est impossible³⁵. Ainsi, plutôt que de vouloir recenser l'ensemble des parties d'un tout, il semble parfois intéressant de se tourner directement vers l'étude du tout en considérant délibérément les imperfections des informations noyées dans « l'ombre de ces agrégats »³⁶.

³²De très nombreux exemples peuvent être répertoriés ; un seul est ici retenu, régulièrement repris dans les médias : la problématique de la présence de produits chimiques dans l'alimentation. Qu'elles soient synergiques, antagonistes, inhibitrices ou potentialisatrices, les interactions entre ces produits sont très généralement négligées – volontairement ? – lors des contrôles pour leur introduction sur les marchés ; p. ex., les impacts des interactions des colorants alimentaires sur le comportement hyperactif des enfants [284].

³³Les exemples là aussi sont abondants. Ex. récent *réduisant* la respiration d'un nouveau-né à la présence d'un unique gène, susceptible d'être responsable du syndrome de mort subite du nourrisson lorsqu'il est absent [41].

³⁴Jean-Louis Le Moigne, lors de la conférence [160] dira à propos de ce passage du cause-effet au fins/moyens que pour répondre à la question « Pourquoi ? », il faut dépasser le « parce que » – qu'impose le causalisme et le cartésianisme en général – et aller vers le « afin de ».

³⁵P. ex., plus personne n'est d'ailleurs surpris de l'utilisation, parfois abusive, des sondages, qui sont pourtant un exemple parfait de négligence du précepte d'exhaustivité..

³⁶Expression de J.-L. Le Moigne, basée sur des termes de Lofty Zadeh dans [295], termes peut-être issus de Ludwig von Bertalanffy – « The organism is considered to be an aggregate of cells » – [278].

1.2.4.3 L'émancipation cartésienne

Pour conclure, bien que la pensée cartésienne ait été notablement remise en question³⁷, et cela plus concrètement depuis près d'un siècle, des interprétations trop « scientifiques » des écrits de Descartes – c.-à-d., positiviste par les écrits d'Auguste Comte par exemple [52] ou scientifique par la suite – ont été faites. Car, des nuances non *pro-cartésiennes* existent ; Robert Vallée [268] précise en effet qu'« on a souvent vu en Descartes, un esprit anti-systémique en lui attribuant l'idée que l'étude d'un objet naturel doit se faire par décomposition en parties. C'est oublier que Descartes parlait seulement de décomposer les difficultés logiques »³⁸. Certains encore, comme Agnès Lagache³⁹ [152] relayée par Agnès de Souza [63], prétextent qu'on a fait de Descartes le cartésien qu'il n'était pas, en réécrivant l'histoire et en reconstruisant sa philosophie. L'opposition esprit/matière de Descartes – respectivement substance pensante/substance étendue – aurait été mal interprétée. Cette interprétation aurait basculé, dans le temps, vers un paradigme mécaniste exacerbé, oubliant que René Descartes posait ce dualisme, non pas pour réduire l'une des substances à l'autre, mais pour éclairer la jonction entre les deux et mettre en avant leurs interactions, faisant alors émerger une troisième substance. Les interprétations successives de la philosophie de Descartes, arrivée déformée, auraient alors éclipsé progressivement la substance pensante face à la substance étendue pour aboutir à « notre science matérialiste moderne » [63, p. 60].

Quoi qu'il en soit, qu'elle ait subi des interprétations *dégradantes* ou non, la philosophie cartésienne s'est *propagée* au travers des siècles dans nos sociétés occidentales. Ainsi, la célèbre *Logique de Port-Royal*, des jansénistes Antoine Arnauld (1612-1694) et Pierre Nicole (1625-1695) [14], ayant subi des influences cartésiennes certaines^{40, 41}, eut par la suite des incidences sur la pensée du comte de Saint-Simon.

Saint-Simon (1760-1825), noble dont la fortune fluctua au cours des ans, fut l'auteur, en 1808, de l'*introduction aux travaux scientifiques du dix-neuvième siècle* [226], une de ses œuvres importantes. Ce texte fut majoritairement diffusé à des scientifiques, et son auteur y plaidait pour un retour aux fondamentaux cartésiens : « il faut entrer dans

³⁷Cette remise en question a parfois pris des formes particulièrement agressives chez des auteurs, comme Jean-Louis Le Moigne, p. ex., [159, 158].

³⁸Robert Vallée poursuit à ce sujet en précisant que d'autres avant lui, comme « Warren S. McCulloch voyaient en Descartes un “saint patron” de la cybernétique pour sa description, dans *l'Homme* (1664), d'une sorte d'arc réflexe impliquant la transmission des signaux de sensation et d'action qui permettent le retrait du pied imprudemment approché du feu [...] ».

³⁹Agnès Lagache, lors d'un séminaire de recherche en décembre 2000 [153] disait, commentant l'œuvre de Antonio Damasio, *L'erreur de Descartes : la raison des émotions* [56], que A. Damasio aurait pu étayer son propos sans pour autant « démolir au passage ce pauvre Descartes ».

⁴⁰Sans entrer plus en profondeur dans le détail, Antoine Arnauld entretenait une correspondance suivie avec René Descartes [80]. C.f., [202, p. 359] : « Arnauld se dit fidèle à Descartes et cite des textes extraits ou directement inspirés de l'œuvre de Descartes. » ; mais encore, p. ex., [124, p. 26] : « la *Logique de Port-Royal* devint le manuel de base de la logique formelle classique. »

⁴¹Lors de [157], Jean Louis Le Moigne précisa également que « la publication de ce cours [c.-à-d., la *Logique de Port-Royal*], à l'origine destiné à bien former le Dauphin de France, permettra de développer les quatre préceptes de Descartes dans nos cultures ».

cette voie, et reprendre la direction de Descartes qui, le premier, a arraché le spectre du monde des mains de l'imagination pour le placer dans celles de la raison, et qui le premier osa entreprendre l'explication du mécanisme de l'univers, en ayant soin toutefois de ne pas se perdre, comme les disciples du grand homme, dans le labyrinthe de la métaphysique » [132, p. 44-45]. Outre les caractères industriel et socialiste⁴² qui n'intéressent guère dans le cadre de cette thèse, Saint-Simon eut à partir des années 1820 un élève de renom, Auguste Comte (1798-1857), initiateur, par la suite, du *positivisme*.

Auguste Comte (1798-1857) était d'un naturel cartésien, « ordonné jusqu'à l'excès, pensant volontiers par tableaux, divisions méthodiques, énumérations complètes », [52, p. 10]. Il n'aura de cesse, durant sa vie de penseur, de construire une *philosophie des sciences* et de rechercher une politique rationnelle, ayant la volonté permanente de restructurer la société. Il proposa, dans son *cours de philosophie* [52], une classification positiviste des sciences. Cette classification, toujours de rigueur de nos jours, contribua à la dichotomie philosophie/science, avec de graves dérives conséquentes, privant « la science de toute possibilité de se connaître, de se réfléchir, et même de se concevoir scientifiquement elle-même. » [192, p. 18]. Ce réductionnisme – un aperçu schématique de la classification invoquée par A. Comte est visible sur la figure 1.1 – entraînera plus tard le développement de spécialistes isolés, « ignares »⁴³, incapables de concevoir la complexité du réel, réduisant nécessairement le complexe au simple.

Le positivisme comtien du début du *XIX^e* siècle s'est ensuite progressivement répandu et transformé – aussi intensément dans la culture anglo-saxonne, c.f., note de bas de page n°46 – en *néo-positivisme* et *scientisme* aux *XX^e* et *XXI^e* siècles. Ce scientisme impérialiste, qui vise une lente structuration *scientifico-centrée* de la société, considère la science comme « la méthode universelle et miraculeuse [...], explicatrice de la totalité des phénomènes » [79]. L'exemple de *l'astrologue et du scientifique*, issu de [79, p. 8], illustre parfaitement ce mode de pensée :

« Ainsi, qu'un astrologue affirme que la vie extraterrestre existe, et nous éclatons de rire. Mais, qu'un scientifique affirme : "De récentes études scientifiques démontrent qu'il y a déjà eu de la vie sur Mars" et nous nous émerveillons de cette découverte fantastique ».

A partir de la seconde moitié du *XIX^e* siècle, ce mode de raisonnement scientiste exagéré⁴⁴, fut soutenu par de nombreux philosophes et intellectuels, p. ex., John Stuart Mill,

⁴²Rappelons que le comte de Saint-Simon a ouvert la voie au socialisme et influença considérablement Karl Marx (1818-1883). On retrouve d'ailleurs dans des écrits saint-simonistes des prémisses du *Manifeste du parti communiste* : « L'homme a jusqu'ici exploité l'homme » [227, *sixième séance*, p. 38].

⁴³Terme fort, emprunté à Edgar Morin, [192, p. 20] : « Les problèmes humains sont livrés, non seulement à cet obscurantisme scientifique qui produit des spécialistes ignares, mais aussi à des doctrines obtuses qui prétendent monopoliser la scientificité [...] à des idées clés d'autant plus pauvres qu'elles prétendent ouvrir toutes les portes [...], comme si la vérité était enfermée dans un coffre-fort dont il suffirait de posséder la clé, et l'essayisme invérifié se partage le terrain avec le scientisme borné. »

⁴⁴Et qui ne s'est d'ailleurs jamais *caché* derrière l'expression « scientifiquement prouvé » ?...

Jules Ferry⁴⁵, Hyppolyte Taine ou Ernest Renan. Plus tard, véhiculé par les idées du *Cercle de Vienne*⁴⁶ et son *Manifeste sur la conception scientifique du monde*, publié en 1929, le scientisme atteignit lentement nos sociétés, jusqu'à en affecter l'ensemble des rouages, p. ex., de l'économie à l'enseignement⁴⁷, en passant par la politique⁴⁸ et la médecine⁴⁹, etc. Enfin, plus récemment, l'ascension sociale « d'ingénieurs modernes, se réclamant de la science » [161], grâce auxquels de nombreuses réalisations technologiques ont pu être réalisées – réalisations dont dépendent maintenant considérablement ces mêmes sociétés –, a terminé d'accroître le développement de ce scientisme moderne.

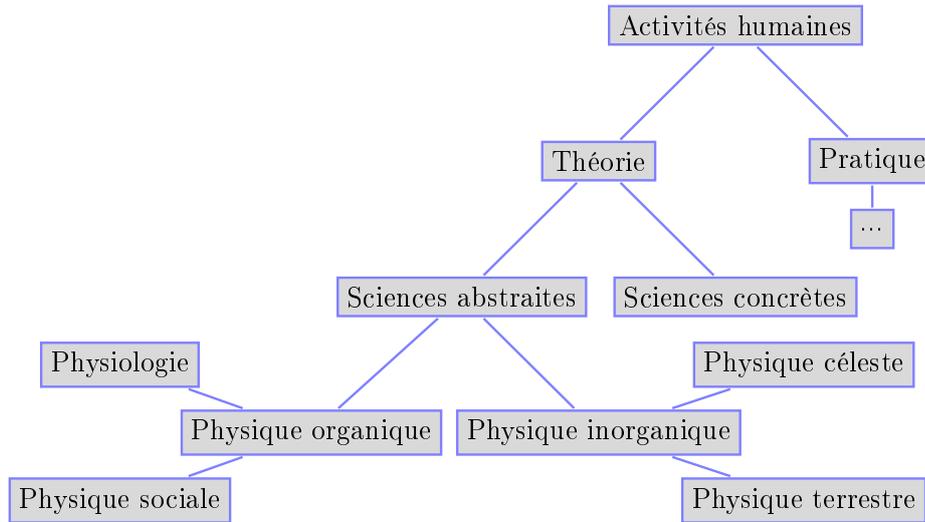


FIG. 1.1 – Schématisation de la classification positiviste d'Auguste Comte. Les mathématiques n'apparaissent pas dans cette classification, celles-ci étant essentiellement un outil des autres sciences. Figure issue de [52].

⁴⁵C.f., « Jules Ferry, le positiviste, qui confiait un jour à Jaurès : “mon but est d'organiser l'humanité sans Dieu” [...] » ; [201, p. 67].

⁴⁶Le Cercle de Vienne, mouvement fondé après la première guerre mondiale par le philosophe allemand Moritz Schlick (1882-1936), fut disloqué en 1936 à la mort – l'assassinat – de son fondateur. Ce club était vu comme un mouvement néo-positiviste, dit de positivisme logique; dont le but était de réduire philosophie, sciences humaines et sociales et autres sciences à la physique et aux mathématiques. Ce « physicalisme radical », au moment du rattachement de l'Autriche à l'Allemagne en 1938 et donc de l'immigration de plusieurs membres du Cercle aux USA, influença considérablement les épistémologues et logiciens américains [277].

⁴⁷Plusieurs travaux récents concernent d'ailleurs la prise en compte de la complexité dans les formations, [157], et de la nécessaire introspection à effectuer pour améliorer l'enseignement du futur, p. ex., [191], [193].

⁴⁸Pour approfondir ce thème, de nombreux travaux, p. ex., [211], traitent des liens étroits entre collectivisme et positivisme. La thèse de F. von Hayek, publié en 1944 dans *la route de la servitude* [281] revient considérablement sur ces liens.

⁴⁹D'autres exemples pourraient être cités; en médecine, un article intéressant de Jean-François Malherbe [168] concernant « la perversion scientiste de la médecine » et de ses impacts sur la perception, l'analyse et le traitement de la douleur et de la souffrance a été publié dernièrement : « Lorsqu'il cède au scientisme, le médecin se mue en ingénieur biomédical et renonce à être un thérapeute. »

1.2.5 Synthèse

Pour conclure, une représentation de l'évolution temporelle des pensées *pré-complexes* – c.-à-d., littéralement, antérieures à la pensée complexe – occidentales dominantes a été établie au cours de cette première section. Le lecteur ne doit pas s'enfermer dans une interprétation trop *cartésienne* d'une telle lecture. En effet, il est difficile d'être *exhaustif* lorsqu'il s'agit de lister les courants de pensée – même dominants – s'étant propagés au cours des ans. De plus, les aspects *causaliste* et *réductionniste* exagérés de la chronologie présentée devraient être considérés comme nécessaires à une telle introduction, volontairement simplificatrice⁵⁰.

Il est cependant intéressant de noter que nombre de philosophes et intellectuels contemporains s'accordent à penser qu'il existe un *fil conducteur* liant Aristote au scientisme ; c.f., la synthèse proposée par la figure 1.2. Bien sûr, les pensées originelles ont sans doute été dénaturées et seules des interprétations particulières ont persisté jusqu'à aujourd'hui. Il n'en reste pas moins que nos sociétés ont toujours comporté un axe de pensées prédominant. En parallèle de ce *fil conducteur*, diverses pensées et théories ont émergé, plus ou moins sporadiquement, proposant des visions différentes des pensées *aristo-cartésiano-positivo-scientistes*. Ainsi, de Léonard de Vinci, en passant par :

- Blaise Pascal, dont l'opposition cartésienne a déjà été présentée,
 - Giambattista Vico (1668-1744), auteur de *la méthode des études de notre temps*⁵¹,
 - Paul Valéry (1871-1945), et son *introduction à la méthode de Léonard de Vinci* [267],
 - Karl Ludwig von Bertalanffy (1901-1972), fondateur de la *théorie générale du système* [278],
 - Claude Shannon (1916-2001), père de la *théorie de l'information* [235],
 - Heinz von Foerster (1911-2002), constructiviste et bâtisseur de la *cybernétique* [280],
- et bien d'autres encore ; un paradigme général de la complexité, détaillé dans la section suivante, s'est progressivement dressé et concrétisé par les écrits d'Edgar Morin.

⁵⁰P. ex., ni les interactions des penseurs comme Léonard de Vinci, Blaise Pascal, etc. – c.f., figure 1.2 – sur les pensées de l'axe *Descartes-Scientisme* – en violet sur la figure –, ni réciproquement, les influences, nécessairement conséquentes, de cet axe de pensées sur ces autres pensées, dites alternatives, ne sont abordées...

⁵¹Une traduction des écrits de G. Vico a été proposée par Alain Pons en 1981 : « Descartes, inutile et incertain ». Pascal l'avait déjà dit. Dangereux ajoute Vico. Au nom de sa "critique" et de sa "méthode géométrique", il discrédite en effet toutes les autres formes de savoir. L'histoire, l'éloquence, la poésie, sont rejetées, dès le début du *discours de la méthode*, parce qu'elles mettent en jeu la mémoire et l'imagination, maîtresses d'erreur. » , [275, p. 15].

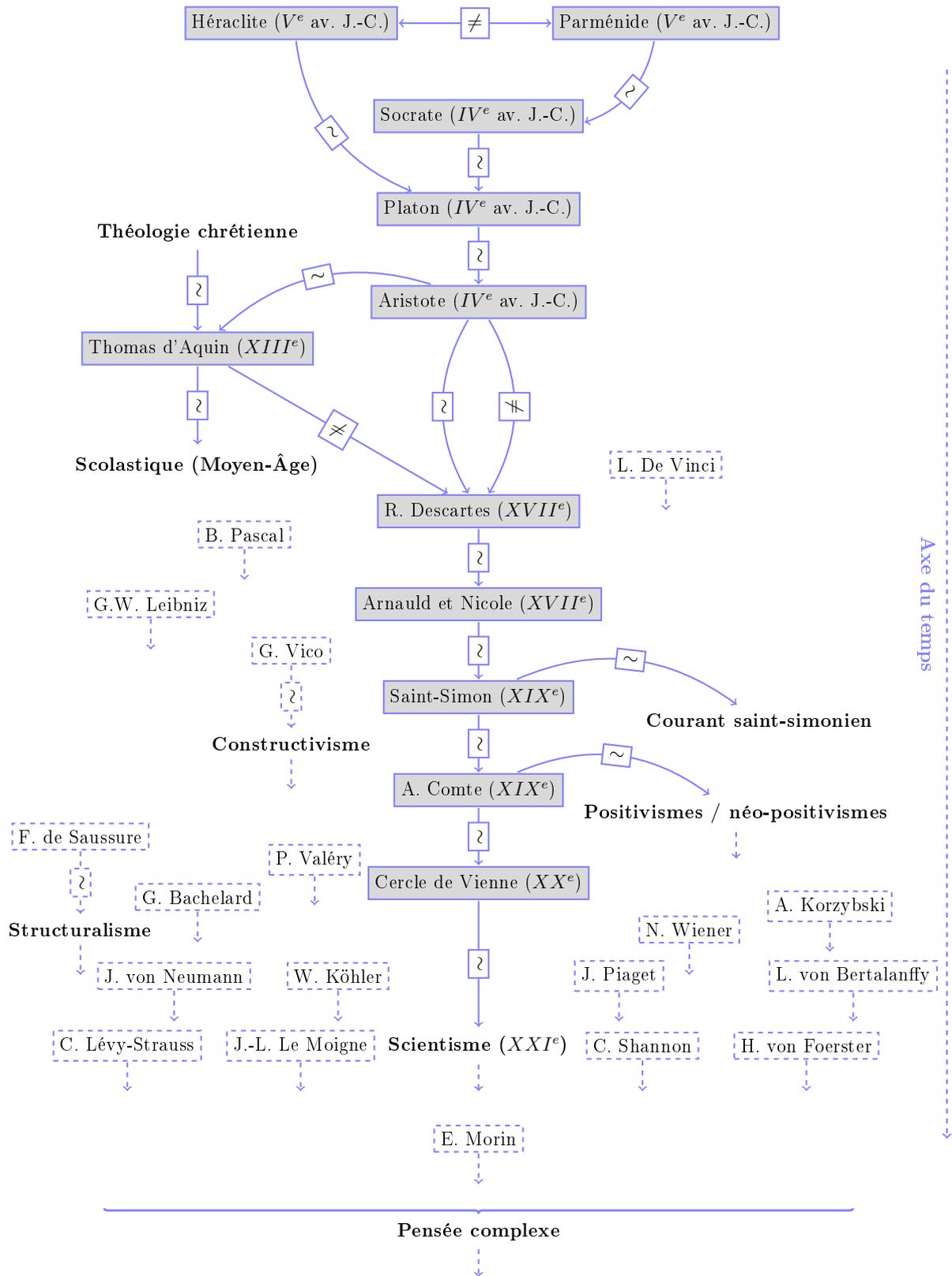


FIG. 1.2 – Evolution temporelle et influences – positives : ~; négatives : ≠ – des pensées pré-complexes en Occident, de l'Antiquité à nos jours, jusqu'à la pensée complexe. Au centre et en bleu : pensées dominantes. En périphérie, en pointillés : pensées alternatives émergentes.

1.3 Vers un paradigme général de la complexité...

1.3.1 Une nécessaire remise en question

Face à une pensée cartésienne, de plus en plus remise en question, des théories alternatives se sont lentement érigées. En 1714 déjà, Leibniz, dans son œuvre de *Monadologie*, introduisait le concept de *monade*, dont une définition, issue de [33, p. 48]⁵², est intéressante à rappeler :

« Chaque être simple, dit Leibniz, chaque monade a une force : cette force est le principe de ses changements, ou de ses états passagers.

D'un autre côté, le monde est tout d'une pièce, et en vertu de l'union qui est entre toutes ses parties tant simples que composées, il n'y a point d'être, qui, selon son point de vue, n'exprime, ne représente le rapport qu'il y a avec le reste de l'univers et ne soit un miroir vivant de l'univers entier.

Quand une monade passe par différents états, elle ne fait donc que se représenter différemment l'univers : ses états passagers ne sont que différentes représentations qui se succèdent en elle. Or, ces représentations, Leibniz les appelle des perceptions ; et en conséquence il admet des perceptions dans chaque monade. Les monades qui n'ont pas conscience, ou qui ne prennent pas connaissance de leurs perceptions, sont ce qu'il nomme entéléchies ; celles qui en ont conscience, sont ce qu'il appelle âmes. »

La *monade*, pouvant être perçue comme l'ancêtre du *holon* d'Arthur Koestler (1905-1983) [147], lui-même cousin de l'*agent*⁵³, est aussi, de par sa définition, un précurseur de la vision systémique apparue, concrétisée et formalisée, plus tard, par divers travaux et théories.

La *théorie de l'évolution* [59] de Charles Darwin (1809-1882), est également un exemple manifeste de vision systémique, faisant intervenir deux facteurs, habituellement inconcevables chez un cartésien : le hasard – c.-à-d., les mutations génétiques chez les individus – et la nécessité – c.-à-d., les contraintes imposées par le milieu – [187]. Darwin mettait alors en scène une théorie à deux niveaux – individu et espèce –, interagissant entre eux et faisant émerger des individus mieux adaptés à l'environnement.

À partir du début du XX^e siècle, la *prolifération* de nouvelles théories a relativement pris de l'importance devant, justement, diverses nécessités⁵⁴ et contraintes contextuelles,

⁵²Extrait d'une critique de Condillac des *Lettres inédites*, c.f., [33, p. 9] pour plus de détails.

⁵³Ce concept d'agent est étudié plus bas ; il est dorénavant important de noter que les types de monades, *entéléchies* ou *âmes*, se retrouvent, de manière plus approfondie, dans la classification comportementale des agents, *réactifs*, *cognitifs*...

⁵⁴Karl Popper (1902-1994) et ses travaux sur l'épistémologie évolutionniste, généralisa le modèle darwinien à d'autres activités humaines, dont, les pensées et théories scientifiques [216].

c.-à-d., différents types de crises ; géopolitique, économique, écologique, etc. L'exemple des importantes avancées technologiques de la seconde guerre mondiale, en fission nucléaire, et ayant abouti aux évènements d'Hiroshima et Nagasaki⁵⁵, est d'ailleurs intéressant. Plusieurs travaux, essentiels à la théorie générale de la complexité, ont ainsi pu voir le jour ou être confirmés, durant les guerres mondiale et/ou froide :

- Claude Shannon commença à élaborer sa théorie de l'information lors de ses travaux en cryptographie militaire – qui donnèrent lieu en 1948 à l'article [235] décrivant un système général de communication et introduisant la notion de *bruit*, notion relativement opposée au *précepte d'évidence* de Descartes – ;
- la mise en place de boucles de *pro/rétroaction* – essentielles en cybernétique et par la suite en automatique –, par Norbert Wiener (1894-1964), lors du développement d'un système de défense anti-aérien (DCA), est une remise en cause du *précepte de causalité*.

De très nombreux autres exemples pourraient être répertoriés. Constatant « la faillite du discours cartésien » [158, chap. 1, p. 27]⁵⁶, des théories – p. ex., structuraliste⁵⁷, systémique, constructiviste⁵⁸ – se sont développées, de manière disjointe et éparse. Edgar Morin les a regroupées, reliées, développées et intégrées au sein de sa pensée complexe, *synthétisée* dans sa fameuse *méthode* [189].

Dans les sous-sections suivantes, cette *méthode* est présentée et oriente l'étude vers les systèmes complexes et, plus loin, vers la modélisation et le raisonnement à partir de tels systèmes.

1.3.2 Introduction : le *nouveau discours de la méthode* de J.-L. Le Moigne

Même s'il peut apparaître contradictoire de discuter d'un discours de la méthode – celui de René Descartes – pour en parallèle, en établir un nouveau, basé et à la fois, opposé au précédent, il semble intéressant de développer les quatre préceptes du *nouveau discours*

⁵⁵Cet exemple n'est d'ailleurs pas insignifiant : ce genre d'évènements, et les implications – parfois regrettées – de certains scientifiques – p. ex., les regrets d'Albert Einstein au sujet de son implication dans le projet de la bombe atomique [39] –, auront ensuite contribué à la réintroduction progressive d'une métaphysique, dans la communauté scientifique, et participé à la remise en question de *l'utilité* des sciences [133], questionnement mis de côté au cours de l'histoire cartésienne.

⁵⁶Il semble inutile d'insister sur les multiples exemples, régulièrement énumérés dans des travaux de recherche – de tous domaines –, média etc., détaillant les imperfections et dérives *du système Terre*.

⁵⁷Le structuralisme cherche à mettre au centre de l'étude d'un objet, sa structure, la mettant en relation avec l'évolution et la fonction de celui-ci : *évolution* ↔ *structure* ↔ *fonction*. Jean Piaget en est un des plus grands représentants [213].

⁵⁸Courant de pensée où la limite entre le sujet pensant et l'objet étudié n'existe pas, les connaissances et méta-connaissances sont construites par le sujet et non l'inverse. « La position constructiviste [...] consiste [...] à considérer la connaissance comme liée à une action qui modifie l'objet et qui ne l'atteint qu'à travers les transformations introduites par cette action [...] Il n'y a plus en droit de frontière entre le sujet et l'objet » ; *citation de J. Piaget issue de Logique et connaissance scientifique (1967), reprise dans [156, p. 17]*.

de la méthode de Jean-Louis Le Moigne, en guise d'introduction à la pensée complexe, c.f., tableau 1.3.

1. **Le précepte de pertinence** : *convenir que tout objet que nous considérerons se définit par rapport aux intentions implicites ou explicites du modélisateur. Ne jamais s'interdire de mettre en doute cette définition si, nos intentions se modifiant, la perception que nous avons de cet objet se modifie.*

2. **Le précepte du globalisme** : *considérer toujours l'objet à connaître par notre intelligence comme une partie immergée et active au sein d'un plus grand tout. Le percevoir d'abord globalement, dans sa relation fonctionnelle avec son environnement sans se soucier outre mesure d'établir une image fidèle de sa structure interne, dont l'existence et l'unicité ne seront jamais tenues pour acquises.*

3. **Le précepte téléologique** : *interpréter l'objet non pas en lui-même, mais par son comportement, sans chercher à expliquer a priori ce comportement par quelque loi impliquée dans une éventuelle structure. Comprendre en revanche ce comportement et les ressources qu'il mobilise par rapport aux projets que, librement, le modélisateur attribue à l'objet. Tenir l'identification de ces hypothétiques projets pour un acte rationnel de l'intelligence et convenir que leur démonstration sera bien rarement possible.*

4. **Le précepte de l'agrégativité** : *convenir que toute représentation est partisane, non pas par oubli du modélisateur, mais délibérément. Chercher en conséquence quelques recettes susceptibles de guider la sélection d'agrégats tenus pour pertinents et exclure l'illusoire objectivité d'un recensement exhaustif des éléments à considérer.*

TAB. 1.3 – *Les quatre préceptes du nouveau discours de la méthode de Jean-Louis Le Moigne, issus de [158, p. 43.]*

Dans ce nouveau discours, J.-L. Le Moigne oppose au précepte *d'évidence*, un précepte de *pertinence* ; au précepte *réductionniste*, un précepte *globaliste* ; au précepte *causaliste*, un précepte *téléologique* ; et enfin au précepte *d'exhaustivité*, un précepte *d'agrégativité*. A l'inverse du discours de 1637, qui prétendait établir le raisonnement universel, le discours de 1976, comme le précise son auteur, ne doit aucunement devenir « totalitaire » [158, p. 45]. Et, comme le dira ultérieurement Edgar Morin – p. ex., [190]⁵⁹ – à propos d'une pensée complexe intégrant la pensée simplifiante, le nouveau discours intègre l'ancien ; les deux prennent autant d'importance ; l'un ne doit pas dominer l'autre, le nouveau ne doit pas supplanter l'ancien.

⁵⁹ « En somme, la pensée complexe n'est pas le contraire la pensée simplifiante, elle intègre celle-ci ; comme dirait Hegel, elle opère l'union de la simplicité et de la complexité, et même, elle fait finalement apparaître sa propre simplicité. En effet, le paradigme de complexité peut être énoncé aussi simplement que celui de la simplicité alors que ce dernier impose de disjoindre et de réduire, le paradigme de complexité enjoint de relier, tout en distinguant. », [190, *conclusion*].

1.3.3 Notions essentielles de la complexité

Prétendre détailler la *pensée complexe* en quelques lignes est une illusion ultime, parfaitement bien mise en valeur par la phrase d'Edgar Morin, « *la complexité est un mot problème et non un mot solution* », [192, avant-propos, p.10] ; relire également à ce sujet la note de bas de page n°5, p. 9. La complexité, qui, étymologiquement, vient du latin *cum plexus*, signifie *ce qui est tissé ensemble*. Littéralement déjà, cette définition approfondit⁶⁰ donc le réductionnisme cartésien et, allant un peu plus loin, part du constat que notre monde est fait d'actions, inactions, relations, attractions, répulsions, aléas, hasards, perfections, imperfections, incertitudes, certitudes, dépendances, indépendances, etc.

Dans un premier temps, parmi toutes les notions caractérisant la pensée complexe, quatre principales peuvent être mises en valeur : l'ordre, le désordre, les interactions – *actions réciproques modifiant le comportement ou la nature des actants*, [189, tome 1, p. 155] – et l'organisation. Elles forment ensemble, la *boucle tétralogique* :

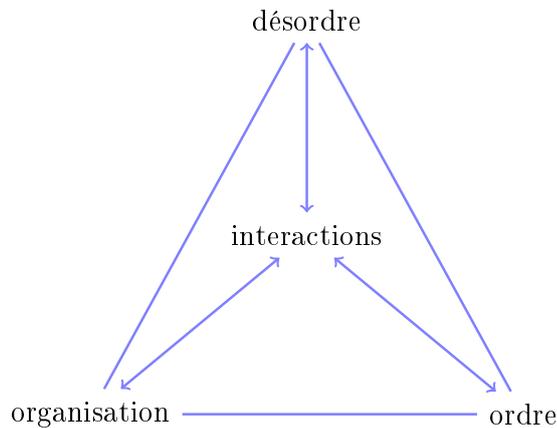


FIG. 1.3 – La boucle tétralogique d'Edgar Morin [189, tome 1, p. 79].

Cette *boucle tétralogique* est un principe fondateur de la conception complexe de notre Univers – et de ce qui le compose – proposée par Edgar Morin. Tout *objet*⁶¹ physique, biologique, sociologique, économique, etc., de cet Univers – p. ex., atome, organisme vivant, société animale, entreprise, etc. – forme un système. Un système n'existe essentiellement que par ces quatre éléments, qui, eux-mêmes, ne peuvent exister l'un sans l'autre :

« Pour qu'il y ait organisation, il faut qu'il y ait interactions : pour qu'il y ait interactions, il faut qu'il y ait rencontres, pour qu'il y ait rencontres, il faut qu'il y ait désordre (agitation, turbulence). » [189, tome 1, p. 51]

⁶⁰ Au fur et à mesure de la présentation, la *pensée complexe* ne sera plus opposée à la *pensée simplifiante*, partant du principe que cette dernière devait être une étape nécessaire entre le néant et le complexe.

⁶¹ Le terme *objet* doit être considéré d'une manière générale et non-connotée, comme une *chose concrète, perceptible par les sens*, pour introduire au paragraphe suivant la définition de *système*.

Alors que, jusqu'au début du XX^e siècle, la dissociation était une évidence ; il est maintenant devenu nécessaire de concevoir un *objet*, à la fois, comme un tout et comme partie d'un tout organisé. Ainsi, tout *objet* peut donc être vu comme un *système*, dont une définition synthétique a été donnée par l'auteur : « un système est une unité globale organisée d'interrelations entre éléments, actions, ou individus. » [189, tome 1, p. 102]⁶².

Dans tout système, les quatre termes – ordre, désordre, interactions et organisation – s'auto-entretiennent donc mutuellement. Pour que l'organisation – qui correspond à « l'agencement de relations entre composants ou individus qui produit une unité complexe ou système, dotée de qualités inconnues au niveau des composants ou individus » [189, tome 1, p. 103] – persiste et évolue, il faut de l'ordre et son antagonisme, le désordre, ainsi que des interactions – avec elle-même, ses composants et son environnement extérieur. Ayant rappelé les définitions de *système* et d'*organisation*, apparaît alors un deuxième concept essentiel à la pensée complexe : le *concept trinitaire*.

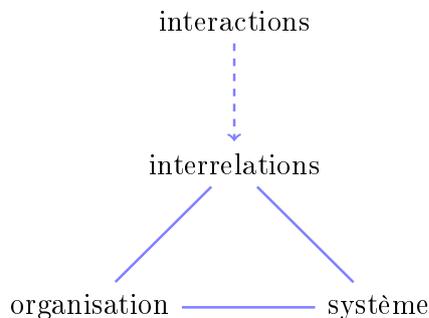


FIG. 1.4 – *Le concept trinitaire [189, tome 1, p. 103].*

Comme pour la *boucle tétralogique*, le *concept trinitaire* met en scène des éléments liés et interdépendants : le système n'existe pas sans organisation et réciproquement ; tous deux dépendant des interrelations réciproques entre le tout et ses composants et entre différents composants du tout. C'est l'organisation qui « transforme, produit, relie, maintient » [189, tome 1, p. 104] le système et ses composants.

A partir de ces deux idées générales, *boucle tétralogique* et *concept trinitaire* – et des caractères précédents, système, organisation, etc. –, de très nombreuses notions, autour desquelles la pensée complexe est structurée, découlent logiquement :

⁶²D'autres définitions avant celle-ci – certaines dissociant d'ailleurs à tort les notions de système et d'organisation – ont été proposées, p. ex. :

- pour Ludwid von Bertalanffy, en 1956, *un système est un ensemble d'unités en interrelations mutuelles* [279] ;

- Joël de Rosnay, dans *le macrocosme* [62, p. 101], définit le système comme *un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but* – notons qu'on retrouve dans cette définition une notion de finalité.

- le principe de rétroaction⁶³ – *feedback* en anglais – ; la rétroaction représente l'action de retour d'un effet sur ses propres causes. L'exemple courant de rétroaction concerne la régulation thermique d'un organisme soumis à une température extérieure fluctuante. Lorsque la température de l'environnement baisse, la température de l'organisme devrait également diminuer, pourtant un phénomène de rétroaction vient s'opposer à la cause pour que l'effet en soit modifié. Une rétroaction peut être directe, indirecte, instantanée, temporisée, positive, négative, en cascade, intérieure, extérieure, etc., [109, 189]. La combinaison de boucles de rétroaction diverses a généralement des effets pervers imprévisibles surtout lorsque celles-ci sont considérées de manière simplifiée et observées d'une manière purement cartésienne.

- Le principe d'émergence ; la notion d'émergence est couramment employée dans divers domaines, p. ex., en économie [130], en éthologie [40], en systèmes de production [264]. Pourtant, comme le rappelle G. Morvan dans [194, p. 5], « la définition même de la notion d'émergence pose un grand nombre de problématiques non résolues. » Cependant, elle peut être définie comme un processus à partir duquel un système, composé d'acteurs en interactions, acquiert de nouvelles propriétés inconnues ou non-déductibles directement à partir des propriétés individuelles ou par une *simple somme* de ces propriétés⁶⁴.

- Le principe de (multi-)niveaux ; l'organisation est une propriété essentielle aux systèmes complexes leur permettant d'éviter chaos ou agrégat inerte. Cette organisation est structurée et plusieurs niveaux, multi-dimensionnels, multi-temporels, multi-spaciaux, multi-objectifs, multi-hiérarchiques, etc., s'influencent et échangent. L'exemple de l'organisme vivant – constitué d'organes, eux-mêmes constitués de tissus, eux-mêmes constitués de cellules, elles-mêmes constituées etc. – est illustratif de l'organisation multi-niveaux d'un système complexe. Chacun des niveaux peut posséder un cycle de vie particulier, partager informations et ressources avec d'autres niveaux et dépendre et influencer ces mêmes niveaux⁶⁵. Cette *organisation de l'organisation* [189, tome 1, p. 129] est une notion particulièrement importante dans la conception des systèmes complexes, qui n'est généralement pas une chose aisée à intégrer, en particulier lorsqu'on tente de modéliser de tels systèmes⁶⁶.

- Le principe d'ouverture et de fermeture ; pour qu'un système persiste, il doit *disposer* d'ordre et de désordre – internes ou externes – et pouvoir donc interagir avec eux.

⁶³On parle également de boucle de rétroaction ou de *causalité rétroactive* [189, tome 1, p. 258], généralisant clairement la causalité linéaire. Ce principe se retrouve couramment en automatique lorsqu'on parle de système asservi ou régulé.

⁶⁴Une formalisation mathématique intéressante de l'émergence a été proposée dans [17] et rappelée dans [194, p. 5].

⁶⁵Les différentes notions, de rétroaction, d'émergence et de multi-niveaux sont évidemment liées. En économie – où un exemple d'émergence était auparavant cité –, plusieurs travaux abordent la relation multi-niveaux entre salariés et marchés financiers. Cette relation, souvent de subordination, a fait émerger des solutions alternatives rétroagissant sur la dite relation, p. ex., les statuts d'épargnant-actionnaire [188].

⁶⁶Des travaux récents en modélisation – multi-agents multi-niveaux – tentent de répondre aux problèmes de l'*organisation de l'organisation*.

Le système échange alors avec son environnement, énergie, matière, information, sous diverses formes et intensités, pour se maintenir en état. Dans la littérature, les systèmes *ouverts* sont souvent opposés aux systèmes *fermés* – c.-à-d., n’ayant aucun échange avec leur environnement. Dans les faits, la complète fermeture n’est qu’une simplification théorique, généralement admise par les scientifiques pour isoler temporairement le système afin d’en faciliter son analyse. En réalité, tout système est à la fois fermé et ouvert : partiellement fermé pour conserver en partie de son ordre et de sa complexité interne ; et partiellement ouvert pour échanger, communiquer, incorporer le désordre extérieur, l’utiliser et le transformer en ordre pour évoluer.

1.3.4 Synthèse

La pensée complexe n’invente pas la complexité, ni la recherche pour traiter et analyser des systèmes caractérisés de complexes pour l’occasion. Contrairement au *paradigme de simplicité*, la pensée complexe accepte que, la réalité, l’Univers, soient par définition complexes. Elle fait prendre conscience, *simplement*, de l’omniprésence de cette complexité, de l’obligation de la prendre en considération et de l’apprivoiser. Des notions et concepts essentiels à la pensée complexe ont été abordés, d’autres, bien sûr, existent – comme la catégorisation des systèmes, p. ex., système, sous-système, supra-système, éco-système, méta-système [189, tome 1, p. 139] – et cette pensée n’est ni définitive ni éternelle. Elle ne se considère d’ailleurs pas unique et vise à intégrer l’ensemble des idées, théories et courants de pensée passés et futurs en son sein.

Un paramètre primordial à appréhender⁶⁷ lorsque le sujet d’étude est complexe, a été mis en avant : le *désordre*. Ce terme générique regroupe ici autant de notions, évoquées dans le chapitre suivant, que l’incertitude, l’imprécision, l’imperfection, le hasard, etc. Quand, avec la pensée simplifiante, il suffisait de percer le niveau inférieur pour comprendre un système, avec la pensée complexe, le désordre est accepté comme une caractéristique structurelle des systèmes – c.f., la *boucle tétralogique*. La modélisation du désordre est alors une nécessité non parce que la connaissance ou les techniques semblent faire défaut pour expliquer des phénomènes particuliers ou imprévisibles, mais bien parce que le désordre est irréductible, comme une nécessité logique.

La section suivante, réintroduisant les systèmes complexes, aborde l’importance de la modélisation et, plus particulièrement, de la modélisation multi-agents pour la compréhension des systèmes complexes.

⁶⁷L’appréhension du désordre n’est pourtant pas une idée neuve. L’entropie du deuxième principe de la thermodynamique mettait déjà en avant la complémentarité de l’ordre et du désordre, c.f., les travaux de Rudolf Clausius en 1865 ou de Ludwig Boltzmann en 1877 [135].

1.4 Modélisation et simulation de systèmes complexes

Après avoir entraperçu la pensée et les systèmes complexes dans la section 1.3, viennent alors naturellement les présentations de la modélisation et de la simulation ; deux principes utiles à la compréhension, l'explication, l'analyse et l'anticipation de ces systèmes.

1.4.1 Modèle et modélisation

Paul Valéry disait que « nous ne raisonnons que sur des modèles » [266], ajoutant également que « ce qui est simple est toujours faux, tout ce qui ne l'est pas est inutilisable » [265]. C'est là toute l'ambiguïté du modèle. Dans son sens le plus large, il est une représentation simplifiée d'un système de référence, existant pour répondre à des questions à propos de ce système. Jean-Louis Le Moigne, dans [155], définit le modèle comme « une production de l'esprit visant à représenter symboliquement un phénomène » et met en valeur l'aspect subjectif du modèle relatif à la vision de son concepteur, à l'époque⁶⁸, et surtout à l'objectif du modèle. On modélise habituellement un système pour diverses raisons : la description – p. ex., les cartes topographiques, modèle d'un territoire –, l'explication – p. ex., un modèle expliquant la tectonique des plaques – et la prédiction – p. ex., les modèles de prévisions météorologiques –⁶⁹.

Deux catégories de modèles sont souvent distinguées : les modèles *physiques* – p. ex., un modèle réduit – et modèles *abstraites* – p. ex., une équation mathématique. Ces derniers sont au cœur de cette thèse qui se rapporte aux modèles développés pour être exécutés sur ordinateur. Un modèle peut être exprimé sous un formalisme spécifique : on parle ainsi de *méta-modèle*, ou famille de modèles, ou encore de *paradigme*, pour désigner l'ensemble des règles de sémantique et de syntaxe spécifique à un groupe de modèles, p. ex., les modèles multi-agents, ou le paradigme agent.

Quant à la modélisation, c'est un processus d'actions, récursif, dont la finalité est la construction d'un modèle. Daniel Durand [95, p. 64] détaille ce processus en quatre étapes génériques : 1. définition du projet ↔ 2. définition du modèle ↔ 3. étude du modèle ↔ 4. utilisation du modèle.

1.4.2 Simulation

Dans le langage courant, la *simulation* ne fait plus référence qu'à la *simulation informatique* [263] et peut être considérée comme l'outil le plus puissant disponible pour la représentation et la manipulation de systèmes complexes [236]. Une définition précise et

⁶⁸Considérer le terme *époque* au sens large, c.-à-d., comme un ensemble de tendances, influences, technologies, etc., relatives à une période historique. P. ex., la théorie du géocentrisme, prônée jusqu'au *XVI^e* siècle et réfutée par Nicolas Copernic, fut lentement remplacée par l'héliocentrisme. A ce sujet, des différences existent dans la littérature entre théorie et modèle, le deuxième pouvant être vu comme une instanciation du premier [112].

⁶⁹Remarquons qu'un modèle peut être explicatif sans pour autant être prédictif [97].

complète a été donnée dans [263, p. 9] :

Définition 1. « *La simulation est l'activité au cours de laquelle, selon un protocole et avec un objectif précis, on utilise un simulateur pour faire évoluer les entrées d'un modèle dynamique, l'exécuter et en recueillir les sorties. Tout modèle écrit en respectant le méta-modèle associé au simulateur et comportant au moins un paramètre d'entrée peut se prêter à ce processus de simulation.* »

Cette définition prend en considération plusieurs éléments fondamentaux qui seront réutilisés dans la suite du manuscrit :

- le simulateur, c.-à-d., la plateforme informatique capable d'interpréter, exécuter et utiliser des modèles ;
- les entrées, c.-à-d., l'ensemble des paramètres dont la valeur est définie en amont de l'exécution du modèle ;
- les sorties, c.-à-d., les paramètres correspondant aux réponses du modèle exécuté ;
- l'aspect dynamique, à travers lequel deux types de modèles sont distingués : les modèles déterministes – c.-à-d., aucun des paramètres ne dépend du hasard – et les modèles stochastiques – c.-à-d., dont les paramètres d'entrée ont une part d'aléatoire.

Le principe de simulation présente de nombreux avantages face aux modèles analytiques ou mathématiques [236] :

- l'intuitivité des modèles proposés, c.-à-d., accessibilité, compréhension et comparaison, souvent directe, au système réel⁷⁰ ;
- la flexibilité, c.-à-d., sauf contraintes liées aux temps d'exécution, il est généralement assez aisé de modifier un paramètre et visualiser immédiatement le comportement du nouveau modèle obtenu ;
- le contrôle du temps.

Pourtant, comme le précise R. E. Shannon [236], la simulation demeure encore un art nécessitant à la fois compétences et astuces. Les résultats d'un modèle dépendent principalement des qualités du modèle et du modélisateur ainsi que des données d'entrée et, plus généralement, de la connaissance du système de référence. Une précision accrue sur ces données pourra aboutir à des problèmes de complexité algorithmique – c.-à-d., temps de calcul et utilisation des ressources mémoires excessifs –, problèmes majeurs de la simulation. Inversement, une précision trop faible n'aboutira pas ou les résultats pourront n'avoir aucun sens physique. De plus, de par leur conception, les modèles par simulation, ne servent communément qu'à l'analyse de comportements et peu à la détermination de solutions optimales⁷¹. Or, paradoxalement, certains paradigmes de modélisation permettent l'obtention de comportements intéressants sans les expliquer formellement. Des

⁷⁰Plus concrètement, la *force intuitive* des systèmes multi-agents est d'ailleurs détaillée dans la sous-section 1.4.4.

⁷¹Sur ce point, les modèles à base d'agents, par exemple, peuvent être intégrés dans des architectures automatisées globales, capables d'exploiter les résultats des simulations pour optimiser le paramétrage des modèles.

zones d'ombres – ou *boîtes noires* –, difficiles à manipuler, font alors abstraction de certains phénomènes sous-jacents, potentiellement substantiels dans le cas d'une utilisation ultérieure du modèle.

1.4.3 De la simulation aux systèmes multi-agents, bref historique

Jusqu'au début des années 1990, les systèmes d'information étaient majoritairement centralisés et séquentiels. Les algorithmes, monolithiques, reposaient sur le principe du moteur d'inférence – c.-à-d., avec une base de faits, une base de règles et un moteur d'inférence – et rares étaient les interactions avec le monde extérieur – p. ex., les systèmes experts DENDRAL [167] ou, plus tard, MYCIN. Cette *individualisation* immédiate de l'*Intelligence Artificielle* (AI) posa, dès lors, des problèmes théoriques importants : comment une intelligence pouvait-elle prétendre se créer et se développer en étant en totale autosuffisance [103] ?

Lorsque les scientifiques ont amorcé un approfondissement des systèmes complexes, de nouvelles méthodologies de conception de l'informatique et de l'*Intelligence Artificielle* ont alors fait leur apparition : l'*Intelligence Artificielle Distribuée (IAD)*, la *vie artificielle* et le *néo-connexionisme*⁷² ; c.f., *fig. 1.5*. Ces méthodologies se sont ensuite améliorées avec la démocratisation de standards informatiques [121], p. ex., protocole de communication IP, XML⁷³, paradigme de programmation orientée objet⁷⁴, etc.

Se basant sur le constat évident que les problèmes complexes sont tous physiquement distribués et hétérogènes ainsi que pour répondre à des besoins de modularités des systèmes d'information, des techniques de distribution de l'intelligence se sont développées. Au départ, des travaux relatifs au partage d'informations entre différentes sources – ayant chacune une vision locale d'un problème global –, mettaient en avant le principe du *tableau noir*⁷⁵ et, donc du *contrôle distribué*. Ensuite, sont apparues les applications multi-capteurs et, avec elles, le principe de la *distribution des données*, p. ex., le DVMT de [165] en 1983. Quatre ans plus tard, naissait le système *MACE* [111], « monstre sacré » [103, p. 30] et ancêtre des systèmes multi-agents valorisant l'importance des interactions entre

⁷²Ce courant *néo-connexioniste* ne sera pas abordé dans cette thèse, bien qu'il influença aussi les systèmes multi-agents. De nombreux travaux l'abordent largement, c.f., par exemple les réseaux de neurones artificiels [34].

⁷³XML, c.-à-d., eXtensible Markup Language, est un langage informatique générique, simple et flexible, servant essentiellement à représenter, stocker et transférer des données entre différents systèmes hétérogènes. Les informations concernant ce langage sont accessibles à l'adresse : <http://www.w3.org/XML/>.

⁷⁴C.-à-d., concepts et méthodes de programmation consistant à définir un système par rapport à ses données plutôt qu'à ses fonctions. Le *programme* est structuré en terme de classes d'objets – p. ex., la classe *voiture* et la classe *moteur* –, d'instances de classes ou objets – p. ex., les instances respectives « Volkswagen Coccinelle » et « bi-cylindre à plat de 1,1 l. » – et de diverses relations – p. ex., une « Volkswagen Coccinelle » *propulsée par un* « bi-cylindre à plat de 1,1 l. » Java, langage principal des présents travaux, est un *langage objet* [119].

⁷⁵Métaphore informatique de l'*ardoise scolaire* où des sources, tentant de résoudre un problème, remplissent de manière opportuniste un tableau partagé. Chacune des sources peut alors modifier, ajouter, retirer des éléments du tableau, en fonction de son état et de l'état courant du tableau. De très nombreuses variantes ont vu le jour après les premiers travaux de [98].

acteurs d'un système – échanges de messages – et de l'organisation – c.f., définition p. 26.

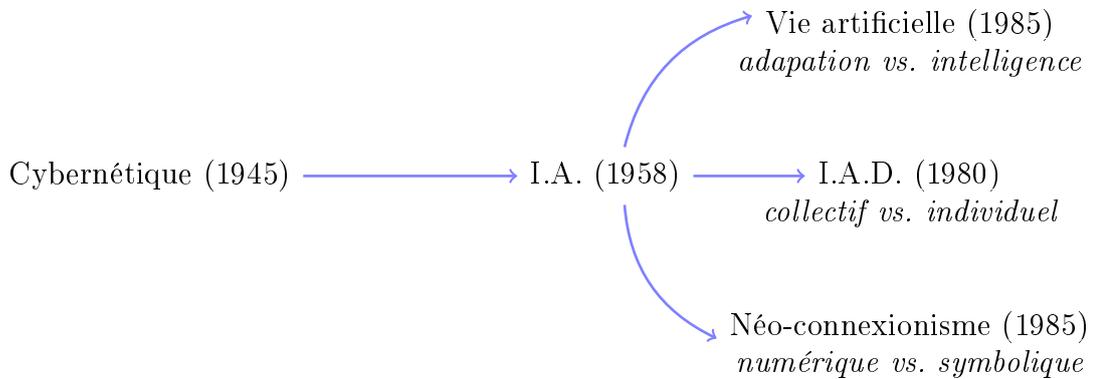


FIG. 1.5 – Apparition des trois domaines majeurs en intelligence artificielle. Chronologie issue de [91].

En parallèle, un autre champ d'étude, habituellement nommé *vie artificielle*, était initié en 1948 par les travaux de J. Von Neumann sur les automates cellulaires [203] – détaillés dans la sous-section 1.4.5 –, poursuivis plus tard par les recherches de J. H. Conway en 1970 sur le *jeu de la vie* et C. Langton en 1984 sur la boucle *autorépliquative* [154]. Cette branche de l'intelligence artificielle s'intéresse majoritairement à l'analyse de la dynamique de phénomènes complexes, à l'évolution de populations par algorithmes génétiques et à l'étude de phénomènes collectifs par l'étude des interactions d'acteurs *réactifs*⁷⁶. Ce dernier thème – bien qu'ayant débuté dans les années 1970, p. ex., [69] – est encore d'actualité et s'élargit à de nombreux domaines, p. ex., [238], [125]. Il est extrêmement enrichissant pour la communauté des systèmes multi-agents, en mettant aussi en valeur l'opposition des *cognitivistes* et des partisans du *réactif* [103, p. 32].

Au cours des ans, une communauté *orientée agent*, traitant des *Systèmes Multi-Agents* (SMA) et faisant de la *Simulation Orientée Agents* (SOA), influencée par les multiples thématiques ci-dessus, s'est donc formée, en prenant une importance relativement considérable dans la modélisation et la simulation de systèmes complexes. De très nombreux domaines applicatifs ont ainsi pu montrer les avantages de ce paradigme : en physique [36], en biologie [166], en logistique [225], en télécommunication [139], en énergétique [149], et bien d'autres domaines encore.

1.4.4 Les systèmes multi-agents

À l'égal de *La méthode* d'Edgar Morin, considérée comme une référence pour les systèmes complexes, le livre de Jacques Ferber, *Les systèmes multi-agents* [103], est une

⁷⁶C.-à-d., réagissant de manière opportune aux variations de l'environnement, p. ex., suivant *sans raisonnement* un champ de potentiels. Cette définition sera précisée dans la section 1.4.4.

œuvre importante de la littérature *agent*. Cette sous-section se base sur ce dernier écrit ainsi que sur le récent ouvrage de J.-P. Treuil, A. Drogoul et J.-D. Zucker, *Modélisation et simulation à base d'agents* [263].

1.4.4.1 Système

Depuis quelques paragraphes, une présentation des systèmes multi-agents a été amorcée, mais aucune définition n'a pour autant été avancée ; en voici une concise, donnée dans [263, p. 13-14] :

Définition 2. « *C'est un système composé d'entités multiples ou agents qui évoluent dans un environnement, conçu comme une entité particulière, dans lequel ils sont localisés. Ces agents sont dotés d'attributs, de comportements, et de capacités de perception et de communication. L'ensemble des valeurs des attributs d'une entité à un instant donné constitue l'état de cette entité, et la réunion de l'ensemble des états des entités forme l'état microscopique ou – dit plus simplement – l'état du système. Les capacités de perception des entités leur permettent de consulter un sous-ensemble de cet état microscopique, habituellement de façon localisée dans l'environnement. Les comportements sont des règles contrôlant à chaque instant l'évolution de cet état, en intervenant sur les états des entités qui les portent ou sur leur existence même (création et destruction), ainsi que sur les états et existences des autres entités intervenant dans les éventuelles actions, communications ou interactions décrites dans les comportements.* »

1.4.4.2 Agent

Un agent peut être vu comme une entité autonome, soit concrète – p. ex., un robot – soit virtuelle – p. ex., un processus informatique – :

- capable d'agir dans un (des) environnement(s),
- capable de communiquer, directement ou indirectement, avec d'autres agents,
- qui est mue par un ensemble de tendances (objectifs à atteindre, fonctions de satisfaction à optimiser),
- qui possède des ressources propres,
- capable de percevoir partiellement son environnement et éventuellement de se le représenter,
- possédant des compétences et offrant des services,
- potentiellement capable de se reproduire.

Son comportement général est de satisfaire des besoins ou objectifs tout en étant soumis à un ensemble de contraintes – p. ex., état de l'environnement, ressources disponibles, perceptions, représentations, compétences. Il se décompose souvent en trois niveaux : *perception, décision, action*.

Deux principaux types d'agent sont habituellement distingués dans la littérature : les agents *réactifs* et les agents *cognitifs*⁷⁷.

⁷⁷J. Ferber en distingue en fait quatre, en fonction des objectifs et buts des agents. Seule la vision réductrice, cognitif/réactif est retenue, c.f., [103, p. 20-21].

On dit d'un agent qu'il est réactif lorsqu'il ne possède aucune représentation symbolique de lui-même ou de son environnement. Le module de décision est très limité voir absent et l'agent agit simplement en *respectant* un fonctionnement *stimulus/action* ou *action/réaction*, sans être maître de ses actes. Ce comportement peut être qualifié de *rigide* et ses perceptions et actions ne pourront le modifier [90, p. 19]. Au sein de systèmes purement réactifs, la communication s'effectue par propagation de signaux dans l'environnement, on parle alors de *stigmergie*. Un tel signal – p. ex., une odeur, un son –, pouvant aussi résulter d'un dépôt d'une *marque* – p. ex., la phéromone – par un agent dans l'environnement, se diffuse avec une intensité habituellement décroissante en fonction de la distance et du temps.

Systèmes multi-agents réactifs riment avec auto-organisation et phénomènes émergents, p. ex., l'exemple de l'auto-organisation d'une termitière à partir des comportements réactifs des termites [32]. Enfin, il n'existe pas de plans ou de mémoires individuels mais une certaine mémoire collective peut exister. La branche réactive des SMA s'inspire beaucoup des comportements d'insectes sociaux – c.-à-d., fourmis, termites, abeilles, araignées, etc. – ou de recherches en sociologie. Elle présente des intérêts dans de nombreux domaines, p. ex., en clustering [237], en gestion de production [144], etc.

A l'inverse, un agent cognitif est capable de se représenter l'environnement, d'avoir conscience des objets et autres agents, et de planifier ses actions. Alors que, dans un système réactif, la coordination des agents fait essentiellement appel à des champs de forces et de marquages de l'environnement – Alexis Drogoul parle d'une « conception biologique de l'organisation » [90] –, la coordination cognitive fait plus référence aux principes de partage d'informations, de négociation, d'arbitrage [102] – « conception sociologique de l'organisation ».

La communication chez les agents cognitifs apparaît plus évoluée et ceux-ci peuvent disposer de méthodes de communication *directe*, contrairement à la stigmergie, dite communication *indirecte*⁷⁸. Ces méthodes regroupent l'ensemble des moyens d'échange de messages, dont : l'échange point-à-point – p. ex., une discussion orale entre deux interlocuteurs –, l'échange par diffusion – p. ex., un professeur à ses élèves – [103, p. 317]. De nombreux protocoles ont été élaborés pour formaliser la communication entre agents, basés sur la théorie des actes du langage, comme KQML ou FIPA-ACL⁷⁹.

Les différences comportementales ne sont pas strictes et, dans de nombreux systèmes, la démarcation réactive/cognitive des agents est souvent difficile à déterminer. Un agent peut ainsi contextuellement être réactif et cognitif. Il peut, par exemple, disposer d'une représentation de son environnement mais agir de manière réactive.

⁷⁸Remarquons tout de même que les agents réactifs peuvent aussi communiquer directement.

⁷⁹ACL pour *Agent Communication Language*. Les spécifications d'ACL sont disponibles à l'adresse <http://www.fipa.org/repository/aclspecs.html>.

1.4.4.3 Environnement

L'environnement est un élément important des systèmes multi-agents et pourtant, plusieurs sens lui sont souvent associés, provoquant parfois la confusion. L'environnement est un espace partagé pouvant jouer plusieurs rôles :

- celui de structure physique – J. Ferber parle d'espace métrique dans lequel sont situés les entités, c.-à-d., agents, objets – structurant les interactions des entités externes ;
- celui de structure de communication, c.-à-d., espace immatériel permettant l'échange de messages ;
- celui de structure sociale, c.-à-d., maintenant les groupes, les sociétés.

Quelle que soit la structure visée par l'environnement, celui-ci effectue la médiation entre les agents. Il encapsule les ressources – p. ex., matières premières, organiques – et impose des contraintes – p. ex., la présence d'une mer contraint le voyageur à pied à changer de moyen de transport. Une étude attentive sur l'environnement est disponible dans [286].

1.4.4.4 Simulation à base d'agents, la plateforme MadKit/TurtleKit

L'ensemble des définitions ci-dessus sont toutes relativement génériques et tout système réel pourrait ainsi être interprété selon le paradigme multi-agents présenté. Ce manuscrit s'intéresse plus particulièrement aux simulations orientées agent. Les définitions s'appliquent donc pour un modèle où les agents seraient des programmes informatiques autonomes exécutés sur une *plateforme multi-agents* – c.-à-d., infrastructure de logiciels et bibliothèques utilisée comme environnement de déploiement et d'exécution d'agents. De très nombreuses plateformes agents sont disponibles : Jade [22], Jack [131], Retsina [258], etc. Le choix de celle-ci est généralement difficile à établir, chacune ayant divers avantages et inconvénients et les critères pouvant varier selon les développeurs ou l'application [194, p. 17]. Pour des raisons historiques et pratiques – p. ex., liées à la documentation et à la portabilité⁸⁰ –, dans le cadre de ces travaux, ce choix s'est orienté vers la plateforme MadKit/TurtleKit.

MadKit [123, 122] est une plateforme multi-agents évolutive et modulaire, écrite en Java et construite autour du métamodèle organisationnel *AGR*, pour *Agent-Groupe-Rôle* [104]⁸¹ – c.f., fig. 1.6.

⁸⁰Le terme *portabilité* en informatique, fait référence au fait de pouvoir transporter et exécuter plus ou moins facilement une application sur différents systèmes d'exploitation, p. ex., Windows XP, Linux Ubuntu...

⁸¹Consulter également le site Internet officiel pour plus d'informations : <http://www.madkit.org>.

Ce métamodèle est basé sur l'association de trois notions centrales :

- l'agent, sur lequel quasiment aucune contrainte n'est posée, est vu comme une entité autonome communicante jouant des rôles dans différents groupes ;
- le groupe, notion primitive de regroupement d'agents ;
- le rôle, une représentation abstraite d'une fonction, d'un service ou d'une identification d'un agent au sein d'un groupe particulier.

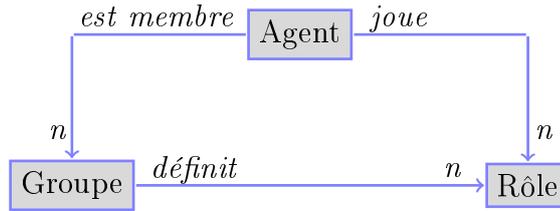


FIG. 1.6 – Métamodèle organisationnel AGR, issu de [104].

En plus d'être basée sur un métamodèle générique permettant de décrire les organisations [105], MadKit est fondée autour d'un *micro-noyau* prenant en charge un ensemble de fonctions importantes : gestion des groupes et des rôles locaux, gestion des cycles de vie des agents – p. ex., lancement, arrêt, identification, ordonnancement – et passage des messages locaux – p. ex., aiguillage, distribution. Cet ensemble de primitives, ainsi qu'un ensemble d'outils pratiques pré-développés, p. ex., outils et interfaces d'observation des agents, font de MadKit une plateforme attrayante pour la modélisation de systèmes complexes.

Imaginée comme un *plugin* de la plateforme MadKit, TurtleKit [185] s'appuie également sur le langage Logo⁸². Cette *sur-plateforme* permet l'exécution de simulations composés d'agents situés, facilitée par les bases de Logo, la puissance de langage Java et le cœur de MadKit. Elle se révèle intéressante pour des simulations où le comportement des agents pourrait être modélisé sous forme d'automate à états finis, c.f., un exemple d'automate à états finis, fig. 1.7.

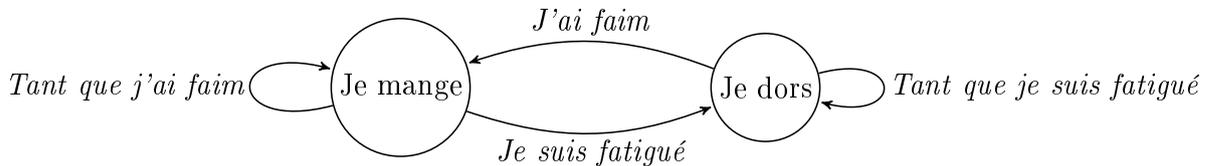


FIG. 1.7 – Exemple d'automate à états finis.

⁸²Le langage Logo, inventé en 1966, est un langage pédagogique dont l'objectif ambitieux était de simplifier la programmation pour faciliter l'apprentissage de l'algorithmie.

Les agents de TurtleKit, appelés *turtles*⁸³, sont ordonnancés par un agent appelé *Scheduler* ; cet ordonnancement permet ainsi, théoriquement, l'exécution de simulations composées de plusieurs milliers d'agents. Enfin, la plateforme propose un environnement spacio-temporel discrétisé et un ensemble d'interfaces permettant modélisation, simulation et observation facilitées des automates cellulaires [184, p. 45], décrits dans la sous-section suivante.

1.4.5 Les automates cellulaires

Les *automates cellulaires*, aussi appelés *réseaux d'automates cellulaires*, sont sans doute la plus simple représentation mathématique, discrète, de systèmes complexes. Utilisés dans de nombreux domaines, comme en physique des fluides, dynamique des molécules, ou écologie, les *AC* présentent des avantages conceptuels importants, dont surtout leurs simplicités théorique et d'implémentation [134]. Une quantité abondante d'ouvrages, travaux de recherche, p. ex., [96, 262], et sites Internet⁸⁴, traitent de la puissance des *AC*. La présente sous-section se limite à la formalisation des automates cellulaires bi-dimensionnels, c.f., l'automate cellulaire modélisant l'évolution de la température d'un corps, présenté dans [272] et cité dans [194, p. 91-93].

Un réseau d'automates cellulaires est assimilable à une grille de $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ cellules, avec \mathbb{N} , l'ensemble des entiers naturels. Chaque cellule $n \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ évolue dans le temps $t \in [t_{init}, t_{final}]$ et dispose :

1. d'un ensemble de j états $E = \{e_1, e_2, \dots, e_j\}$ et une *fonction d'état* :

$$Etat^t : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow E,$$

notée $Etat^t(n)$ et retournant l'état de n à l'instant t ;

2. d'une *fonction de voisinage* $Voisin : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow 2^{\mathbb{N} \times \mathbb{N}}$ définie par :

$$Voisin(n) = \{n + \delta_1, n + \delta_2, \dots, n + \delta_v\}, \quad \forall n, \delta_v \in \mathbb{N} \times \mathbb{N},$$

avec δ_v , correspondant à des coordonnées dans $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$;

3. d'une *fonction de perception d'état du voisinage* à l'instant t :

$$Perception^t : 2^{\mathbb{N} \times \mathbb{N}} \rightarrow E^v,$$

donnée par :

$$Perception^t(Voisin(n)) = \{Etat^t(n), Etat^t(n+\delta_1), Etat^t(n+\delta_2), \dots, Etat^t(n+\delta_v)\} ;$$

4. d'une *fonction d'évolution* définissant le changement d'état de la cellule de t à $t+1$. Elle est définie par $Evolution_n^{t+1} : E^v \rightarrow E$, notée $Evolution_n^{t+1}(Perception^t(n))$ et calcule le prochain état de la cellule n .

⁸³Nom donné aux agents faisant référence à la tortue du langage Logo.

⁸⁴Par exemple, le site de Jean-Philippe Rennard, <http://www.rennard.org>, est une référence franco-phonie.

Habituellement, les fonctions *Voisin*, *Perception* et *Evolution* sont identiques pour chacun des automates du réseau et fixées pour la durée de la simulation. Les $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ fonctions d'évolution sont exécutées en parallèle pour toutes les cellules à chaque pas de temps t .

Pour illustrer cette brève présentation, le *jeu de la vie* de J. H. Conway [53] associe à chaque cellule :

1. un ensemble composé de deux états : $E = \{\textit{allumée}, \textit{éteinte}\}$. Dans sa configuration initiale, certaines cellules sont allumées, d'autres éteintes ;
2. une fonction de voisinage $Voisin(n) = \{n, n+(0, 1), n+(0, -1), n+(1, 0), n+(-1, 0)\}$ sélectionnant les voisins au nord, au sud, à l'est et à l'ouest de la cellule courante ;
3. une fonction d'évolution $Evolution_n^{t+1}$ définie, pour chaque cellule, par l'algorithme 1.

```

if Plus de trois cellules voisines allumées then
  | Je m'allume
end
if Deux cellules voisines allumées then
  | Je ne change pas d'état
end
if Moins de deux cellules voisines allumées then
  | Je m'éteins
end

```

Algorithme 1: Fonction d'évolution du jeu de la vie de J. H. Conway.

Il est important de noter que selon l'initialisation de la grille, c.-à-d., $\forall n, Etat^{t_{init}}(n)$, le réseau n'évoluera pas de manière identique. La force d'un AC réside dans ses règles d'évolution relativement simples faisant apparaître des structures potentiellement complexes. A chaque pas de temps, il est possible d'obtenir une *fonction de transition globale*, notée $Transition^{t+1} : E^{\mathbb{N} \times \mathbb{N}} \rightarrow E^{\mathbb{N} \times \mathbb{N}}$. Plusieurs classes d'automates cellulaires existent et cette fonction de transition globale n'est donc pas toujours déterminable :

- classe I, vers un état fixe et homogène quelle que soit la configuration initiale,
- classe II, vers un état stable périodique,
- classe III, comportement chaotique et succession d'états désordonnés,
- classe IV, dynamique complexe, longues transitions où de nombreuses structures apparaissent et disparaissent.

Une présentation synthétique de ces différentes classes d'automate peut être trouvée dans [129, p. 413-416].

1.5 Conclusion

Dans ce premier chapitre d'introduction, traçant l'évolution d'un axe de pensées *aristo-cartésiano-positivo-scientistes*, section 1.2, la pensée complexe s'est progressivement dessinée, section 1.3. Constatant l'universalité de la complexité, la présentation s'est ensuite tournée vers deux paradigmes spécifiques, SMA et AC – section 1.4 –, permettant la modélisation et la simulation de systèmes complexes pour comprendre et décrire, *en partie*, de tels systèmes.

Mais il s'avère que, lorsqu'une quelconque interaction est souhaitée – p. ex., cas d'un système d'aide à la décision où un étalonnage de paramètres est nécessaire pour rétroagir sur le système ou la simulation –, des paradigmes de représentation, de modélisation et de manipulation des informations ou, du dit *désordre* de la sous-section 1.3.4, apparaissent fondamentaux.

Une importante panoplie de théories permettent de prendre en compte des informations imparfaites, comme la *théorie des fonctions de croyance*, présentée dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Traitement des informations imparfaites et théorie des fonctions de croyance

Sommaire

2.1	Introduction	40
2.2	Fusion d'informations imparfaites	42
2.2.1	Informations imparfaites	42
2.2.2	Fusion d'informations et systèmes de fusion	44
2.3	Théorie des fonctions de croyance et Modèle des Croyances Transférables	45
2.3.1	Introduction	45
2.3.2	Représentation des croyances	46
2.3.3	Manipulation des connaissances	50
2.3.4	Prise de décision	60
2.4	Estimations des fonctions de masse de croyance	62
2.4.1	Contexte	63
2.4.2	Approche fondée sur le calcul de distances	64
2.4.3	Approche fondée sur le calcul de vraisemblances	65
2.4.4	Approches fondées sur des matrices de confusion	66
2.4.5	Autres approches d'estimation	67
2.5	Conclusion	67

2.1 Introduction

Avec la volonté de découverte, d'analyse et de prise en compte de la complexité, la nécessité de traiter les informations, *véhiculées par et issues* des systèmes complexes, a motivé l'utilisation, et donc le développement, de nouvelles théories de traitement des informations imparfaites. Bien que des méthodes numériques modélisant l'imprécision et

l'incertitude⁸⁵ des informations soient nombreuses, la méthode probabiliste demeura sans doute la plus populaire, jusqu'au début du XX^e siècle⁸⁶.

Pourtant, dans l'histoire, dès l'Antiquité, des termes comme *nécessaire*, *possible*, *probable* ainsi que des aspects subjectifs de l'opinion apparurent sporadiquement, jusqu'à certaines formalisations populaires jusqu'au XVIII^e siècle, p. ex., les travaux de Leibniz dans *De Conditionibus* en 1665 ou les travaux de Hooper dans *A calculation of the credibility of human testimony* en 1699. Mais, progressivement, aux XIX^e siècle et débuts du XX^e siècle, les approches probabilistes fréquentiste et bayésienne devinrent dominantes avec « l'essor des sciences physiques [conduisant] à négliger la modélisation du raisonnement humain » [27, p. 270]. Toutefois, « avec la naissance de l'intelligence artificielle, [...], la modélisation du raisonnement humain regagna de l'intérêt et conduisit les chercheurs à revenir à une conception plus subjectiviste des probabilités » [27, p. 271]. C'est ainsi que, des chercheurs, comme *Keynes*, *de Finetti*, *Savage*, etc., s'intéressèrent aux probabilités subjectives. Certains remirent en cause la propriété d'additivité des probabilités et d'autres, comme, *Koopman*, *Good*, et plus tard *A. P. Dempster*, travaillèrent sur des notions de probabilités inférieure et supérieure, ancêtres de la *théorie de l'évidence*.

Cette théorie, aussi nommée *théorie des fonctions de croyance*, fondée sur les travaux de A. P. Dempster en 1967 [66] et formalisée par G. Shafer en 1976 [233], ou de plus récentes interprétations – p. ex., le Modèle de Croyances Transférables (MCT) de Philippe Smets [254] –, est utilisée dans de nombreuses thématiques, comme en classification, aide au diagnostic, contrôle de systèmes, etc. Ce chapitre se concentre donc sur les outils de représentation et de manipulation – p. ex., opérateurs de combinaison – des informations, ainsi que sur les mécanismes de prise de décision, dans le cadre de la théorie des fonctions de croyance.

Dans ce chapitre, commençant par préciser le sens de l'*imperfection* des informations et rappelant la structure générale d'un système de fusion – c.f., section 2.2 – la présentation s'oriente vers le dernier des trois socles de ces travaux, avec les SMA et les AC : la *théorie des fonctions de croyance*, c.f., section 2.3. Le chapitre se termine sur les difficultés relatives à l'estimation des fonctions de masses de croyance, section 2.4.

⁸⁵Ces notions sont détaillées dans la section suivante.

⁸⁶Le paragraphe suivant s'inspire de l'article d'Isabelle Bloch, *Incertitude, imprécision et additivité en fusion de données : point de vue historique* [27], présentant un aperçu historique de l'évolution de la notion de probabilité.

2.2 Fusion d'informations imparfaites

2.2.1 Informations imparfaites

Aucune information observée d'un système ne peut être considérée comme parfaite, il est dit qu'elle est entachée d'incertitude ou d'imperfection. Habituellement, deux principales catégories d'imperfection se distinguent [106] :

- l'*imperfection aléatoire* également nommée *imperfection stochastique*, issue de la variabilité naturelle du phénomène ;
- l'*imperfection épistémique*, fondée sur une connaissance incomplète d'un phénomène.

La première est aisément conceptualisée et modélisable par la théorie des probabilités. En revanche, en ce qui concerne l'imperfection épistémique, de nombreux auteurs ont déjà argumenté sur le recours nécessaire à d'autres théories pour l'élaboration de modèles de représentation intégrant cette ignorance, p. ex., [175], [21]. Ces manques apparaissent lorsque les données d'entrée sont limitées, p. ex., pour des raisons techniques, financières, d'échelle, etc., et laissent apparaître des imprécisions, des conflits, etc.

L'*imperfection épistémique* peut être décomposée en plusieurs catégories et une information pourra être entachée [247, 29] :

- d'*incertitude* : relatif à la vérité de l'information et caractérisant son degré de conformité à la réalité.

Un exemple simpliste en médecine légale où un expert, Gil Grissom, tentant de dater la mort de Pamela Rose, disant « il se pourrait que la victime ait été assassinée le 01 janvier 2010 à 00h01 avec un chandelier » est une information très précise, par contre, l'expression « il se pourrait » indique que l'expert n'est pas certain de ses conclusions.

- d'*imprécision* : concernant le contenu de l'information, relatif à sa précision.

Un cas d'imprécision existerait si notre expert Gil Grissom disait : « il est certain que la victime a été tuée entre le 12 juillet 2009 et le 29 février 2010 ». L'information « entre le 12 juillet 2009 et le 29 février 2010 » est extrêmement imprécise.

- d'*incomplétude* : caractérisant l'absence d'information apportée par la source sur certains aspects du problème.

Ainsi, que Gil Grissom soit incertain ou imprécis sur le moment du décès, ses deux interventions précédentes seraient incomplètes pour répondre à la question « Mais qui a tué Pamela Rose ? ».

- d'*ambiguïté* : exprimant la capacité d'une information de conduire à deux interprétations.

Si l'expert nous indique que la personne était « portée disparue le 31 décembre 2009 à 23h45 », l'information est ambiguë et il semble difficile de

déterminer si Pamela Rose était morte ou vivante quelques minutes après.

- de *conflit* : caractérisant deux ou plusieurs informations entraînant des interprétations contradictoires et incompatibles.

Ainsi si Gil Grissom affirme finalement que P. Rose est tout de même décédée « le 01 janvier 2010 à 00h01 avec un chandelier » mais que Damien Charabidze, arrivant sur la scène de crime, atteste que « Pamela Rose est encore en vie », alors ces deux informations sont conflictuelles.

Pour poursuivre l'illustration des notions d'imperfections stochastique ou épistémique, de nombreux exemples de la littérature ont été présentés ayant pour finalité la valorisation de théories alternatives aux probabilités, p. ex., l'exemple de Philippe Smets remettant en cause la contrainte d'additivité [241], ou celui de Glenn Shafer, critiquant le principe du maximum d'entropie [233], repris par Didier Dubois [27, p. 277].

Dans ce premier exemple, ici simplifié, P. Smets fait référence à la problématique symptôme/pathologie. Soit l'hypothèse qu'un symptôme s est toujours présent quand un patient a une pathologie A . Si ce symptôme s est observé, alors la probabilité pour que le patient ait la pathologie A augmente. La contrainte d'additivité impose aussi que la probabilité de ne pas avoir A diminue. Aucune raison ne justifie pourtant cette idée, surtout si s peut être observé dans d'autres pathologies. Le modèle probabiliste semble trop simpliste pour un tel problème⁸⁷. Cette problématique, associée aux difficultés relatives au théorème de Bayes – c.-à-d., nécessité de connaître l'ensemble des pathologies ou disposition de statistiques reliant les observations s à \bar{A} – inciterait à s'orienter vers des théories parallèles pour passer outre ces limites probabilistes.

L'exemple de D. Dubois vise, quant à lui, à démontrer la difficulté à modéliser l'absence de connaissances, en essayant de déterminer la probabilité qu'il y ait de la vie sur la planète Sirius. Classiquement en probabilité, l'égalité suivante serait posée : $p(vie) = p(pas\ de\ vie) = 0.5$. Mais, si le problème était posé autrement, en supposant qu'il puisse y avoir trois possibilités : *vie végétale*, *vie animale* ou *pas de vie*, l'expression de l'ignorance conduirait à considérer des probabilités égales à $\frac{1}{3}$ pour chacune des hypothèses. Ainsi, dans ce cas à trois hypothèses, $p(vie)$ serait égale à $\frac{2}{3}$. De manière identique, on pourrait donc obtenir autant de valeurs différentes que de manières de considérer le problème. Ce genre de problématiques est récurrent en probabilité, en particulier, lorsque les décisions doivent être prises à partir de données imparfaites. Un exemple similaire a été mis en avant dans [21, p. 20]. En fait, la supposition d'une telle équiprobabilité – p. ex., $p(vie\ végétale) = p(vie\ animale) = p(pas\ de\ vie) = \frac{1}{3}$ – rajoute souvent une information inconnue dans la problématique d'origine : le cadre probabiliste confond les deux imperfections, la variabilité et l'ignorance. La question donc de la cohérence de la représentation se pose alors et des théories, plus récentes, sembleraient pouvoir répondre à de telles problématiques, avec l'utilisation de familles de probabilités.

⁸⁷Comme le fait remarquer [27, p. 276], c.f., les paradoxes de Hempel ou Goodman.

Ainsi, diverses théories, comme la théorie des possibilités [94], la théorie des paires de probabilités cumulées – *p-box* – [107] ou encore la théorie des fonctions de croyance, pourraient être considérées. Un panorama et une vision globale du positionnement des différentes théories de l'incertain, non détaillées dans ce manuscrit, a été proposé dans [21] et [85].

2.2.2 Fusion d'informations et systèmes de fusion

Lorsqu'une question quant à un système donné est posée à des sources susceptibles d'y répondre, le traitement des informations – et de leurs imperfections – apparaît possible grâce à des procédés de représentation, de manipulation et de fusion d'informations. Isabelle Bloch [29] propose une définition relativement générale de la fusion d'informations :

Définition 3. *La fusion d'informations consiste à combiner des informations hétérogènes issues de plusieurs sources afin d'améliorer la prise de décision.*

Pour compléter cette définition, l'auteur remarque qu'un système de fusion peut être décomposé en quatre étapes principales :

1. la **modélisation** : choix de la théorie/formalisme et des expressions des informations à fusionner ;
2. l'**estimation** : spécification et définition du passage de l'information brute fournie par les sources à l'information modélisée, traitée ;
3. la **manipulation** : comprenant la combinaison – avec le choix de l'opérateur compatible avec le formalisme retenu – et différents outils de manipulation, p. ex., permettant de répondre à des questions subsidiaires ou d'intégrer des méta-informations ;
4. la **décision** : dernière étape de la fusion nécessaire pour prendre une décision et répondre à la question initiale.

Dans plusieurs domaines et avec différentes théories, de très nombreux systèmes de fusion, basés sur de telles architectures, plus ou moins améliorées, ont apporté des résultats intéressants, p. ex., [16, 180, 298]. Une formalisation de classes de systèmes de fusion a été proposée dans [150].

Les quatre points précédents sont tous essentiels à l'élaboration d'un système de fusion. Chronologiquement, la question du choix de la théorie s'impose en premier lieu. Comme rappelé dans [175, p. 21], de nombreux travaux ont été consacrés au comparatif des théories de l'incertain et « il apparaît pourtant bien difficile de conclure sur la supériorité de l'une ou l'autre des théories ». Il pourrait même être affirmé que toute théorie est susceptible de répondre à toute problématique, l'intuitivité ou la simplicité de mise en œuvre, relatives à l'application et au modélisateur, pouvant varier tout en fournissant des résultats tout aussi identiques.

La *théorie des fonctions de croyance*, généralisant les théories des probabilités et des possibilités – c.-à-d., permettant donc la prise en compte des différents types d'imperfec-

tion – et offrant un cadre formel et intuitif, a été choisie pour ces travaux. Ci-dessous, cette théorie est présentée et les notions antérieurement citées seront réutilisées.

2.3 Théorie des fonctions de croyance et Modèle des Croyances Transférables

2.3.1 Introduction

Déjà, dans la littérature des *XVII^e* et *XVIII^e* siècles, la notion de non-additivité des degrés de croyance apparaissaient, c.f., [234, 27, 177]. Ce n'est que bien plus tard, à partir de 1967, qu'Arthur P. Dempster, dans le cadre de ses travaux sur les probabilités inférieure et supérieure et sur la généralisation de l'inférence bayésienne [66, 67], amorça ce qui allait devenir la théorie des fonctions de croyance. En effet, ces travaux, repris et formulés, donnèrent naissance au célèbre livre *A mathematical theory of evidence* [233] de Glenn Shafer. Ce dernier y montre alors l'intérêt des fonctions de croyance pour la modélisation de connaissances incertaines. Démocratisée, la théorie – prenant aussi, à partir des années 1980, les noms de *théorie de Dempster-Shafer* et de *théorie des fonctions de croyance* – fut appliquée en *intelligence artificielle* puis mise en œuvre dans de très nombreux domaines : optimisation, décision multi-critères, classification, diagnostic, biologie, aide à la décision, monitoring, fusion multi-capteurs, robotique, détection et suivi de cibles, etc. Un large panorama, datant de 2002 mais restant pourtant une référence en mettant en avant aussi l'influence de la théorie, a été envisagé dans [232, Annexes].

Plusieurs interprétations – p. ex., le *modèle des Hints* de J. Kohlas et P. A. Monney [148], le *Modèle des Croyances Transférables* (MCT) [254, 248]⁸⁸ de P. Smets – ou extensions de la théorie initiale – p. ex., la *théorie du raisonnement plausible et paradoxale de Dezert-Smarandache* (DSmT) [87] – ont été proposées.

Le MCT⁸⁹ constitue une interprétation subjective et non-probabiliste de la théorie des fonctions de croyance. Axiomatisé et mathématiquement justifié [246], ce modèle suppose l'existence de plusieurs *mondes* possibles Ω dont seul l'un d'entre eux ω_n correspond au monde réel. Un agent, p. ex., un robot, un expert, un capteur, etc., nommé *Ag*, ignore le monde courant mais demeure capable d'exprimer ses croyances sur celui-ci. Le degré de cette croyance est exprimé par un nombre réel compris entre 0 et 1 et représenté par une *fonction de crédibilité* $bel_{Ag}(\omega_n)$. Le MCT se base sur l'hypothèse que le raisonnement de l'agent en charge de la décision peut être décomposé en deux niveaux :

- le niveau *crédal* où les informations sont représentées et manipulées ;
- le niveau *pignistique* où les croyances sont utilisées pour la prise de décision⁹⁰.

⁸⁸Une grande partie des travaux de Philippe Smets est toujours accessible sur sa page Internet et représente une base bibliographique importante pour le MCT et la théorie des fonctions de croyance en général : <http://iridia.ulb.ac.be/~psmets/AABPapers.html>.

⁸⁹En anglais, l'acronyme employé est TBM pour *Transferable Belief Model*.

⁹⁰Ces notations se réfèrent à des mots latins : *credo* pour *je crois* et *pignus* pour *un pari*.

Sans prendre entièrement le parti du MCT, puisque la présentation sera régulièrement élargie, celle-ci sera tout de même organisée en trois sous-section : la représentation des croyances, la manipulation des croyances, la prise de décision.

2.3.2 Représentation des croyances

2.3.2.1 Fonction de masse et définitions associées

Soit Ω , appelé *cadre de discernement* ou *univers*, l'ensemble fini des N solutions possibles à une question Q posée :

$$\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n, \dots, \omega_N\}. \quad (2.1)$$

A partir de ce cadre de discernement, l'ensemble des parties de Ω peut ainsi être défini, composé des 2^N propositions A de Ω :

$$2^\Omega = \{A | A \subseteq \Omega\}. \quad (2.2)$$

Cet ensemble 2^Ω contient toutes les hypothèses singletons de Ω , toutes les disjonctions possibles de ces hypothèses et l'ensemble vide $\{\emptyset\}$.

La connaissance détenue par un agent Ag quant à la réponse à la question Q , à l'instant t , sachant un ensemble d'informations préalables, appelé *corpus d'évidences* et noté EC , peut être quantifiée par une *fonction de masse*⁹¹ définie sur 2^Ω , à valeur dans $[0, 1]$ et vérifiant la condition suivante :

$$\sum_{A \subseteq \Omega} m_{Ag,t}^\Omega\{Q\}[EC](A) = 1. \quad (2.3)$$

La notation complète, issue de [177, p. 16], donnée dans l'équation 2.3 pourra être simplifiée en m_{Ag}^Ω , m_{Ag} , m^Ω ou simplement m si aucune ambiguïté ne vient perturber la compréhension. Ainsi, la quantité $m(A)$ représente la part de croyance en la proposition « la solution à la question Q appartient à l'ensemble A » – et à aucun autre sous-ensemble plus spécifique de A .

A partir de ces premières équations, il est possible de lister une série de définitions essentielles dans la théorie des fonctions de croyance :

Définition 4 (Éléments focaux). *Tout sous-ensemble $A \subseteq \Omega$ tel que $m(A) \neq 0$ est appelé élément focal de m . L'ensemble des K éléments focaux de m est noté $F(m) = \{F_1(m), F_2(m), \dots, F_K(m)\}$ et l'union des éléments focaux de m est appelé noyau de m .*

Définition 5 (Fonction de masse catégorique). *Une fonction de masse est dite catégorique si $|F(m)| = 1$, avec $|F(m)|$, le cardinal de $F(m)$, c.-à-d., si $\exists A \subseteq \Omega$ tq. $m(A) = 1$ et $\forall B \neq A \subseteq \Omega$, $m(B) = 0$.*

⁹¹En anglais, on parle de *basic belief assignment* ou *bba* pour désigner une fonction de masse.

Définition 6 (Fonction de masse normale). Une fonction de masse est normale si $m(\emptyset) = 0$. Dans le cas contraire, la fonction de masse est appelée sous-normale. Le passage d'une masse sous-normale m à une masse normale $*m$ peut être effectué par une opération de normalisation :

$$\begin{aligned} *m(A) &= \frac{m(A)}{1-m(\emptyset)}, \quad \forall A \subseteq \Omega, A \neq \emptyset, \\ *m(\emptyset) &= 0. \end{aligned} \quad (2.4)$$

La condition $m(\emptyset) = 0$ était imposée dans le modèle initial de G. Shafer mais levée dans le MCT de P. Smets. Dans le MCT, la notion de monde ouvert a été introduite grâce à l'existence de la condition $m(\emptyset) \neq 0$. Dans ce cas, l'ensemble vide peut être interprété comme une hypothèse de rejet, suggérant que la réponse à la question peut ne pas appartenir au cadre de discernement Ω . L'hypothèse du monde ouvert est opposée à celle du monde fermé, du modèle de G. Shafer, où l'ensemble Ω est supposé être exhaustif. Nous discuterons de la masse sur le vide lors de la présentation des opérateurs de combinaison.

Définition 7 (Fonction de masse vide). L'unique élément focal d'une fonction de masse vide est Ω . Un état de croyance où seul l'ensemble Ω est élément focal correspond à l'ignorance totale, c.-à-d., la source est certaine que la solution à la question est dans Ω mais est totalement imprécise et incapable de les distinguer.

Définition 8 (Fonction de masse dogmatique). Une fonction de masse est dogmatique lorsque la proposition Ω n'est pas un élément focal, c.-à-d., $m(\Omega) = 0$.

Définition 9 (Fonction de masse simple). Il y existe au plus deux éléments focaux dont Ω . La fonction de masse est donc non-dogmatique. Ainsi, $\forall \omega \in [0, 1]^{92}$:

$$\begin{aligned} m(A) &= 1 - \omega, \quad A \subset \Omega, \\ m(\Omega) &= \omega, \\ m(B) &= 0, \quad B \neq A \subset \Omega. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Dans la littérature, une fonction de masse simple⁹³ est habituellement notée A^ω . La fonction de masse vide, avec cette notation, s'exprime par : A^1 , $\forall A \subset \Omega$ et la fonction de masse catégorique, par : A^0 , $\forall A \neq \Omega$.

Définition 10 (Fonction de masse bayésienne). Une fonction de masse est dite bayésienne si et seulement si tous ses éléments focaux sont des singletons de Ω , c.-à-d., $\forall A \in F(m), |A| = 1$, où $|A|$, le cardinal de la proposition A . La fonction de masse m peut alors être assimilée à une distribution de probabilité.

⁹²Dans la suite de la présentation, le lecteur devra différencier la notation ω – c.-à-d., utilisée pour désigner une hypothèse du cadre de discernement Ω , p. ex., $\omega_n \in \Omega$ – et la notation ω – c.-à-d., utilisée pour représenter une *fonction de poids, weight function* en anglais, définie dans la sous-section 2.3.3. Ces deux notations, même si pouvant parfois prêter à confusion, sont courantes dans la littérature des fonctions de croyance.

⁹³En anglais, les expressions *simple support functions* (SSF) ou *simple basic belief assignment* (SBBA) sont utilisées.

Définition 11 (Fonction de masse consonante). Une fonction de masse est consonante si tous ses éléments focaux sont emboîtés, c'est-à-dire, s'il existe une permutation σ telle que les éléments focaux sont linéairement ordonnés par l'inclusion : $F_{\sigma(1)} \subset F_{\sigma(2)}, \dots, F_{\sigma(K)}$. Les fonctions consonantes ont des propriétés communes avec les distributions de possibilités.

Définition 12 (Complémentaire d'une fonction de masse). Le complémentaire \bar{m} d'une fonction de masse m est défini par [92] : $\bar{m}(A) = m(\bar{A}), \forall A \subseteq \Omega$, où \bar{A} représente le complémentaire de la proposition A .

2.3.2.2 Autres structures de croyance

Par l'application de la *transformée de Möbius* [145, 115], une fonction de masse m est en correspondance biunivoque avec les fonctions suivantes :

$$\begin{aligned}
 (\text{fonction de crédibilité}) \quad & bel(A) = \sum_{B: \emptyset \neq B \subseteq A} m(B), \\
 (\text{fonction de plausibilité}) \quad & pl(A) = \sum_{B: B \cap A \neq \emptyset} m(B), \\
 (\text{fonction de communalité}) \quad & q(A) = \sum_{B: B \supseteq A} m(B), \\
 (\text{fonction d'implicabilité}) \quad & b(A) = \sum_{B: B \subseteq A} m(B).
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

L'ensemble de ces fonctions représente la même information sous une forme différente. La quantité $bel(A)$ représente la part minimale de croyance, justifiée et spécifique, allouée par une source à la proposition A : *justifiée* car seuls les sous-ensembles de A sont pris en considération et *spécifique* parce que la masse du vide $m(\emptyset)$ n'y est pas incluse.

La valeur $pl(A)$ représente la part maximale de croyance qui pourrait soutenir la proposition A si de nouvelles informations devenaient disponibles.

Pour ces deux fonctions bel et pl , issues d'une même fonction de croyance, et pour deux propositions $A, B \subseteq \Omega$, les relations suivantes peuvent être démontrées :

$$bel(A \cup B) \geq bel(A) + bel(B) - bel(A \cap B), \tag{2.7}$$

$$pl(A \cap B) \leq pl(A) + pl(B) - pl(A \cup B), \tag{2.8}$$

$$0 \leq bel(A) \leq pl(A) \leq 1, \tag{2.9}$$

$$bel(A) + pl(\bar{A}) = bel(\Omega) = pl(\Omega) = 1. \tag{2.10}$$

Les équations 2.7 et 2.8 correspondent aux propriétés respectivement sur-additive de la crédibilité, et sous-additive de la plausibilité. La valeur $pl(A) - bel(A)$ représente une incertitude relativement à A .

Dans le cadre d'une fonction de masse bayésienne, les fonctions de plausibilité, de crédibilité et de masse coïncident : $\forall A \subseteq \Omega, m(A) = bel(A) = pl(A)$.

Lorsqu'une fonction de masse est consonante, la mesure de crédibilité – *resp.* de plausibilité – est une mesure de nécessité – *resp.* de possibilité. Enfin, lorsqu'une fonction de masse est consonante, $\forall A, B \subseteq \Omega$, l'égalité suivante est connue : $pl(A \cup B) = pl(A) \vee pl(B)$, avec \vee , l'opérateur *maximum*.

D'autres fonctions symétriques existent : pour la crédibilité, l'*incrédulité* – c.-à-d., la *crédibilité du contraire* – ; et pour la plausibilité, le *doute* – c.-à-d., la quantité de masse de croyance restante. La figure 2.1, issue de [162], représente les relations existantes entre ces différentes mesures.

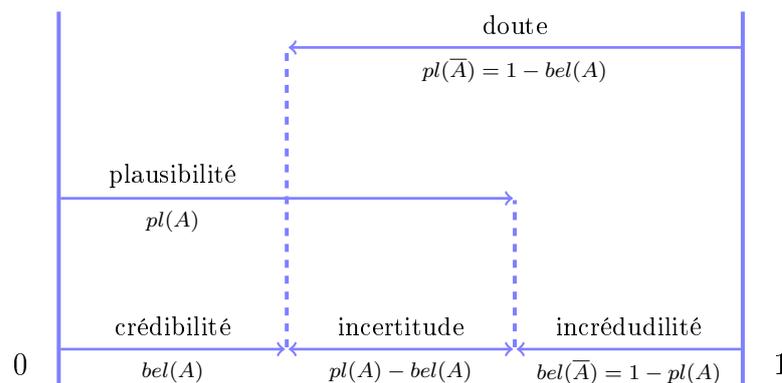


FIG. 2.1 – Représentation des relations entre les différentes mesures, issue de [162].

Les fonctions de communalité et d'implicabilité ont une interprétation symétrique : $b(A)$ représente la somme des masses allouées aux sous-ensembles de A et $q(A)$ représente la somme des masses allouées aux sur-ensembles de A . Ces fonctions jouent principalement un rôle mathématique dans l'usage des fonctions de croyance [177] et peuvent avoir un intérêt pour les combinaisons, comme résumé dans [218]. En application de la définition 12, il est aisé de démontrer que $\bar{b}(A) = q(\bar{A})$, $\forall A \subseteq \Omega$.

Un résumé des différentes transformations est disponible dans [249].

2.3.3 Manipulation des connaissances

2.3.3.1 Combinaison de croyances

La *combinaison* de croyances consiste à élaborer, à l'aide d'un opérateur, une nouvelle croyance à partir d'autres préalablement disponibles. C'est une opération qui a donc pour buts de corriger, compléter ou renforcer les croyances initiales. Cette sous-section se limitera aux quelques opérateurs de combinaison dont des justifications mathématiques, développées dans [253, 74]⁹⁴, auront été apportées. Un panorama d'autres opérateurs est, par exemple, disponible dans [232].

Deux paramètres essentiels seront généralement pris en considération lors du choix de l'opérateur de combinaison : la distinctivité et la fiabilité des sources à combiner. Ainsi, quatre cas seront ici analysés :

- les sources sont *distinctes* et *fiables* ;
- les sources sont *distinctes* et *non fiables* ;
- les sources sont *non distinctes* et *fiables* ;
- les sources sont *non distinctes* et *non fiables*.

Dans les prochains paragraphes, les notions – essentielles lors de la combinaison –, de distinctivité, de fiabilité et de conflit sont introduites.

Distinctivité des sources Le concept de distinctivité des sources⁹⁵ demeure encore une problématique d'ordre relativement « philosophique » [232, p. 15], même si de nombreuses formalisations ont déjà été proposées, c.f., [243, 25, 86, 54]. Deux sources m_1, m_2 , peuvent être qualifiées de distinctes si elles ne sont pas « liées » [177, p. 27], c'est-à-dire si elles ne partagent aucune connaissance : $\forall EC_1, EC_2, m_1[EC_1], m_2[EC_2] : \nexists F tq. EC_1 = F(EC_2)$, avec F , une transformation quelconque permettant le passage de EC_1 à EC_2 ⁹⁶.

La difficulté réside en fait dans la caractérisation des *corpus d'évidences* et de la profondeur avec laquelle ils auront été considérés. La distinctivité des sources peut alors être abordée de nombreuses manières. Par exemple, deux journalistes étrangers, couvrant un même conflit, peuvent-ils être considérés comme :

- distincts, s'ils ont des origines et des cultures différentes ?
- non-distincts, puisqu'ils sont des êtres humains, biologiquement, physiologiquement, etc., identiques ?
- distincts, s'ils n'ont pas fait la même école de journalisme et s'ils n'ont pas les mêmes objectifs ?
- non-distincts, quand ils n'observent pas exactement les mêmes faits ?

⁹⁴C.f., en particulier à ce sujet, les parties 3.2 à 3.4 de l'article de P. Smets [253].

⁹⁵Les termes de dépendances statistique et cognitive – cette dernière dépendance étend la dépendance statistique classique, [244] – sont également utilisés dans la littérature. Même s'il existe des différences de signification, elles sont englobées dans ce paragraphe.

⁹⁶Un développement plus approfondi a été présenté dans [243].

La (non-)distinctivité est en fait *complexe* à établir ; et, comme le précisait A.P. Dempster dans [66], « le sens [même] de cette notion dans la *réalité* est difficile à préciser »⁹⁷. Et, se référant au premier chapitre, il semblerait même illusoire de prétendre l'existence d'une distinctivité dans notre monde. Mais, il n'en demeure pas moins que sa prise en compte – pour une quelconque raison, p. ex., de simplicité –, en particulier, dans le choix de l'opérateur de combinaison, pourrait avoir des conséquences importantes sur les résultats et décisions ultimes, c.f., un exemple comparatif de résultats obtenus par l'utilisation de différents opérateurs considérant ou non la distinctivité, [101].

Fiabilité des sources Aux imperfections des informations – présentées dans la sous-section 2.2.1 – viennent s'adjoindre les imperfections des sources elles-mêmes. Comme rappelé dans [173], deux types de fiabilité peuvent être considérés : la fiabilité d'une source à donner une information sûre – c.-à-d., concept proche de l'incertitude des informations – et la fiabilité d'une source à donner une information – c.-à-d., proche de l'incomplétude. Ces fiabilités peuvent être vues comme des *méta-informations* relatives à la qualité d'une source et être dépendantes du contexte dans lequel celle-ci s'exprime : p. ex., un journaliste politique moins compétent en relatant des faits économiques.

Lorsque la fiabilité est connue, estimée ou mesurée, des méthodes de prise en compte classiques existent, p. ex., utilisation d'un facteur de pondération proportionnel à la fiabilité de la source, c.f., sous-partie 2.3.3.5. Lorsque l'imperfection des sources est avérée mais non quantifiée – souvent parce que non quantifiable –, l'utilisation d'opérateurs dits disjonctifs peut être avantageuse. Pourtant, des contre-parties apparaissent lors de l'utilisation de la disjonction dans la combinaison : à l'extrême, la disjonction amène à choisir l'ensemble des solutions possibles sans permettre une prise de décision adéquate. Une présentation générale de la fiabilité en fusion d'informations a été présentée par [223].

Degré de conflit, $m(\emptyset)$ La définition 6, p. 47, évoquait déjà la notion de *masse sur le vide*, c.-à-d., la masse de croyance allouée à l'ensemble vide : $m(\emptyset)$. Dans le MCT de P. Smets, cette masse caractérise de manière générale le degré de conflit. Elle peut être intrinsèque à la source en caractérisant le degré de conflit interne de celle-ci. Une interprétation associée au concept de monde ouvert – c.f., $m(\emptyset) > 0$ – tiendrait à supposer que le cadre de discernement Ω n'est pas exhaustif et qu'une partie – ou la totalité – des croyances de la source supporte une (des) hypothèse(s) extérieure(s) à Ω . Ainsi, dans le cadre d'un exemple considérant un expert footballistique s'exprimant, sous la forme d'une fonction de masse de croyance, sur le vainqueur potentiel de la coupe du monde 2010. Après le premier tour et les éliminations des équipes d'Italie et de France ; si Ω avait été égal à $\{France, Italie\}$ alors la réponse de l'expert m aurait été de la forme : $m(\emptyset) = 1$.

Lorsqu'est abordée la combinaison d'informations, et en particulier lorsque deux sources sont combinées conjonctivement, peut également apparaître une masse sur vide. Cette masse peut avoir plusieurs origines, selon les opérateurs utilisés, en plus de la possible non-exhaustivité [253] : les sources ne sont pas distinctes et/ou ne sont pas fiables, ou

⁹⁷Cette phrase, traduite de l'anglais dans ce mémoire, a été rapportée par [74, c.f., introduction].

bien elles ne répondent pas exactement à la même question – p. ex., en ne regardant pas le bon objet pour répondre à la question. De plus, les propriétés mathématiques de certains opérateurs, comme la *non-idempotence*⁹⁸, peuvent aussi être à l'origine d'une augmentation de la masse sur le vide. C'est en partant de ce constat, pour les opérateurs non-idempotents, que Martin *et al.* [174] ont caractérisé un conflit issu de la combinaison d'une fonction de masse avec elle-même, nommé *auto-conflit*, le différenciant du *conflit général*. Un point important des paragraphes suivants concernera le traitement du conflit proposé par les différents opérateurs de combinaison.

2.3.3.2 Combinaison de sources distinctes...

... et fiables Lorsque les sources à combiner sont distinctes et fiables, deux principaux opérateurs peuvent être considérés⁹⁹. Ainsi, deux sources indépendantes, Ag_1 et Ag_2 , fournissent chacune leurs croyances par rapport à une problématique Q commune, sous forme de fonctions de masse de croyance : m_{Ag_1} et m_{Ag_2} . La croyance finale peut résulter d'une combinaison conjonctive des fonctions de masse. Dans cette catégorie, ressortent :

- la *règle de combinaison conjonctive*, également appelée *règle de combinaison conjonctive non-normalisée* ou *règle de combinaison conjonctive du MCT* [242], donnée par l'équation suivante :

$$m_{Ag_1 \odot Ag_2}(C) = \sum_{A \cap B = C} m_{Ag_1}(A) \cdot m_{Ag_2}(B), \quad \forall C \subseteq \Omega ; \quad (2.11)$$

- la *règle de combinaison conjonctive normalisée*, aussi nommée *règle de combinaison conjonctive de Demspter* [233, chap. 3, p. 60] :

$$m_{Ag_1 \oplus Ag_2}(C) = \begin{cases} \frac{m_{Ag_1 \odot Ag_2}(C)}{1 - m_{Ag_1 \odot Ag_2}(\emptyset)} & \forall C \subseteq \Omega, C \neq \emptyset ; \\ 0 & \text{si } C = \emptyset. \end{cases} \quad (2.12)$$

Dans l'équation 2.12, le facteur $(1 - m_{Ag_1 \odot Ag_2}(\emptyset))^{-1}$ permet la normalisation et consiste à répartir le conflit global de manière uniforme lors de la combinaison. Un tel opérateur est intéressant dans le cas d'un monde fermé avéré et lorsque les deux sources ne sont pas en conflit total, c.-à-d., $m_{Ag_1 \odot Ag_2}(\emptyset) < 1$. L'opérateur \oplus admet un élément absorbant : la fonction de certitude totale ; c.-à-d., $m_{Ag_1 \oplus Ag_2} = m_{Ag_2}$ si $m_{Ag_2}(\{\omega_n\}) = 1^{100}$.

⁹⁸Rappel : une fonction $f : E \rightarrow E$ est idempotente si $f \circ f = f$. Dans ce contexte, la propriété d'idempotence d'un opérateur de combinaison est avérée lorsque la combinaison de deux fonctions de masse m totalement identiques fournit une fonction de masse m exactement identique aux deux initiales.

⁹⁹Pour des raisons de simplicité de présentation, ainsi que pour rester en accord avec les travaux réalisés, cette sous-section n'abordera pas les travaux relatifs aux *règles de combinaison répartissant le conflit partiel* initialement proposées dans le *DSmT*, p. ex., *règle PCR5*, *règle PCR6* ; c.f., les travaux de Arnaud Martin [173].

¹⁰⁰C'est-à-dire, si la source m_{Ag_2} est totalement précise et certaine, en mettant toute sa masse de croyance sur un unique singleton.

La combinaison conjonctive non-normalisée, eq. 2.11, conserve le conflit – habituellement pour une utilisation ultérieure, c.f., sous-section 2.3.4 présentant la prise de décision. Cette opération est identique au produit des fonctions de communalité q_{Ag_1} et q_{Ag_2} : $q_{Ag_1} \odot_{Ag_2}(A) = q_{Ag_1}(A) \cdot q_{Ag_2}(A)$, $\forall A \subseteq \Omega$.

Ces deux règles conjonctives, réduisant l'incertitude et l'imprécision, jouent un rôle central dans la théorie des fonctions de croyance [74]. Elles présentent des propriétés intéressantes, comme l'associativité et la commutativité. Elles possèdent un élément neutre, la fonction de masse vide, aussi appelée *fonction d'ignorance totale* ; c.-à-d., $m_{Ag_1} \odot m_{Ag_2} = m_{Ag_1}$ si $m_{Ag_2}(\Omega) = 1$ ¹⁰¹.

... et non fiables Dans le cas de sources distinctes mais dont une au moins n'est pas fiables, un troisième opérateur est approprié : l'*opérateur de combinaison disjonctive*, initialement présenté dans [92] et discuté dans [244] :

$$m_{Ag_1} \oplus_{Ag_2}(C) = \sum_{A \cup B = C} m_{Ag_1}(A) \cdot m_{Ag_2}(B), \quad \forall C \subseteq \Omega. \quad (2.13)$$

A même titre que les communalités pour la conjonction, les fonctions d'implicabilité présentent un avantage intéressant dans le calcul de la disjonction, puisque : $b_{Ag_1} \oplus_{Ag_2}(A) = b_{Ag_1}(A) \cdot b_{Ag_2}(A)$, $\forall A \subseteq \Omega$. La règle \oplus possède les mêmes propriétés mathématiques que l'opérateur \odot et dispose également d'un élément neutre : la fonction de conflit total, c.-à-d., $m_{Ag_1} \oplus m_{Ag_2} = m_{Ag_1}$ si $m_{Ag_2}(\emptyset) = 1$.

Comme rappelé dans [173, p. 26], « Cette règle est en pratique peu employée car elle élargit les éléments focaux et perd donc en spécificité », ce qui peut rendre la décision finale difficile.

Enfin, pour conclure la présentation des opérateurs de combinaison pour des sources distinctes, il est intéressant de rappeler la nature duale des opérateurs \odot et \oplus , par l'application des lois de De Morgan, c.f., [92] :

$$\begin{aligned} \overline{m_{Ag_1} \oplus_{Ag_2}(A)} &= \overline{m_{Ag_1}(A)} \odot \overline{m_{Ag_2}(A)}, \quad \forall A \subseteq \Omega, \\ \overline{m_{Ag_1} \odot_{Ag_2}(A)} &= \overline{m_{Ag_1}(A)} \oplus \overline{m_{Ag_2}(A)}, \quad \forall A \subseteq \Omega. \end{aligned} \quad (2.14)$$

2.3.3.3 Combinaison de sources non distinctes

La contrainte de distinctivité des sources, qui peut s'avérer problématique dans des applications courantes – en particulier, dans le cadre de systèmes complexes où les interactions entre les sources peuvent être importantes –, doit être levée pour améliorer la robustesse des opérateurs de combinaison. Cette résolution passe par la mise en place de règles de combinaison idempotentes. Dans la théorie des fonctions de croyance, de telles règles ont déjà été proposées mais celles-ci perdaient alors leur propriété d'associati-

¹⁰¹C.f., définition 7.

tivité¹⁰². Se basant sur la théorie des possibilités et ses opérateurs fondés sur les *t-normes* et *t-conormes* – idempotents et associatifs – ainsi que s'appuyant sur des travaux de P. Smets – sur la décomposition canonique d'une fonction de masse, c.f., *paragraphe suivant* –, T. Denœux [72, 74], a proposé une famille d'opérateurs commutatifs, associatifs et idempotents.

Décomposition canonique conjonctive d'une fonction de masse de croyance
G. Shafer [233, chap. 4 et 5] a défini la notion de *fonction de masse séparable*, comme issue de la combinaison, par l'opérateur de Dempster, de *fonctions de masse simples* – c.f., def. 9. Toute fonction de masse m , normale et non-dogmatique, est ainsi décomposable comme suit :

$$m = \oplus_{\emptyset \neq A \subset \Omega} A^{\omega(A)}, \quad (2.15)$$

avec $\omega(A) \in [0, 1]$, $\forall A \subset \Omega, A \neq \emptyset$. Cette représentation est nommée *décomposition canonique conjonctive de m* .

En se basant sur l'approche de G. Shafer, P. Smets, dans [245], a proposé une généralisation des fonctions de masse de croyance simples. Une fonction de masse simple généralisée est définie par une fonction $\mu : 2^\Omega \rightarrow \mathbb{R}$, vérifiant :

$$\begin{aligned} \mu(A) &= 1 - \omega, & A \subset \Omega, \\ \mu(\Omega) &= \omega, \\ \mu(B) &= 0, & B \neq A \subset \Omega, \end{aligned} \quad (2.16)$$

avec $\omega \in [0, +\infty)$. Lorsque $\omega \leq 1$, la fonction μ est une fonction de masse simple. Lorsque $\omega > 1$, μ ne possède plus les propriétés habituelles d'une fonction de masse de croyance et est appelée *fonction de masse simple inverse*. Comme discuté dans [245], alors que pour une fonction de masse simple, notée A^ω , le poids ω représente l'état de croyance « il y a certaines raisons de croire en la proposition A », une fonction de masse simple inverse caractérise l'état de croyance « il y a certaines raisons de ne pas croire en la proposition A » et peut être notée : $A^{\frac{1}{\omega}}$. Pour plus d'informations sur l'intérêt d'une telle représentation, le lecteur est invité à se référer à [245].

Utilisant ce concept de fonction de masse simple inverse et généralisant la décomposition canonique de G. Shafer, P. Smets a démontré que toute fonction de masse non-dogmatique peut être représentée, de manière unique, comme la combinaison par l'opérateur \odot de fonctions de masse simples inverses :

$$m = \odot_{A \subset \Omega} A^{\omega(A)}, \quad (2.17)$$

avec $\omega(A) \in [0, +\infty)$, $\forall A \subset \Omega$. Les poids $\omega(A)$ sont obtenus des fonctions de communalité grâce à l'équation suivante :

$$\omega(A) = \prod_{B: B \supseteq A} q(B)^{(-1)^{|B|-|A|+1}}. \quad (2.18)$$

¹⁰²Le lecteur intéressé pourra se rapprocher des références de [74] pour une vision plus vaste de tels opérateurs.

La fonction de poids conjonctive, $\omega : 2^\Omega \setminus \Omega \longrightarrow (0, +\infty)$, est alors une représentation identique aux fonctions de masse de croyance non-dogmatique m .

De plus, si A^{ω_1} et A^{ω_2} sont deux fonctions de masse simples, leur combinaison par la règle conjonctive \odot est la fonction de masse simple $A^{\omega_1 \cdot \omega_2}$. Alors, grâce aux propriétés de commutativité et d'associativité de l'opérateur \odot , la combinaison de deux fonctions de masse m_1 et m_2 , avec leurs fonctions de poids respectives ω_1 et ω_2 , est donnée par :

$$\begin{aligned} m_1 \odot_2 &= (\odot_{A \subset \Omega} A^{\omega_1(A)}) \odot (\odot_{A \subset \Omega} A^{\omega_2(A)}), \\ m_1 \odot_2 &= \odot_{A \subset \Omega} A^{\omega_1(A) \cdot \omega_2(A)}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Le principe de moindre engagement Le *principe de moindre engagement*, également appelé *principe du minimum d'information*¹⁰³ joue un rôle proche de celui du principe de maximum d'entropie en théorie des probabilités. Ce principe formalise l'idée qu'« il ne faudrait jamais accorder plus d'importance que justifié à tout sous-ensemble de Ω » [244, trad. - p. 8]. Il indique que, sachant deux fonctions de masse m_1 et m_2 – pour lesquelles aucune *méta-information* par rapport aux sources émettrices n'est disponible –, la plus appropriée des deux est la moins informative. Pour déterminer ce niveau d'informativité, il est nécessaire de comparer les contenus informationnels de ces fonctions de masse. Pour cela, différentes notions ordinales ont été définies dans [92] et [74]¹⁰⁴

Ainsi, une fonction de masse de croyance m_2 sera dite moins informative, au sens de la plausibilité, qu'une fonction m_1 , si et seulement si les fonctions de plausibilité respectives sont ordonnées de la sorte : $pl_1(A) \leq pl_2(A)$, $\forall A \subseteq \Omega$. Si la condition précédente est respectée, alors $m_1 \sqsubseteq_{pl} m_2$.

Dernièrement, Thierry Dencœux [74, p. 14] a proposé un arrangement basé sur les fonctions de poids conjonctives. Une fonction de masse de croyance m_2 sera dite moins informative, au sens de la fonction de poids, qu'une fonction m_1 , si et seulement si, les fonctions de poids associées sont ordonnées de la sorte : $\omega_1(A) \leq \omega_2(A)$, $\forall A \in 2^\Omega \setminus \{\Omega\}$. Alors, $m_1 \sqsubseteq_{\omega} m_2$. Il est intéressant de remarquer que, pour deux fonctions de masse non-dogmatiques m_1 et m_2 : $m_1 \sqsubseteq_{\omega} m_2 \Rightarrow m_1 \sqsubseteq_{pl} m_2$.

En application de ce principe de moindre engagement, au sens des fonctions de poids conjonctives, T. Dencœux a montré [74, p. 15] que, sachant deux fonctions de masse m_1 et m_2 – et leurs fonctions de poids respectives, ω_1 et ω_2 –, une fonction de poids conjonctive unique, moins engagée au sens de la fonction de poids existe :

$$\omega_1 \wedge_2 = \omega_1(A) \wedge \omega_2(A), \forall A \subset \Omega, \quad (2.20)$$

où, \wedge correspond à l'opérateur *minimum*.

¹⁰³La traduction anglaise usuelle est *least commitment principle*, LCP.

¹⁰⁴D'autres mesures de l'informativité d'une fonction de masse existent, comme les approches quantitatives des *mesures d'incertitude*, p. ex., la mesure de non-spécificité [93], la mesure de discordance [146]. Pour une fonction de masse m , la mesure de non-spécificité associée à celle-ci peut être obtenue par la formule suivante : $N(m) = \sum_{A \subset \Omega} m(A) \cdot \log_2 |A|$.

Sources non-distinctes et fiables Appliquant les principes et équations évoqués dans les deux précédentes sous-parties, T. Denœux a défini un opérateur de combinaison conjonctif, associatif, commutatif et idempotent, permettant de combiner des sources fiables et non-distinctes. L'opérateur de *combinaison conjonctive prudente* est défini, pour deux fonctions de masse non-dogmatiques m_{Ag_1} et m_{Ag_2} , par l'équation suivante :

$$m_{Ag_1} \textcircled{\wedge} Ag_2 = \textcircled{\cap}_{A \subset \Omega} A^{\omega_{Ag_1}(A)} \wedge \omega_{Ag_2}(A). \quad (2.21)$$

Basée sur le même raisonnement, une version normalisée de cet opérateur prudent a été proposée. Pour deux fonctions de masse m_{Ag_1} et m_{Ag_2} , cet opérateur est donné par l'équation :

$$m_{Ag_1} \textcircled{\wedge}^* Ag_2 = \textcircled{\oplus}_{\emptyset \neq A \subset \Omega} A^{\omega_{Ag_1}(A)} \wedge \omega_{Ag_2}(A). \quad (2.22)$$

Sources non-distinctes et non-fiables Issu du principe de dualité – par la négation – des fonctions de masse non-dogmatiques – c.-à-d., $m(\Omega) > 0$ – et sous-normales – c.-à-d., $m(\emptyset) > 0$ – et de dualité des opérateurs conjonctif et disjonctif – c.f., éq. 2.14 –, il est possible de mettre en avant un opérateur disjonctif dit *hardi*.

Pour cela, en application de cette dualité, on appelle une *fonction de masse simple complémentaire* ou *fonction de poids disjonctive*, toute fonction $\nu : 2^\Omega \rightarrow \mathbb{R}$, vérifiant :

$$\begin{aligned} \nu(A) &= 1 - v, \\ \nu(\emptyset) &= v, \\ \nu(B) &= 0, \quad B \in 2^\Omega \setminus \{A, \emptyset\}, \end{aligned} \quad (2.23)$$

pour $A \neq \emptyset$ et $v \in [0, +\infty)$. La fonction ν est notée A_ν . Le lecteur remarquera alors la dualité suivante : $\nu(A) = \overline{\omega}(\overline{A})$, $\forall A \neq \emptyset$ ¹⁰⁵.

A partir de l'équation précédente, la *décomposition disjonctive canonique* apparaît donc évidente :

$$m = \textcircled{\cup}_{A \neq \emptyset} A_{\nu(A)}. \quad (2.24)$$

Par conséquent, en respectant les principes complémentaires des expressions précédentes, il semble aisé de définir une *fonction de poids disjonctive* :

$$v_1 \textcircled{\vee}_2 = v_1(A) \vee v_2(A), \quad \forall A \in 2^\Omega \setminus \emptyset, \quad (2.25)$$

où, \vee correspond à l'opérateur *maximum*.

La *combinaison disjonctive hardie* de deux fonctions de masse m_{Ag_1} et m_{Ag_2} est donc définie par :

$$m_{Ag_1} \textcircled{\vee} Ag_2 = \textcircled{\cup}_{A \neq \emptyset} A_{\nu_{Ag_1}(A) \vee \nu_{Ag_2}(A)}. \quad (2.26)$$

Ce dernier opérateur permet la combinaison de fonctions de masse non-distinctes et dont une au moins est non-fiable – c.-à-d., sans pouvoir déterminer laquelle des deux l'est.

¹⁰⁵Cette dualité est comparable à la dualité communalité/implicabilité, c.f., éq. 2.3.2.2.

Pour conclure sur ces opérateurs de combinaison idempotents, il n'est pas négligeable de rappeler que, par l'application des lois de De Morgan :

$$\begin{aligned} \overline{m_{Ag_1} \odot_{Ag_2}}(A) &= \overline{m_{Ag_1}}(A) \otimes \overline{m_{Ag_2}}(A), \quad \forall m_{Ag_1}, m_{Ag_2} : m_{Ag_1}(\emptyset) > 0 \text{ et } m_{Ag_2}(\emptyset) > 0, \\ \overline{m_{Ag_1} \otimes_{Ag_2}}(A) &= \overline{m_{Ag_1}}(A) \odot \overline{m_{Ag_2}}(A), \quad \forall m_{Ag_1}, m_{Ag_2} : m_{Ag_1}(\Omega) > 0 \text{ et } m_{Ag_2}(\Omega) > 0. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Pour résumer, à partir de la présentation effectuée dans cette sous-section 2.3.3.1, quatre opérateurs de combinaison principaux sont distingués, c.f. tab. 2.1.

Sources	Toutes fiables	Au moins, une fiable
Distinctes	opérateur conjonctif : \odot	opérateur disjonctif : \otimes
Non distinctes	opérateur conjonctif prudent : \otimes	opérateur disjonctif hardi : \odot

TAB. 2.1 – Les principaux opérateurs de combinaison. Tableau de [74].

2.3.3.4 Grossissement, raffinement

Dans le cadre de la théorie des fonctions de croyance, et du MCT, le choix du cadre de discernement Ω est une étape cruciale à la modélisation du système de fusion [233, chap. 6]. Des opérations permettent ainsi de passer d'un cadre de discernement à un autre et d'exprimer les croyances d'un référentiel Θ , plus *grossier*, à un référentiel plus *fin* Ω , c.f., fig. 2.2.

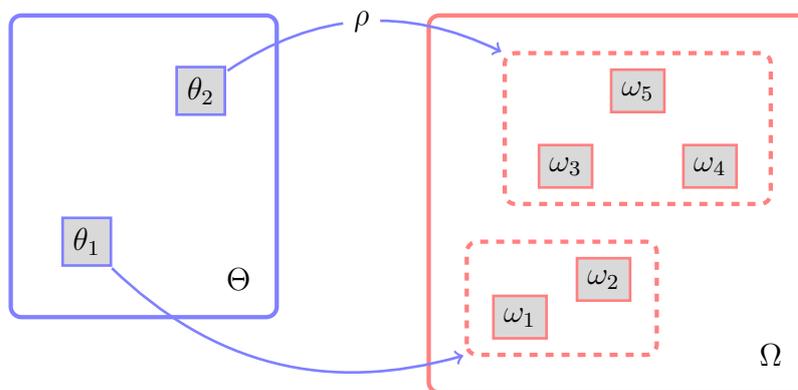


FIG. 2.2 – Grossissement Θ de Ω , avec le raffinement ρ de Θ .

Ainsi, en considérant ces deux cadres Θ et Ω , la fonction ρ , une opération de 2^Θ dans 2^Ω , est appelée raffinement de Θ si :

1. l'ensemble $\{\rho(\{\theta\}), \theta \in \Theta\} \subseteq 2^\Omega$ est une partition de Ω , et
2. pour tout $A \subseteq \Theta : \rho(A) = \bigcup_{\theta \in A} \rho(\{\theta\})$.

A partir de la notion de raffinement et dans le respect du principe de moindre engagement [244, p. 9], c.f., *sous-section 2.3.3.3*, il est possible de définir l'*opération d'extension vide*, caractérisant le passage d'une fonction de masse exprimée sur Θ à une fonction de masse exprimée sur Ω :

$$m^{\Theta \uparrow \Omega}(\rho(A)) = \begin{cases} m^{\Theta}(A), & \forall A \subseteq \Theta, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (2.28)$$

2.3.3.5 Affaiblissement et opérations associées

Opération d'affaiblissement Lorsqu'un agent Ag , en charge de la décision, reçoit une fonction de masse m_S^{Ω} fournie par une source S – p. ex., un capteur –, il est possible qu'il dispose également de *méta-informations* relatives à la *fiabilité* de cette source. Cette méta-information, exprimée à l'aide d'une fonction de masse m_{Ag}^{Ψ} , où $\Psi = \{F, NF\}$, avec F pour *fiable* et NF pour *non-fiable*, peut être de la forme suivante :

$$\begin{cases} m_{Ag}^{\Psi}(\{F\}) & = 1 - \alpha, \\ m_{Ag}^{\Psi}(\{F, NF\}) & = \alpha, \end{cases} \quad (2.29)$$

avec le coefficient $\alpha \in [0, 1]$.

Si la source S est fiable – c.-à-d., $\alpha = 0$ –, l'information donnée par celle-ci devient alors exactement la croyance de l'agent Ag : $m_{Ag}^{\Omega}[\{F\}] = m_S^{\Omega}$. Si S n'est absolument pas fiable – c.-à-d., $\alpha = 1$ –, les informations ne peuvent être prises en compte et la croyance de Ag est une fonction de masse vide : $m_{Ag}^{\Omega}[\{NF\}](\Omega) = 1$.

Plus formellement, la fonction de masse de croyance supportée par Ag , sachant les informations fournies par S et la fiabilité de S – c.-à-d., $m_{Ag}^{\Omega}[m_S^{\Omega}, m_{Ag}^{\Psi}]$, également notée ${}^{\alpha}m_{Ag}^{\Omega}$ –, est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{cases} {}^{\alpha}m_{Ag}^{\Omega}(A) & = (1 - \alpha) \cdot m_S^{\Omega}(A), \quad \forall A \subset \Omega, \\ {}^{\alpha}m_{Ag}^{\Omega}(\Omega) & = (1 - \alpha) \cdot m_S^{\Omega}(\Omega) + \alpha. \end{cases} \quad (2.30)$$

Cette opération, introduite dans [233, chap. 11, p. 251], est nommée *opération d'affaiblissement*¹⁰⁶. L'opération peut être notée ${}^{\alpha}m_{Ag}^{\Omega} = Disc(m_S^{\Omega}(A), \alpha)$ ¹⁰⁷.

¹⁰⁶Les justifications mathématiques de l'équation 2.30 ont été données par la suite dans [244] et l'opération d'affaiblissement, et donc l'obtention de la fonction de masse $m_{Ag}^{\Omega}[m_S^{\Omega}, m_{Ag}^{\Psi}]$, sont élaborées à partir :

1. de l'extension vide – c.f., eq. 2.28 – sur l'espace produit $\Omega \times \Psi$ de m_{Ag}^{Ψ} ,
2. du déconditionnement de $m_{Ag}^{\Omega}[\{F\}]$ sur le même espace,
3. de la combinaison, à l'aide de l'opérateur de combinaison conjonctif, des fonctions de masse obtenues aux étapes (1) et (2),
4. de la marginalisation de la fonction de masse obtenue à l'étape (3) dans Ω .

Les opérations de déconditionnement et de marginalisation ne seront pas précisées dans ce mémoire mais leurs formalisations sont disponibles dans, p. ex., [240, 244, 254].

¹⁰⁷*N.B.*, *Disc* pour *discounting*, signifiant affaiblissement en anglais. Cette notation est utilisée dans le chapitre 4 de la partie suivante.

Récemment, cet opérateur a été étendu dans [183] en *affaiblissement contextuel*. Considérant que, dans certaines applications, l'agent Ag peut disposer d'informations plus précises quant à S , en étant capable de considérer la fiabilité de celle-ci contextuellement à ses observations¹⁰⁸, l'affaiblissement contextuel fait entrer en scène des jeux de masse de la sorte : $m_{Ag}^{\Psi}[\omega_k](\{F\}) = 1 - \alpha_k, \forall \omega_k \in \Omega$. Le lecteur intéressé est invité à se rapprocher des références [183] et [178] pour de plus amples informations relatives à l'affaiblissement contextuel.

Opération de dé-affaiblissement Introduite dans [299, 77], une opération inverse, dite de *dé-affaiblissement*, a été mise en avant pour permettre de retrouver la fonction de masse initiale m_S^{Ω} à partir de la fonction affaiblie ${}^{\alpha}m_{Ag}^{\Omega}$ et du taux d'affaiblissement connu $\alpha < 1$. Elle consiste à retransférer la masse allouée à Ω lors de l'affaiblissement vers les autres éléments focaux :

$$\begin{cases} m_S^{\Omega}(A) &= \frac{{}^{\alpha}m_{Ag}^{\Omega}(A)}{1 - \alpha}, \quad \forall A \subset \Omega, \\ m_S^{\Omega}(\Omega) &= \frac{{}^{\alpha}m_{Ag}^{\Omega}(\Omega) - \alpha}{1 - \alpha}. \end{cases} \quad (2.31)$$

Lorsque le taux α n'est pas connu de l'agent, Dencœux et Smets [77] ont montré qu' Ag peut imaginer toutes les valeurs possibles dans l'intervalle $[0, {}^{\alpha}m_{Ag}^{\Omega}(\Omega)]$, ${}^{\alpha}m_{Ag}^{\Omega}(\Omega)$ étant la plus grande valeur possible permettant d'obtenir une fonction de masse *valide*, c.-à-d., vérifiant encore la contrainte 2.3. Si $\alpha = {}^{\alpha}m_{Ag}^{\Omega}(\Omega)$, la fonction m_S^{Ω} est dite *complètement renforcée*, est notée ${}^{cr}m_S^{\Omega}$ et est donnée par l'équation :

$$\begin{cases} {}^{cr}m_S^{\Omega}(A) &= \frac{{}^{\alpha}m_{Ag}^{\Omega}(A)}{1 - {}^{\alpha}m_{Ag}^{\Omega}(\Omega)}, \quad \forall A \subset \Omega, \\ {}^{cr}m_S^{\Omega}(\Omega) &= 0. \end{cases} \quad (2.32)$$

Opération de renforcement Généralisant le principe de dé-affaiblissement, Mercier *et al.* [181, 182] ont formalisé une opération duale à l'affaiblissement, dite de *renforcement*. Partant d'un principe réciproque à celui du paragraphe 2.3.3.5, il est supposé que l'agent Ag dispose également de *méta-informations* relatives à la *prudence* de la source S . Ces informations, exprimées à l'aide d'une fonction de masse m_{Ag}^{Π} – où $\Pi = \{P, NP\}$, avec P pour *prudente* et NP pour *non-prudente* – peuvent être de la forme suivante :

$$\begin{cases} m_{Ag}^{\Pi}(\{P\}) &= 1 - \pi, \\ m_{Ag}^{\Pi}(\{NP\}) &= \pi, \end{cases} \quad (2.33)$$

avec le coefficient $\pi \in [0, 1]$.

Si la source S est jugée prudente – c.-à-d., $\pi = 0$ –, l'information peut alors être renforcée : $m_{Ag}^{\Omega}[\{P\}] = {}^{cr}m_S^{\Omega}$. Si en revanche, S n'est pas considérée prudente – c.-à-d., $\pi = 1$ –, l'agent Ag considère les données de la source sans aucune correction : $m_{Ag}^{\Omega}[\{NP\}] = m_S^{\Omega}$.

¹⁰⁸Dans [178], l'auteur introduit l'exemple d'un système de détection de cibles, composé de capteurs aptes à reconnaître certains types de cibles et moins efficaces pour d'autres.

De manière totalement réciproque, la fonction de masse de croyance supportée par Ag , sachant les informations fournies par S et les informations relatives à la prudence de S – c.-à-d., $m_{Ag}^\Omega[m_S^\Omega, m_{Ag}^\Pi]$, aussi notée πm_{Ag}^Ω , est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{cases} \pi m_{Ag}^\Omega(A) &= \left(\frac{1-\pi}{1-m_S^\Omega(\Omega)} + \pi \right) \cdot m_S^\Omega(A), \quad \forall A \subset \Omega, \\ \pi m_{Ag}^\Omega(\Omega) &= \pi \cdot m_S^\Omega(\Omega). \end{cases} \quad (2.34)$$

Les justifications mathématiques de l'équation 2.34, au même titre que celles proposées par [244] pour l'affaiblissement, ont été apportées dans [181]¹⁰⁹.

2.3.4 Prise de décision

Seuls la représentation et les mécanismes de manipulation des fonctions de croyance ont été, jusqu'à présent, détaillés. La dernière étape nécessaire est celle de la prise de décision. L'idée essentielle du modèle des croyances transférables de P. Smets consiste alors à se baser sur des *principes de rationalité* pour choisir l'action minimisant le coût espéré – ou, de manière identique, maximisant l'utilité espérée. Des travaux abondants et détaillés existent à ce sujet au sein de la *théorie de la décision*, p. ex., [229, 65]. Alors que dans la partie *crédale*, l'agent Ag exprimait ses croyances sur l'état du monde, dans la partie *pignistique*, il cherche maintenant à agir ou à prendre une décision en fonction de ses croyances.

Dans le contexte de la théorie de la décision, un *cadre de pari* correspond à l'ensemble des actions possibles à effectuer et est noté : $\Gamma = \{\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_i, \dots, \gamma_I\}$. Chaque action γ_i induit un coût en fonction de l'état réel du monde : si l'agent choisit γ_i alors que la réalité est ω_n , il encourt un coût de $\lambda(\gamma_i|\omega_n)$. Si une distribution de probabilité P sur l'état du monde est disponible, le risque espéré d'une action γ_i , relativement à la probabilité P , est défini de la manière suivante :

$$R(\gamma_i) = \sum_{\omega_n \in \Omega} \lambda(\gamma_i|\omega_n)P(\omega_n). \quad (2.35)$$

Formellement, la règle de décision bayésienne consiste donc à choisir l'action γ_i^* minimisant le risque espéré :

$$\gamma_i^* = \arg \min_{\gamma_i \in \Gamma} R(\gamma_i). \quad (2.36)$$

2.3.4.1 Transformation pignistique

Jusqu'à présent, les croyances sont modélisées sous la forme de fonctions de croyance. Pourtant, pour prendre une décision basée sur les axiomes de la théorie de la décision statistique, ces croyances doivent être *transformées* en une mesure de probabilité. Dans [254], la solution proposée s'appuie sur la *transformation pignistique* d'une fonction de masse

¹⁰⁹Il est intéressant de remarquer que l'auteur y propose aussi une généralisation de la prise en compte de l'affaiblissement et de la prudence dans une unique opération, c.f., [181, p. 6].

m en une distribution de probabilité – dite *pignistique* – définie sur Ω , notée $BetP^\Omega$ et exprimée par :

$$BetP^\Omega(\omega_n) = \frac{1}{1 - m(\emptyset)} \sum_{A \ni \omega_n} \frac{m(A)}{|A|}, \quad (2.37)$$

où $|A|$ est la cardinalité de l'ensemble $A \subseteq \Omega$. Cette transformation vise :

- dans un premier temps, à répartir le conflit équitablement sur l'ensemble des singletons de Ω , c.f., le facteur $(1 - m(\emptyset))^{-1}$;
- dans un second temps, à répartir la masse des disjonctions $A \subseteq \Omega$ sur les singletons qui les composent, proportionnellement à leur cardinalité.

Cette transformation se justifie essentiellement à partir de l'axiome de linéarité de la transformation pignistique par rapport à la fonction de masse [252]. Ainsi, pour prendre une décision *rationnelle* dans le cadre du MCT, il suffit donc de remplacer P par $BetP^\Omega$ dans l'équation 2.35. L'équation 2.36 représente alors la minimisation du *risque pignistique*.

Habituellement, dans la théorie des fonctions de croyance et ses applications, une action $\gamma_i \in \Gamma$ est associée à une unique hypothèse $\omega_n \in \Omega$, avec $I = N$, c.-à-d., le cadre de pari est identique au cadre de discernement¹¹⁰. Dans le cas où $\Gamma = \Omega$ et lorsque les coûts $\lambda(\omega_i|\omega_n)$ valent 1 en cas d'erreur – c.-à-d., $i \neq n$ – et 0 en cas de réponse correcte – c.-à-d., $i = n$ –, la minimisation du risque pignistique est équivalent à la maximisation de la probabilité pignistique et la meilleure hypothèse $\omega_n^{BetP^\Omega} \in \Omega$ est obtenue par :

$$\omega_n^{BetP^\Omega} = \arg \max_{\omega_n \in \Omega} BetP^\Omega(\omega_n). \quad (2.38)$$

2.3.4.2 Autres procédés de décision

La transformation pignistique – et par conséquent, la minimisation du risque pignistique – est l'une des méthodes de décision la plus populaire [173, *intro.*, p. 4] des fonctions de croyance et du MCT. Son aspect « naturel » [252, p. 3] et ses justifications [250, 252] n'y sont bien sûr pas étrangers. Mais, d'autres principes de décision ont vu le jour.

Maximisation de la crédibilité ou de la plausibilité Parmi ces méthodes alternatives, la sélection de l'hypothèse la plus crédible, $\omega_n^{Bel^\Omega} = \arg \max_{\omega_n \in \Omega} Bel^\Omega(\omega_n)$, ou la plus plausible, $\omega_n^{Pl^\Omega} = \arg \max_{\omega_n \in \Omega} Pl^\Omega(\omega_n)$, a été proposée. Ce dernier critère est d'ailleurs préconisé dans [6]. Un comparatif entre maxima de probabilité pignistique et de plausibilité a été proposé dans [205].

Risques inférieur et supérieur De plus, outre le risque pignistique, d'autres définitions du risque ont déjà été employées. Ainsi, la définition d'enveloppes de croyances

¹¹⁰Le cadre de pari Γ pourrait également être un grossissement ou un raffinement – c.f., sous-partie 2.3.3.4 – du cadre de discernement Ω .

inférieure et supérieure, respectivement représentées par la crédibilité et la plausibilité – c.f., fig. 2.1, p. 49 –, amènent à la construction de risques inférieur et supérieur entourant le risque pignistique. Ils sont donnés par [71] :

$$R_*(\gamma_i) = \sum_{A \subseteq \Omega} m(A) \min_{\omega_n \in A} \lambda(\gamma_i | \omega_n), \quad (2.39)$$

$$R^*(\gamma_i) = \sum_{A \subseteq \Omega} m(A) \max_{\omega_n \in A} \lambda(\gamma_i | \omega_n). \quad (2.40)$$

La minimisation du risque inférieur donné par l'équation 2.39 correspond à une stratégie dite *optimiste* et inversement, celui de l'équation 2.40 correspond à une stratégie dite *pessimiste*. Il est à noter, dans le cas de coûts $\{0, 1\}$, que la minimisation du risque :

- inférieur revient à une prise de décision basée sur le maximum de plausibilité,
- supérieur revient à une prise de décision basée sur le maximum de crédibilité.

Transformation plausibiliste Une dernière transformation, relativement récente, proposée par [49, 50, 51] et notée PlP^Ω , est donnée par :

$$PlP^\Omega(\omega_n) = \frac{1}{[\sum_{m=1}^N pl(\omega_m)]} pl(\omega_n). \quad (2.41)$$

Les auteurs se basent sur l'invariance par rapport à l'opérateur de combinaison conjonctive \odot pour justifier ce procédé de décision [51, p. 11].

Le choix de la méthode de décision demeure une problématique importante et souvent laissé à l'appréciation du modélisateur. Le lecteur intéressé pourra se tourner vers les articles de [252] et [51] – aux avis contradictoires –, pour un panorama de diverses méthodes proposées dans la littérature ainsi que pour une vision des différentes justifications mathématiques. Dans le cadre du modèle des croyances transférables de P. Smets, le point de vue pignistique est adopté et, souvent, les conditions de l'équation 2.38 sont respectées.

2.4 Estimations des fonctions de masse de croyance

De la section 2.3 précédente, les détails relatifs à l'estimation des fonctions de masse manquent pour caractériser pleinement un système de fusion *évidentiel*^{111, 112}. La question demeure pourtant primordiale : existe-t-il des protocoles génériques pour effectuer le passage des données brutes fournies par une source S à une fonction de masse de croyance m_S^Ω représentant ces informations. La réponse est simple et a déjà été évoquée à de nombreuses reprises : l'estimation est une étape difficile pour laquelle aucune solution universelle n'existe réellement [29, p. 5]. Elle dépend bien souvent de l'application

¹¹¹C.-à-d., basé sur la théorie des fonctions de croyance.

¹¹²N.B., bien que l'estimation soit une des premières étapes à laquelle est confronté un modélisateur, celle-ci, faisant intervenir plusieurs notions de la section précédente, ne pouvait être présentée en début de chapitre.

et de la vision de son modélisateur, p. ex., [120]. Deux principales approches sont tout de même habituellement distinguées dans la littérature : celles fondées sur le calcul de distances [231, 70] et celles fondées sur le calcul de vraisemblances [244, 7].

2.4.1 Contexte

Pour simplifier la présentation des différentes méthodes d'estimation, de manière générale, le contexte suivant sera considéré :

- une source S observe plusieurs paramètres $\{p_1, \dots, p_i, \dots, p_I\} = P$ d'un objet $x_0 \in X$, avec X , un type d'objet ;
- pour chaque paramètre p_i , la source S fournit un coefficient $\delta_i^{S, x_0} \in [0, 1]$ ¹¹³ ;
- un coefficient δ_i^{S, x_0} pourra prendre la valeur 0 lorsque le paramètre p_i n'aura pas été observé sur x_0 . Il prendra la valeur 1 quand le paramètre p_i aura été totalement observé sur x_0 ;
- S fournit donc un vecteur Δ^{S, x_0} dont les I composantes correspondent aux coefficients δ_i^{S, x_0} observés par S ;
- d'autres objets $x_j \in X$, $\forall j \in [1, J]$ peuvent *a posteriori* avoir été déterminés et affectés à une classe $\omega_n \in \Omega$, $\forall n \in [1, N]$, avec N , le nombre de classes possibles. L'ensemble des objets déjà classés est noté Δ et $\forall j \in [1, J], \Delta^{S, x_j} \in \Delta$;
- une base B peut donc être disponible, faisant correspondre les vecteurs Δ^{S, x_j} à des classes ω_n . On note $B : \Delta \longrightarrow \Omega$;
- l'objectif final d'une telle application est qu'un agent Ag puisse répondre, à partir des données fournies par S et de la base B , à la question Q , exprimée sur Ω : *quelle est la classe ω_n de l'objet x_0 ?*
- pour s'affranchir de tout formalisme, on notera $d_{x_0}^\Omega$, la décision finale prise par rapport à la classe ω_n de x_0 .

Exemple 1. *Un exemple simpliste peut permettre d'illustrer cette présentation. Soit un robot S observant un parc de véhicules. S dispose de plusieurs capteurs pour mesurer la longueur, la largeur et la hauteur d'un véhicule. En observant un véhicule x_0 , S fournit un vecteur Δ^{S, x_0} à trois composantes :*

- la longueur, p_1 ;
- la largeur, p_2 ;

¹¹³Dans un cas autre que celui-ci, p. ex., $\delta_i^{S, x_0} \in \mathbb{R}$, une normalisation est envisageable pour revenir dans les conditions de ce contexte *général*.

– la hauteur, p_3 .

S pourrait fournir un vecteur $\Delta^{S,x_0} = \{0.5, 0.5, 0.5\}$ en observant un véhicule de taille moyenne. En se plaçant dans le cadre du modèle de croyances transférables, un agent Ag tente d'exprimer ses croyances sous la forme d'une fonction de masse $m_{Ag}^\Omega[m_S^\Omega[x_0]]$, où, $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$, avec $\omega_1 = \text{coupé}$, $\omega_2 = \text{berline}$ et $\omega_3 = \text{break}$. A partir des informations données par S , Ag répond ainsi à la question Q , exprimée sur Ω : Le véhicule x_0 est-il un coupé, une berline ou un break ?

La figure 2.3 schématise ce contexte. Dans les sous-parties suivantes, des approches d'estimation – c.-à-d., permettant le passage du vecteur Δ^{S,x_0} à une fonction de masse $m_S^\Omega[x_0]$ – sont présentées.

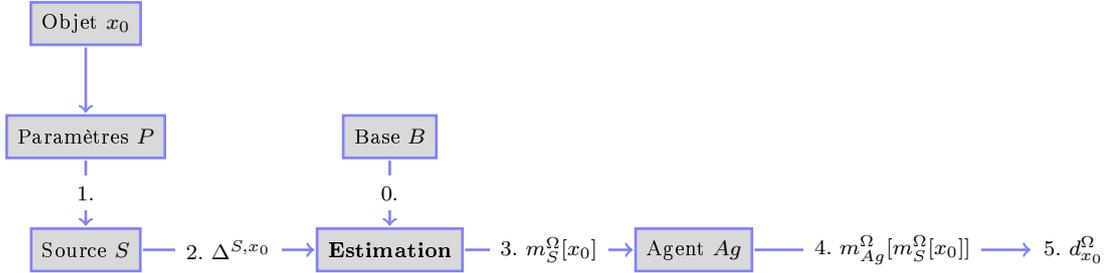


FIG. 2.3 – Positionnement de l'étape d'estimation des fonctions de masse. La décision $d_{x_0}^\Omega$ pourrait être prise à partir d'une transformation pignistique ou de toutes autres méthodes évoquées dans la sous-section 2.3.4.

2.4.2 Approche fondée sur le calcul de distances

Le principe essentiel de cette méthode fondée sur le calcul de distances et proposée par [70], peut se résumer en quelques étapes :

1. prendre de la base B , les objets x_j , $\forall j \in [1, J]$ et leur classe respective $\omega_n, \forall n \in [0, N]$;
2. pour chaque objet $x_j \in [1, J]$ de B et son vecteur Δ^{S,x_j} , construire une fonction de masse de la sorte :

$$\begin{cases} m_{j,i}(\{\omega_n\}) &= \beta_{j,i} \phi_{j,i}(d_{j,i}), \\ m_{j,i}(\Omega) &= 1 - \beta_{j,i} \phi_{j,i}(d_{j,i}), \\ m_{j,i}(A) &= 0, \forall A \in 2^\Omega \setminus \{\Omega, \{\omega_n\}\}, \end{cases} \quad (2.42)$$

où $0 < \beta_{j,i} < 1$ est une constante d'affaiblissement. $\phi_{j,i}(\cdot)$ est une fonction de distance décroissante monotone, vérifiant les conditions suivantes : $\phi_{j,i}(0) = 1$ et $\lim_{d \rightarrow \infty} \phi_{j,i}(d) = 0$. $d_{j,i}$ représente la distance entre la valeur δ_i^{S,x_0} et δ_i^{S,x_j} ¹¹⁴ ;

¹¹⁴Pour de plus amples détails sur cette fonction décroissante, le lecteur est invité à se référer à [70].

3. combiner les I fonctions de masse obtenues de chaque paramètre :

$$m_j = \oplus_{i \in [0, I]} m_{j,i} ; \quad (2.43)$$

4. combiner les J fonctions de masse de chaque objet x_j de la base B :

$$m_S^\Omega[x_0] = \oplus_{j \in [0, J]} m_j. \quad (2.44)$$

A l'origine développée en mettant en valeur l'efficacité des classifieurs évidentiels [70]¹¹⁵, cette méthode d'estimation demeure utilisable dans tout contexte identique à celui présenté dans la sous-partie 2.4.1. Elle présente toutefois un inconvénient majeur : elle aboutit à une fonction $m_S^\Omega[x_0]$ très spécifique – c.f., l'affectation sur le singleton $\{\omega_n\}$ de l'étape 2 –, bien qu'elle permette l'obtention de résultats même lorsque le cadre de discernement est important. Un exemple d'application récent peut être trouvé dans [151].

2.4.3 Approche fondée sur le calcul de vraisemblances

Une autre catégorie de méthodes d'estimation s'inspire d'approches probabilistes présentées dans [7] et [244]. Dans cette sous-partie, seule la méthode fondée sur le premier modèle de [7, p. 5-4] est détaillée¹¹⁶ :

1. prendre de la base B , les objets $x_j, \forall j \in [1, J]$ et leur classe respective :

$$\omega_n, \forall n \in [1, N] ;$$

2. à partir des vecteurs $\Delta^{S, x_j}, \forall j \in [0, J]$ – c.-à-d., en considérant l'objet x_0 –, calculer les vraisemblances :

$$L(\omega_n | p_i) = \prod_j \delta_i^{S, x_j}, \quad \forall \omega_n \in \Omega, \forall p_i \in P \text{ et } \forall x_j \text{ tq. } x_j = x_0 \text{ ou } x_j \in \omega_n ;$$

3. construire les fonctions de masse suivantes :

$$\begin{cases} m_{n,i}(\{\omega_n\}) &= 0, \\ m_{n,i}(\overline{\{\omega_n\}}) &= \beta_{n,i} \cdot [1 - R_i \cdot L(\omega_n | p_i)], \\ m_{n,i}(\Omega) &= 1 - \beta_{n,i} + \beta_{n,i} \cdot R_i \cdot L(\omega_n | p_i), \end{cases} \quad (2.45)$$

où $0 < \beta_{n,i} < 1$ est une constante d'affaiblissement. R_i est un facteur de normalisation tel que $R_i \in [0, (\max_{n \in [1, N]} L(\omega_n | p_i))^{-1}]$;

4. combiner les N fonctions de masse obtenues de chaque classe ω_n :

$$m_i = \oplus_{n \in [0, N]} m_{n,i} ; \quad (2.46)$$

5. combiner les I fonctions de masse de chaque paramètre :

$$m_S^\Omega[x_0] = \oplus_{i \in [0, I]} m_i. \quad (2.47)$$

¹¹⁵Le modèle a depuis été étendu aux problèmes dits *multi-labels*, c.-à-d., pour lesquels les objets x_j peuvent appartenir à plusieurs classes ω_n , p. ex., [294].

¹¹⁶Une présentation plus détaillée a été proposée dans [162, chap. 3].

L'idée de cette méthode repose sur un meilleur respect du principe de moindre engagement – c.f., paragraphe 2.3.3.3 – et permet alors d'acquérir un modèle moins spécifique. Comme montré dans l'éq. 2.45, plus la classe ω_n sera crédible – c.-à-d., $L(\omega_n|p_i)$ élevée –, moins il y aura de masse affectée au complémentaire $\{\bar{\omega}_n\}$, c.-à-d., moins la source croira que l'inverse de $\{\omega_n\}$ est vrai. Cette méthode prudente semble plus appropriée que la précédente, mais, dès lors que la cardinalité de Ω devient importante – c.-à-d., $N > 15$ – la complexité algorithmique élevée empêche le calcul de la fonction de masse $m_S^\Omega[x_0]$. Plusieurs applications récentes se basent sur ce modèle pour construire leurs fonctions de masse, p. ex., [172]. Un comparatif, par une mise en pratique, des deux méthodes fondées sur le calcul des distances et de vraisemblances a été effectué dans [269].

2.4.4 Approches fondées sur des matrices de confusion

De nombreuses autres méthodes d'estimation ont été présentées et mises en œuvre dans la littérature. Les deux méthodes précédentes s'appuyaient sur des données brutes fournies par une source S , dite *de bas niveau*¹¹⁷. La décision finale $d_{x_0}^\Omega$ était prise par un agent Ag extérieur interprétant les données de S .

Certaines applications disposent d'une source S' plus *évoluée*, capable de décider, de manière autonome, de l'appartenance à une classe ω_n d'un objet x_0 . Celle-ci a de plus accès à quelques unes de ses caractéristiques propres : p. ex., son *taux de bonne reconnaissance*, son *taux d'erreur*, son *taux de rejet*. Ces paramètres sont habituellement présents dans une *matrice de confusion*, notée M . La problématique est donc différente et peut être représentée par la figure 2.4.

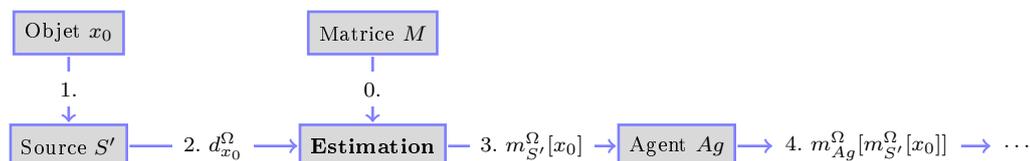


FIG. 2.4 – *Processus d'estimation en présence d'une source S' de plus haut niveau. Il est intéressant de noter qu'une source S' pourrait être décomposée en les différents éléments de la figure 2.3.*

Lorsque le cas de la figure 2.4 est avéré, d'autres méthodes d'estimation sont alors possibles et profitent des informations fournies par la matrice de confusion M . La plus évidente de ces méthodes reste sans doute la méthode d'affectation bayésienne, c.-à-d., attribuant des masses aux singletons. Une telle méthode est envisageable lorsque la matrice de confusion M est assez grande et révélatrice [177, p. 22] mais n'exploite pas toute la *puissance* de la théorie des fonctions de croyance en négligeant les disjonctions.

¹¹⁷C.-à-d., étant capable d'analyser les parties de l'ensemble des paramètres P sans pour autant être apte à déterminer la cohérence du tout et donc dépourvue d'*intelligence* pour effectuer directement le classement de l'objet x_0 observé dans une classe $\omega_n \in \Omega$.

Une autre méthode d'estimation *populaire*, fondée sur la matrice de confusion, a été proposée par [293], son principe est d'affecter de la masse :

- sur le singleton $\{\omega_n\}$, proportionnellement au taux de bonne reconnaissance de S' ,
- sur Ω , proportionnellement au taux de rejet de S' ,
- sur l'ensemble $\Omega \setminus \{\omega_n\}$, proportionnellement au taux d'erreur de S' .

Des illustrations de l'utilisation de la matrice de confusion pour l'estimation de fonctions de masse sont disponibles dans [177, p. 20-24]. Une extension a été proposée dans [179].

2.4.5 Autres approches d'estimation

Différents travaux traitent de l'affectation des masses sur des disjonctions – ou *hypothèses jointes* – pour mieux utiliser les subtilités de la théorie¹¹⁸. Parmi ces méthodes, diverses orientations ont été abordées : les méthodes où une connaissance *a priori* est disponible [28, 271] et celles consistant en l'apprentissage d'éléments focaux composés [186]. Plus récemment, [30] a également introduit l'ajout d'imprécision sur une fonction de masse à l'aide d'opérateurs morphologiques flous. Un panorama des différentes méthodes d'affectation est disponible dans [31, p. 12-14] et [73, *intro.*]. Ce dernier propose une méthode d'estimation de fonctions de croyance à partir de données échantillonnées utilisant des intervalles de confiance de distributions multinomiales.

De plus, certaines méthodes proposent une affectation des masses basée sur l'élicitation¹¹⁹ d'avis d'experts [24] ou sur l'organisation de préférences qualitatives [23]. Enfin, une majorité des travaux proposent des méthodes d'affectation des masses propres aux applications, généralement issues de connaissances empiriques, déterminées à partir de seuils ou d'abaques, p. ex., [126, 274].

2.5 Conclusion

Ce deuxième chapitre de thèse, après une présentation générale de l'imperfection et de la structure d'un système de fusion, était dédié à la théorie des fonctions de croyance et ses principaux outils. De l'estimation – c.f., sous-section 2.4 – à la décision – c.f., sous-section 2.3.4 –, en passant par la manipulation – c.f., sous-section 2.3.3 –, les bases d'un système de fusion évidentiel ont été mises à plat.

La suite de cette thèse s'attache à mettre en relation les paradigmes théoriques évoqués dans le chapitre 1 – c.-à-d., les systèmes multi-agents et les automates cellulaires – et la théorie des fonctions de croyance dans le cadre du développement de systèmes d'aide à la décision pour les systèmes complexes.

¹¹⁸Dans certains travaux, p. ex., [271], l'affectation de masse sur des disjonctions est proposée dans le but de diminuer la complexité algorithmique lors de la combinaison.

¹¹⁹C.-à-d., formalisme et processus permettant d'aider l'expert à formaliser son raisonnement et ses connaissances.

Conclusion

Cette première partie, après avoir retracé l'évolution de la pensée dominante occidentale – section 1.2 –, met en lueur l'universalité de la complexité. Le premier chapitre – section 1.3 – insiste ainsi sur certaines caractéristiques d'un système complexe :

- la présence d'interactions d'un nombre très élevé d'acteurs hétérogènes ;
- l'existence de phénomènes émergents de ces interactions ;
- des connaissances disponibles à différents niveaux du système – qui pris indépendamment ne permettent pas d'expliquer le système global – ;
- la multiplicité des modèles du système d'étude ;
- et les imperfections des informations des systèmes réel et modélisé¹²⁰.

Dans la section 1.4, les systèmes multi-agents (SMA) et les automates cellulaires (AC) sont présentés comme des outils puissants et intéressants pour modéliser et simuler la complexité et prendre en considération les points énoncés ci-dessus. Mais, lorsqu'une quelconque interaction est souhaitée avec le système d'étude, le *désordre* du chapitre 1, devenu *imperfection* au chapitre 2, doit être pris en compte, représenté et manipulé.

C'est dans cette optique que les fonctions de croyance sont introduites et détaillées dans le chapitre 2. Les principaux outils de manipulation – sous-section 2.3.3 – et de décision – sous-section 2.3.4 – de la théorie y sont alors présentés. Certains d'entre eux sont au cœur des travaux ci-après :

- les opérateurs de combinaison conjonctifs – p. 50–57 – ;
- les opérations de changement de cadre de discernement – p. 57 – ;
- l'opération d'affaiblissement – p. 58– ;
- et la transformation pignistique – p. 60.

Le deuxième chapitre achève ainsi la présentation du dernier des trois *socles* de la thèse : SMA, AC et fonctions de croyance. Les parties suivantes mettent en avant les liens possibles entre ces socles ; de manière théorique tout d'abord – partie II – et pratique finalement – partie III.

¹²⁰Les imperfections du système d'étude et de son modèle peuvent avoir des origines différentes. Elles s'expliquent toutes deux par un accès limité aux données – c.f., sous-section 2.2.1 – ; dans le cas du modèle, l'accès limité peut être provoqué par une trop grande complexité algorithmique.

Deuxième partie

Architecture d'un Système Evidentiel Multi-Agents d'Aide à la Décision

Introduction

Au cours de la partie I, deux lignées de travaux ont été abordées : une première, mettant en avant l’omniprésence de la complexité puis une seconde, proposant une solution au traitement des informations des systèmes complexes. Les objectifs de la présente partie sont de révéler au lecteur les liens théoriques des deux précédents chapitres dans le cadre du développement d’un Système Evidentiel d’Aide à la Décision (SEAD) destiné aux systèmes complexes.

Un tel système d’aide à la décision (SAD) ambitionne de fournir des explications, partielles ou totales, d’une observation faite sur un système réel. Pour ce faire, s’inspirant d’un raisonnement de type *abductif*, il vise à déterminer les causes passées expliquant le plus vraisemblablement une observation présente – c.f., section 3.2 du chap. 3.

Le premier chapitre détaille l’architecture générale du SEAD en dévoilant les principaux processus sous-jacents impliqués dans la décision – c.f., section 3.4 du chap. 3. Le chapitre 4 revient plus en détail sur la validation évidentielle et dynamique de simulations orientées agents.

Les présentations de ces deux chapitres sont génériques et théoriques. Une application en entomologie médico-légale est détaillée dans la partie III.

Chapitre 3

Architecture générale d'un Système Evidentiel d'Aide à la Décision

Sommaire

3.1	Introduction	72
3.2	Du système réel	73
3.2.1	Contexte simplifié	73
3.2.2	Nécessité d'un raisonnement <i>abductif</i>	74
3.3	... au système d'aide à la décision	76
3.3.1	Modèles prédictifs	76
3.3.2	Processus d' <i>Etalonnage</i> simplifié	77
3.4	Extensions et <i>évidentialisation</i> de l'<i>Etalonnage</i>	81
3.4.1	Motivations	81
3.4.2	Méta-informations, notations	82
3.4.3	<i>Evidentialisation</i> des processus	83
3.5	Architecture	87
3.5.1	Processus de <i>Décision</i>	87
3.5.2	Processus de <i>Rétroaction</i>	89
3.6	Commentaires et perspectives	90
3.6.1	Commentaires	90
3.6.2	Perspectives	92
3.7	Conclusion	93

3.1 Introduction

Lorsqu'une observation est effectuée sur un système d'étude, il importe parfois de pouvoir revenir sur les causes passées à l'origine de l'état présent. Quand le système est complexe, *remonter le temps* semble pourtant être une tâche laborieuse : le nombre important d'acteurs, la grande stochasticité des événements, les interactions multiples, *etc.*, sont en effet autant de paramètres insaisissables pour l'observateur. L'association de deux

principes centraux, que sont la simulation numérique et le raisonnement *abductif*, peut apparaître comme une solution à une telle problématique.

Dans ce chapitre, la structure générale d'un Système Evidentiel d'Aide à la Décision (SEAD) est ainsi présentée. Une première partie introduit, de manière simplifiée, les principes retenus – c.f., sections 3.2 et 3.3 – puis aborde l'importance de la théorie des fonctions de croyance pour la représentation et la manipulation des informations et des décisions dans un tel système, c.f., sections 3.4 et 3.5. Le chapitre se termine par les perspectives de l'architecture proposée et sur le lien avec les systèmes multi-agents, c.f., section 3.6.

3.2 Du système réel ...

3.2.1 Contexte simplifié

Soit un système réel dynamique, $x_{\text{réel}}$, caractérisé par un ensemble de paramètres observables $p_i \in P$, $\forall i \in [1, I]$. Ces paramètres, quantitatifs ou qualitatifs, sont respectivement définis par leur *domaine de définition*, noté Δ_i et correspondant à l'ensemble des valeurs possibles d'un paramètre p_i .

L'aspect *temporel* du système *requiert* une distinction du paramètre *temps*, noté t et prenant ses valeurs dans T , où T est l'intervalle de temps du système. Habituellement, cet espace est borné par un instant *initial* t_{init} et un instant *final* t_{final} : $t \in T = [t_{\text{init}}, t_{\text{final}}]$.

Une source s – p. ex., un expert – peut observer le système $x_{\text{réel}}$ et fournir, à un pas de temps $t_{\text{obs}} \in [t_{\text{init}}, t_{\text{final}}]$, ses propres mesures des paramètres $p_i \in P$. Les valeurs mesurées à cet instant sont notées $\delta_{\text{obs},i}$, tel que $\forall i \in [1, I] : \delta_{\text{obs},i} \in \Delta_i$. L'état du système réel à l'instant t_{obs} est représenté par le vecteur ω_{obs} , à I dimensions, tel que : $\omega_{\text{obs}} = \{\delta_{\text{obs},1}, \dots, \delta_{\text{obs},i}, \dots, \delta_{\text{obs},I}\}$.

A partir du vecteur $\omega_{\text{obs}} \in \Omega$, la source s souhaite déterminer les jeux de paramètres $\omega_n \in \Omega$ des instants solutions $t_n \in [t_{\text{init}}, t_{\text{obs}}]$, $\forall n \in [1, N]$, permettant d'expliquer l'état du système à t_{obs} . Le système étant complexe, plusieurs jeux hypothétiques de départ peuvent expliquer un même état final observé : l'unicité de la solution est donc peu probable.

Le système $x_{\text{réel}}$ possède une fonction globale d'évolution, notée :

$$\textit{Evolution} : \Omega \longrightarrow \Omega. \quad (3.1)$$

Dans le cadre des systèmes complexes, cette fonction n'étant que partiellement formalisable ou même connue – c.-à-d., les connaissances sont disponibles aux niveaux de certains acteurs, ou groupes d'acteurs, du système –, il est impossible de déterminer la fonction bijective $\textit{Evolution}^{-1}$ permettant de *remonter* de l'état à l'instant t_{obs} à celui à

l'instant t_{obs-1} .

Exemple 2. Soit l'exemple simple d'une société d'insectes $x_{réel}$ caractérisée par deux paramètres p_1 et p_2 , correspondant respectivement à son nombre d'individus et son état d'activité.

Les deux paramètres sont définis par leur domaine de définition :

- $\Delta_1 = \{0, 1, 2, 3, \dots, 10000\}$;
- $\Delta_2 = \{\text{inactive, très peu active, peu active, active, très active}\}$.

A l'heure d'observation $t_{obs} = t_{56}$, un expert s observe la société et fournit ses observations sous la forme d'un vecteur, noté $\omega_{obs} = \{7682, \text{très peu active}\}$.

Soit une règle, déduite d'observations ultérieures, connue des experts ès sociétés d'insectes :

- *Evolution* : le nombre d'individus croît proportionnellement au temps, à la température ambiante et à l'hygrométrie au rythme de 100 individus environ toutes les 24 heures. L'activité est dépendante de la température extérieure et évolue de manière cyclique.

L'observateur s tente alors de déterminer les conditions et l'instant de création de la société.

Remarque 1. L'exemple 2 précédent sert de base aux prochains exemples du chapitre.

3.2.2 Nécessité d'un raisonnement *abductif*

3.2.2.1 L'abduction

Le principe énoncé dans la sous-section 3.2.1 précédente, représenté par la figure 3.1, correspond à un raisonnement de type *abductif*.

S'appuyant sur les raisonnements déductif et inductif introduits par Aristote¹²¹, l'abduction est une troisième forme de raisonnement, formalisée par Charles S. Peirce [210] et étudiée en philosophie [3], intelligence artificielle [207], *etc.*

Formalisé par Gildas Morvan dans le cadre de ce projet de recherche [194, *chap. 2 et 4*], le raisonnement abductif vise à déterminer les causes les plus vraisemblables – c.-à-d., ω_n – expliquant une observation présente – c.-à-d., ω_{obs} .

¹²¹La note de bas de page 21 introduit la syllogistique aristotélicienne, à partir de laquelle l'abduction est issue.

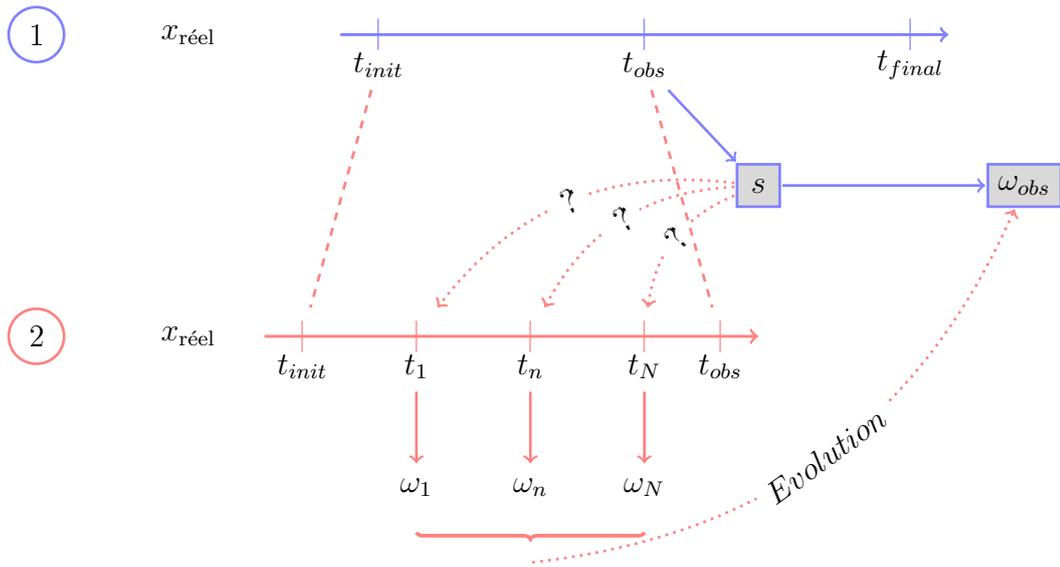


FIG. 3.1 – Schématisation du raisonnement abductif : observation d'un état ω_{obs} du système $x_{réel}$ vu à l'instant t_{obs} par une source s s'interrogeant sur les meilleures hypothèses ω_n des instants t_n , $\forall n \in [1, N]$, expliquant l'état du système à t_{obs} .

De nombreux exemples de la vie quotidienne utilisent l'abduction pour « construire les explications nous permettant de comprendre notre monde » [3, *trad. p. 1*] mais, dans le cas particulier des systèmes complexes, deux remarques sont à prendre en considération :

1. la fonction bijective $Evolution^{-1}$ du système n'est pas connue ;
2. le système d'étude ne peut être *relancé* et observé à plusieurs reprises de manière totalement identique. En effet, lorsqu'un système réel complexe a été observé une fois, il semble difficile d'imaginer pouvoir observer à nouveau ce même système, du fait de sa stochasticité et des difficultés inhérentes à la mise en œuvre des expériences : p. ex., une fourmière en développement ne pourra jamais *revenir* à un état antérieur afin qu'un observateur puisse à nouveau l'analyser de manière *exactement* identique.

Le raisonnement abductif ne semble donc pas manifeste dans le cas des systèmes réels complexes. Les outils proposés par la simulation de modèles apparaissent alors comme des alternatives potentielles, bien que leurs utilisations s'avèrent gourmandes en complexité algorithmique. D'ailleurs, afin de remédier à ce problème de la complexité, plusieurs auteurs ont proposé comme implémentation du raisonnement abductif, un processus *heuristique* [3, *p. 13*], c.-à-d., reposant sur une stratégie ou une méthode permettant de guider le processus de choix des hypothèses [194, *p. 30*].

De plus amples informations sur l'abduction et ses implémentations sont disponibles dans les travaux de Gildas Morvan [194, *chap. 2 et 4*] ainsi que dans d'autres, plus anciens, p. ex., [210].

3.2.2.2 Une formalisation possible : l'étalonnage

Le principe de l'heuristique abductive est exploité et concrétisé par l'association de modèles prédictifs et de processus dits d'*étalonnage*¹²² [20, chap. 10], c.-à-d., destinés à étalonner les paramètres des modèles en choisissant, simulant et validant successivement les jeux de paramètres possibles. Deux définitions étendues, issues de [20, p. 395 – trad.] et [230], doivent être remarquées :

Définition 13 (Validation). *La validation est un processus consistant à comparer un modèle et son comportement au système réel et son comportement. Elle s'effectue généralement au moyen d'une mesure de distance entre les paramètres de sortie du modèle et les mesures effectuées sur le système réel.*

Définition 14 (Etalonnage). *L'étalonnage est un processus itératif de comparaison du modèle au système réel. Il fait successivement des ajustements puis des validations jusqu'à ce que le modèle soit jugé suffisamment précis. Il a pour objectif de réduire les différences entre les observations réelles et les paramètres de sortie du modèle.*

De nombreux travaux abordent un tel processus d'étalonnage, p. ex., [8], [261], etc. Dans ce chapitre, il y est présenté comme le *cœur* du système d'aide à la décision et *évidentialisé*, c'est-à-dire que l'ensemble des informations et des décisions des différents processus sous-jacents s'opère dans le cadre de la théorie des fonctions de croyance.

Le lecteur intéressé par l'étalonnage peut se diriger vers une présentation intéressante – accompagnée d'une application – de [276, chap. 1].

3.3 ... au système d'aide à la décision

3.3.1 Modèles prédictifs

L'utilisation couplée de modèles prédictifs et d'une heuristique *abductive* est donc une solution adéquate pour répondre à la problématique initiale : rechercher les jeux de paramètres permettant d'expliquer au mieux l'état d'un système réel observé à un instant t_{obs} .

Ainsi, est supposée connue une série de modèles prédictifs x_s , $\forall s \in [1, S]$, du système réel $x_{réel}$. Un modèle x_s est potentiellement exécutable dans l'intervalle de temps T ; dans le cas d'une détermination des jeux de paramètres permettant d'expliquer l'état du système réel à un instant $t_{obs} \in [t_{init}, t_{final}]$, celui-ci n'est exécuté qu'entre les instants t_{init} et t_{obs} .

¹²²Par abus de langage, l'anglicisme *calibration* est quelquefois retrouvé dans la littérature. On parle également de *calage* de paramètres [276].

A un pas de temps quelconque $t_n \in [t_{init}, t_{obs}]$, $\forall n \in [1, N]$, un modèle x_s est initialisé avec un jeu de paramètres ω_n , exécuté puis observé par une source s_j , $\forall j \in [1, J]$, – p. ex., un agent du SMA – à l’instant virtuel t_{obs} . Le jeu de paramètres, observé à l’instant t_{obs} obtenu de l’exécution du modèle x_s initialisé avec un jeu de paramètres ω_n de l’instant t_n , est noté $\omega_{n,obs}^{j,s}$.

L’ensemble des jeux de paramètres testés est noté Ω , tel que tout $\omega_n \in \Omega$, $\forall n \in [1, N]$.

Dans le cadre du système d’aide à la décision, en application du raisonnement abductif, il s’agit de comparer les différents vecteurs $\omega_{n,obs}^{j,s}$ au vecteur de référence ω_{obs} et déterminer les meilleurs jeux de paramètres $\omega_n \in \Omega$ expliquant l’état du système réel à l’instant t_{obs} ; c.f., exemple fig. 3.3, p. 80.

Remarque 2. Dans la suite de la présentation, pour faciliter les explications, le système réel $x_{réel}$ et ses modèles x_s , $\forall s \in [1, S]$, pourront être confondus dans la seule notation x_s – sauf en cas d’ambiguïté. Un amalgame des termes « modèle » et « système » peut alors être fait.

3.3.2 Processus d’Etalonnage simplifié

Au sein du système d’aide à la décision, la détermination des jeux de paramètres, permettant aux modèles de corroborer les observations réelles, revient à effectuer un *étalonnage* de ces paramètres. Trois processus¹²³ centraux peuvent être révélés :

- un processus de *Validation*,
- un processus de *Sélection*,
- et un processus de *Mise à jour*.

Les processus de *Sélection* et de *Mise à jour* réunis constituent le processus plus général d’*Heuristique*.

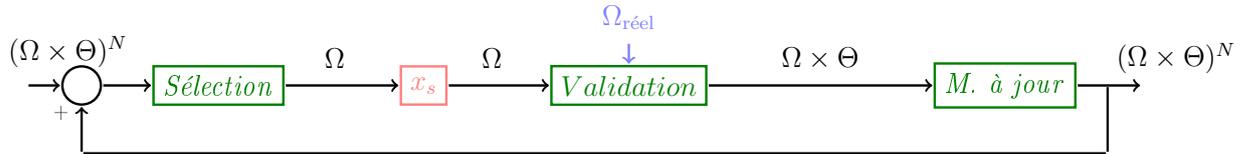


FIG. 3.2 – Processus global d’Etalonnage, décomposé en trois sous-processus de Sélection, de Validation et de Mise à jour. $\Omega_{réel} \subseteq \Omega$ correspond à l’ensemble des observations réelles. L’ensemble Θ représente les degrés de validité. Ces notations sont précisées dans les pages suivantes.

¹²³N.B. : l’appellation *processus* est ici assimilable à celle de *fonction* qui aurait peut-être été préférable. Cependant, afin d’éviter tout malentendu avec l’utilisation des *fonctions* de croyance, et considérant l’aspect dynamique du SEAD, le terme *processus* semble adapté à la caractérisation des fonctions principales du système.

3.3.2.1 Validation

L'étape de *Validation*, pour un modèle x_s , permet d'associer à chacun des jeux de paramètres testés, un *degré de validité* $\theta_v \in \Theta$, $\forall v \in [1, V]$. Θ est l'espace des degrés de validité. Un degré de validité exprime la *proximité* entre les observations faites sur le système réel $\omega_{obs} \in \Omega$ et celles effectuées sur le modèle x_s initialisé avec $\omega_n \in \Omega$. Ce processus est caractérisé par la fonction suivante :

$$Validation : \Omega^2 \longrightarrow \Omega \times \Theta. \quad (3.2)$$

En fonction de la proximité des deux vecteurs $\omega_{n,obs}^{j,s}$ et ω_{obs} , le processus fournit un couple (ω_n, θ_v) , $\forall \omega_n \in \Omega$, $\forall \theta_v \in \Theta$. La définition et l'obtention du degré de validité sont habituellement dépendantes de connaissances empiriques ; c.f., p. ex., chap. 4.

Exemple 3. Soit l'ensemble des degrés de validité $\Theta = \{valide, non-valide\}$ et la société d'insectes $x_{réel}$ définie dans l'exemple 2.

Le modèle x_1 , initialisé avec le vecteur ω_{12} , donne au pas de temps de simulation $t_{56} = t_{obs}$, observé par une source s_1 , le vecteur $\omega_{12,56}^{1,1} = \{7682, \text{très peu active}\}$, exactement identique au vecteur de référence ω_{obs} .

Le couple de paramètres issu de la validation de l'hypothèse pourrait alors être :

$$Validation(\omega_{12}, \omega_{obs}) = (\omega_{12}, valide),$$

signifiant que l'hypothèse testée est valide.

3.3.2.2 Heuristique

Le processus *Heuristique* se caractérise habituellement par un algorithme de recherche, ayant pour objectifs de tendre progressivement vers une(des) solution(s) optimale(s) [89] ou quasi-optimale(s), en fonction de certains critères – p. ex., de coût, de simplicité, *etc.* Le parti pris de la présentation découpe ce processus en deux sous-processus : le premier ayant lieu avant la *Validation* et le second après – c.f., fig. 3.2.

Sélection Pour un modèle x_s particulier, le processus de *Sélection* permet de choisir un nouveau jeu de paramètres $\omega_n \in \Omega$ à tester, en fonction des résultats obtenus de la *Validation* des précédents jeux de paramètres. Le processus de *Sélection* est défini comme une fonction :

$$Sélection : (\Omega \times \Theta)^N \longrightarrow \Omega, \quad (3.3)$$

où N est le nombre de jeux de paramètres hypothétiques testés ou à tester.

C'est par définition au sein du processus de *Sélection* que s'expriment différents critères de sélection. Chacun de ces critères introduit une vision particulière de l'avancement de la recherche dans l'espace des hypothèses Ω . Il importe alors de pouvoir *agréger* ces différentes visions offertes pour prendre la décision du choix de la future hypothèse à tester.

Mise à jour Le processus de *Mise à jour* intervient après la validation pour permettre, par l'intermédiaire d'une rétroaction, une ré-exécution du processus de *Sélection*. Il est défini par la fonction suivante :

$$Mise \ à \ jour : \Omega \times \Theta \longrightarrow (\Omega \times \Theta)^N. \quad (3.4)$$

Il est intéressant de remarquer que le processus de *Mise à jour* n'est pas qu'un *simple* processus intermédiaire. Il peut être doté d'une relative *intelligence* et interpréter les valeurs issues du processus de *Validation* pour anticiper et estimer les potentielles validations d'autres hypothèses non-testées. Il permet de limiter le nombre d'hypothèses à tester et donc de réduire les temps de calcul.

Exemple 4. Soit l'unique paramètre p_1 du modèle x_1 . Ce paramètre est connu pour n'évoluer significativement que toutes les 24 heures.

Si, le modèle est invalidé à cause de la valeur du paramètre, à un certain pas de temps t_n , $\forall n \in [1, N]$, il est fortement vraisemblable que les pas de temps proches, p. ex., $t_{n-5}, t_{n-4}, \dots, t_{n+4}, t_{n+5}$, ne permettent pas non plus de valider le modèle. Il semble donc judicieux de ne pas tester ces pas de temps, de les considérer comme invalides, au risque de devoir les tester par la suite, en fonction des validations d'autres instants.

Un exemple d'un tel processus a été proposé par [195].

3.3.2.3 Etalonnage

L'itération de la succession des deux processus d'*Heuristique* et de *Validation* est formalisable par la composition mathématique des trois fonctions précédentes :

$$\begin{aligned} Etalonnage & : (Mise \ à \ jour \circ Validation \circ Sélection)^N ; \\ Etalonnage & : (\Omega \times \Theta)^N \longrightarrow (\Omega \times \Theta)^N, \end{aligned} \quad (3.5)$$

où N correspond aux nombres d'hypothèses testées.

Le processus d'*Etalonnage* tend à guider un modèle x_s vers un(des) jeu(x) de paramètres optimal(aux) lui permettant de modéliser le plus fidèlement possible une réalité observée à t_{obs} . L'ensemble du processus est représenté à l'aide d'un exemple simplifié sur la figure 3.3, page 80.

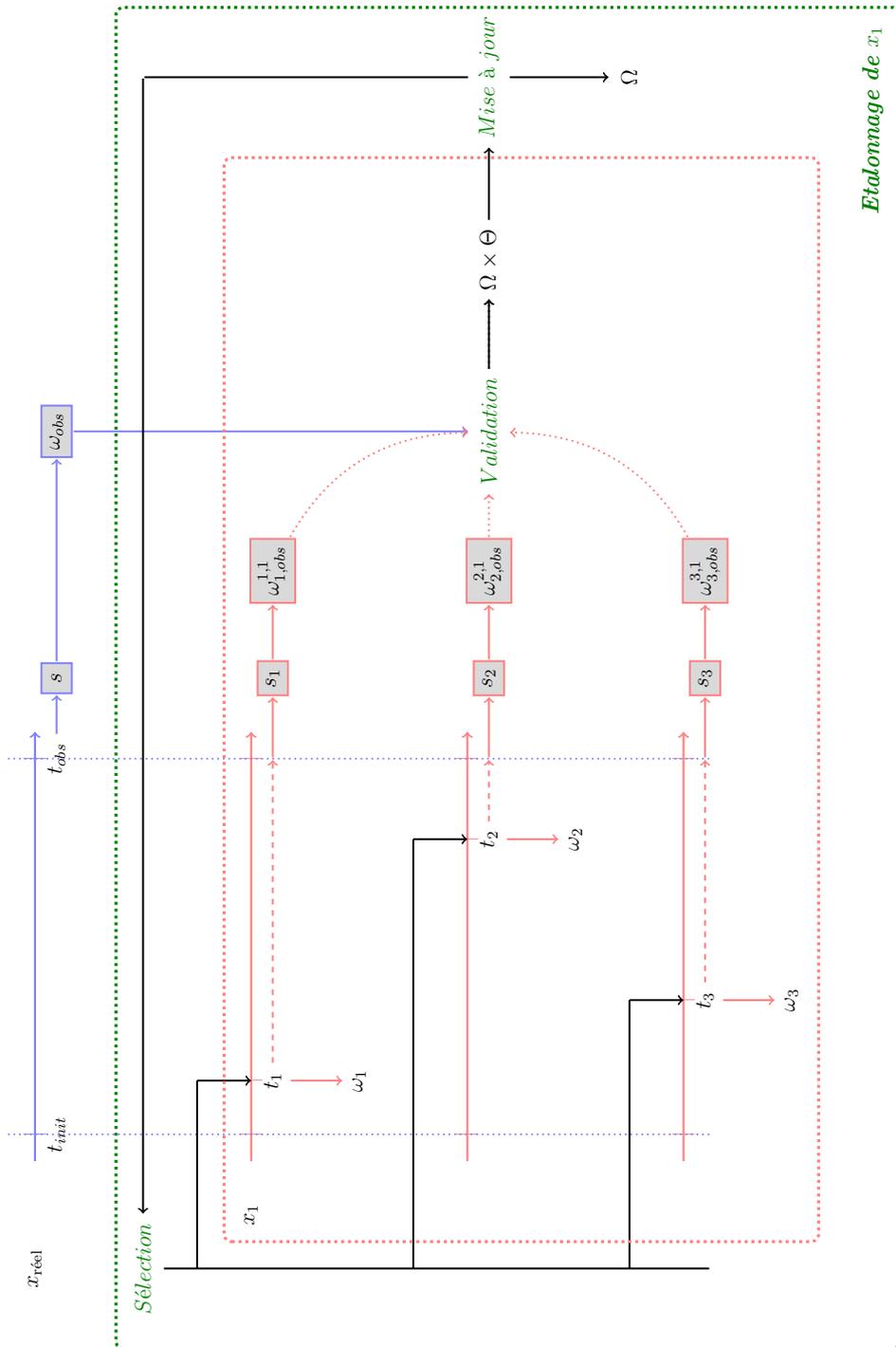


FIG. 3.3 – Présentation générale du processus d'Etalonnage d'un unique modèle x_1 du système réel $x_{\text{réel}}$, pour trois jeux de paramètres hypothétiques testés par l'heuristique – c.-à-d., aux instants t_1, t_2, t_3 .

3.4 Extensions et évidentialisation de l'Étalonnage

3.4.1 Motivations

3.4.1.1 Multi-modèles, multi-sources

Les arguments pour le développement du présent système d'aide à la décision n'ont pas tous été énoncés. Bien que le principe du raisonnement abductif appliqué à l'utilisation de modèles prédictifs soit au cœur du SEAD, le processus d'*Étalonnage* présenté dans les figures 3.2 et 3.3 doit pouvoir être transposable autant de fois qu'il existe de modèles x_s du système réel $x_{\text{réel}}$. Le principe de *fusion d'informations* – c.f., définition page 44 – devient alors fondamental pour *comparer* les étalonnages, révéler consensus et conflits, et mieux mettre en lumière l'état initial du système réel expliquant les observations effectuées.

En outre, les processus du SEAD – p. ex., *Heuristique* et *Validation* – peuvent être démultipliés pour chacune des sources s_j susceptibles d'y participer. L'emploi de plusieurs sources à tous les niveaux du système, doit permettre d'améliorer le système global par une augmentation de la fiabilité et de la précision des résultats finaux.

3.4.1.2 Méta-informations

La considération de plusieurs modèles et sources au sein du système d'aide à la décision va de pair avec l'intégration de méta-informations les concernant – c.f., sous-section 2.3.3.5, chap. 2. Ces méta-informations, habituellement initialisées à partir d'informations *extérieures* au système, peuvent être calculées et modifiées dynamiquement au cours des cycles de décision, en fonction des systèmes réels traités et des résultats globaux du système d'aide à la décision. Il semble essentiel de mettre en place des protocoles de communication entre le SEAD et le monde extérieur¹²⁴, souvent représenté par un expert du domaine.

3.4.1.3 Imperfections des mesures

Les sections 3.2 et 3.3 considéraient par défaut la précision et la certitude des valeurs mesurées – c.f., le vecteur $\omega_n = \{\delta_{n,1}, \dots, \delta_{n,i}, \dots, \delta_{n,I}\}$, $\forall i : \delta_{n,i} \in \Delta_i$. Pourtant, qu'elles soient réelles ou virtuelles, les sources ne disposent que de croyances sur les valeurs des paramètres ; les erreurs de mesure étant omniprésentes¹²⁵. Une mesure $\delta_{n,i}$ d'un paramètre p_i est ainsi toujours entâchée d'erreurs,

- lorsqu'il est impossible d'observer *correctement* le paramètre en question – p. ex. : impossibilité d'observer l'ensemble des individus du système, c.f., ex. 2 du dénombrement des insectes – ;

¹²⁴On parle de rétroactions du monde extérieur sur le système. Relire à ce sujet la sous-section 1.4.3, p. 31

¹²⁵C.f., chap. 1 et illustrations des imperfections dans la sous-section 2.2.1 du chap. 2 – ex. du meurtre de Pamela Rose.

- lorsque le paramètre est qualitatif et l'appréciation de l'expert pourra être sujet à caution – p. ex. : détermination de l'état d'activité d'une société d'insectes, c.f., ex. 2 –;
- lorsque des erreurs sont intrinsèques aux instruments de mesure utilisés – erreurs liées à l'exactitude, la justesse ou la fidélité des instruments [64, chap. 2]¹²⁶.
- dans le cas de modèles simulés, en particulier dans le cas de simulations orientées agents – c.f., [199] –, où l'accès aux différentes variables est limité par une complexité algorithmique trop importante^{127, 128}.

Pour répondre à ces quatre problématiques que sont le *multi-modèles*, le *multi-sources*, les *méta-informations* et l'*imperfection*, la théorie des fonctions de croyance est le formalisme de représentation et de manipulation des informations utilisé pour *évidentialiser* le processus d'*Étalonnage* et plus généralement le SEAD. Ainsi, se plaçant dans le contexte du modèle des croyances transférables (MCT), chacun de ces processus est résumable à une question posée à des sources capables d'y répondre. L'évidentialisation entraîne un changement de vision et un approfondissement des processus.

3.4.2 Méta-informations, notations

Par la suite, le système d'aide à la décision détient des méta-informations sur les modèles et les sources s'exprimant au cours des différents processus. Pour soulager l'argumentaire, seules les méta-informations relatives à la fiabilité sont ici utilisées¹²⁹.

Ces informations sont généralement utilisées lors d'opérations de manipulation, p. ex. pour affaiblir, avant les combinaisons, les sources proportionnellement à leur fiabilité, c.f., sous-section 2.3.3.5, chap. 2. Ainsi, soit le cadre de discernement $\Psi = \{F, NF\}$, où F correspond à l'hypothèse *fiable* et NF à l'hypothèse *non-fiable*.

3.4.2.1 Fiabilité des modèles

« *Quelle est la fiabilité du modèle x_s ?* »

La croyance détenue par le SEAD sur la fiabilité du modèle x_s , $\forall s \in [1, S]$, est représentée par la fonction de masse $m^{x_s, \Psi} \in \mathcal{M}_{Mod}^{\Psi}$. \mathcal{M}_{Mod}^{Ψ} est l'ensemble des fonctions de masse de croyance exprimées sur le cadre de discernement Ψ et caractérisant les fiabilités des modèles x_s .

¹²⁶C.f., *Éléments de métrologie générale et de métrologie légale* [64, p. 65] : « Une mesure n'est presque jamais absolument exacte. Si, par hasard, elle l'est, aucune personne, scientifiquement compétente en la matière, ne peut l'affirmer et par conséquent s'en prévaloir. »

¹²⁷Ce point particulier est abordé dans le chapitre suivant sur la validation de simulations agents.

¹²⁸Le lecteur remarquera, dans la suite du manuscrit, qu'aucune distinction n'est perceptible dans le traitement des informations issues de systèmes réels, fournies par l'intermédiaire d'experts, et le traitement d'informations véhiculées dans le système d'aide à la décision.

¹²⁹Comme le présente la sous-section 2.3.3.5 du chapitre 2, les méta-informations duales, *de prudence*, peuvent également être considérées. Une extension intégrant cette méta-information est aisément envisageable.

3.4.2.2 Fiabilité des sources

« *Quelle est la fiabilité de la source s_j ?* »

Dans le cadre du système d'aide à la décision, la fiabilité d'une source est toujours relative au processus dans lequel celle-ci s'exprime. Pour un processus quelconque $Proc$, la croyance détenue par le SEAD sur la fiabilité d'une source s_j^{Proc} , $\forall j \in [1, J_{Proc}]$, est représentée par une fonction de masse $m^{s_j^{Proc}, \Psi} \in \mathcal{M}_{Proc}^{\Psi}$.

Remarque 3. Par la suite, l'abréviation $Proc$ est remplacée par l'abréviation respective du processus présenté.

Exemple 5. Pour le processus de Validation, la source s_j^{Val} s'exprime sur la validité de l'hypothèse $\omega_n \in \Omega$. Une fonction de croyance sur la fiabilité de la source est notée : $m^{s_j^{Val}, \Psi} \in \mathcal{M}_{Val}^{\Psi}$.

Lorsqu'aucune information n'est disponible sur la fiabilité de la source, toute la masse de croyance peut être allouée à l'ensemble $\{\Psi\}$: $m^{s_j^{Val}, \Psi}(\{\Psi\}) = 1$.

A tout processus énoncé ci-après et pour chaque source s_j du SEAD, une fonction de masse de croyance représentant la fiabilité de la source pourra être associée. Un processus de *Rétroaction*, activé en fin de cycle du SEAD et défini section 3.5, permettra une mise à jour des méta-informations du système.

3.4.3 Evidentialisation des processus

3.4.3.1 Processus d'Observation

« *Quelle est la valeur du paramètre p_i ?* »

Dans le cadre du présent système d'aide à la décision, il ne s'agit plus de manipuler des valeurs de paramètres mais des croyances sur ces valeurs. Les composantes du vecteur ω_n deviennent ainsi des fonctions de masse de croyance respectivement exprimées sur les cadres de discernement Δ_i et notées : $m_{x_s, s_j}^{\omega_n, \Delta_i}[p_i]$, c.-à-d., la croyance sur la valeur du paramètre p_i , vue par la source s_j lors de l'exécution du modèle x_s initialisé avec le jeu de paramètres ω_n .

Exemple 6. Ce formalisme est utilisable pour représenter les informations issues des observations faites sur le système $x_{réel}$.

En reprenant l'exemple 2, considérant que les informations étaient effectivement précises et certaines et que la source s était totalement fiable, il est possible de représenter

les informations de manière identique, à l'aide de fonctions de masse de croyance catégoriques, c.f., définition 5, p. 46.

Ainsi, observant toujours la société d'insectes à l'instant t_{obs} , la source peut fournir un vecteur ω_{obs} dont les deux composantes sont :

- $m_{réél,s}^{\omega_{obs},\Delta_1}[p_1](\{7682\}) = 1$;
- $m_{réél,s}^{\omega_{obs},\Delta_2}[p_2](\{\text{très peu active}\}) = 1$.

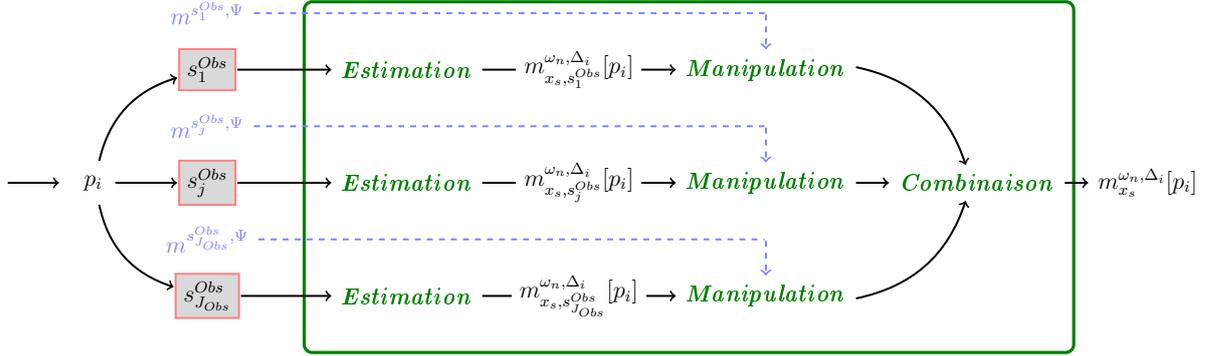


FIG. 3.4 – Processus d'Observation « évidentialisé » d'un paramètre p_i observé, à l'instant t_n , par des sources s_j^{Obs} pour lesquelles des informations de fiabilité sont disponibles.

Exemple 7. Profitant de son expérience dans le dénombrement d'insectes, la source s sait qu'habituellement elle fait une erreur de 10% sur le nombre d'insectes obtenus.

De plus, il semble relativement difficile d'exprimer la valeur du paramètre p_2 si bien que les états "très peu active" et "peu active" sont généralement très proches. Par expérience, lorsqu'il décide "très peu active", deux fois sur dix, il se trompe avec "peu active".

Prenant en compte ces remarques, les deux composantes du nouveau vecteur ω_{obs} pourraient être de la forme :

- $m_{réél,s}^{\omega_{obs},\Delta_1}[p_1](\{7298, 7299, \dots, 8066\}) = 1$;
- $m_{réél,s}^{\omega_{obs},\Delta_2}[p_2](\{\text{très peu active}\}) = 0.8$ et $m_{réél,s}^{\omega_{obs},\Delta_2}[p_2](\{\text{peu active}\}) = 0.2$

Pour un système x_s initialisé avec le vecteur ω_n , plusieurs sources s_j^{Obs} , $\forall j \in [1, J_{Obs}]$, peuvent observer un même paramètre p_i . Il est possible d'intégrer et de manipuler leurs croyances au sein d'un processus nommé *Observation*, représenté par la figure 3.4 et formalisé par la fonction suivante :

$$\text{Observation} : P \times (\mathcal{M}_{Obs}^{\Psi})^{J_{Obs}} \longrightarrow \mathcal{M}_s^{\Delta_i}. \quad (3.6)$$

Dans l'équation 3.6, le domaine P est l'ensemble des paramètres observables d'un système x_s . L'ensemble \mathcal{M}_{Obs}^Ψ regroupe les fonctions de masse exprimées sur Ψ , caractérisant les fiabilités des J_{Obs} sources d'observations impliquées dans le processus d'*Observation*. $\mathcal{M}_s^{\Delta_i}$ représente l'ensemble des fonctions de masse de croyance exprimées sur le cadre de discernement Δ_i .

3.4.3.2 Processus d'*Etat*

« *Quel est l'état du système x_s ?* »

Le processus d'*Etat* est un processus permettant d'obtenir de manière synthétique, sous la forme d'un vecteur à I dimensions, l'état du système x_s , $\forall s \in [1, S]$, à l'instant t_n , $\forall n \in [1, N]$, à partir des fonctions de masse retournées des processus d'*Observation* précédents. Il est défini par la fonction :

$$\begin{aligned} \textit{Etat} &: (\textit{Observation})^I ; \\ \textit{Etat} &: \mathcal{M}_s^{\Delta_1} \times \dots \times \mathcal{M}_s^{\Delta_i} \times \dots \times \mathcal{M}_s^{\Delta_I} \longrightarrow \Omega, \end{aligned} \quad (3.7)$$

pour I , le nombre de paramètres du système x_s .

Ainsi, l'état général d'un système x_s , à l'instant t_n , est donné par le vecteur $\omega_n \in \Omega$:

$$\omega_n = \{m_{x_s}^{\omega_n, \Delta_1}[p_1], \dots, m_{x_s}^{\omega_n, \Delta_i}[p_i], \dots, m_{x_s}^{\omega_n, \Delta_I}[p_I]\}. \quad (3.8)$$

3.4.3.3 Processus de *Validation*

« *La simulation du modèle x_s initialisé avec le jeu de paramètres $\omega_n \in \Omega$ permet-elle l'obtention d'observations proches de celles effectuées sur le système réel ?* »

Pour répondre à cette question, plusieurs sources, notées s_j^{Val} , $\forall j \in [1, J_{Val}]$, émettent des croyances à l'aide de fonctions de masse de croyance exprimées sur le cadre de discernement des degrés de validité, Θ .

Leur notation est la suivante : $m_{x_s, s_j^{Val}}^{\omega_n, \Theta} \in \mathcal{M}_s^\Theta$, pour s_j^{Val} , la source ; x_s , le système ; ω_n le jeu de paramètres d'initialisation. Pour un modèle x_s , \mathcal{M}_s^Θ est l'ensemble des fonctions de masse de croyance exprimées sur Θ .

L'ensemble \mathcal{M}_{Val}^Ψ regroupe les fonctions de masse exprimées sur Ψ , caractérisant les fiabilités des J_{Val} sources de validation impliquées dans le processus de *Validation*. Le processus s'exprime alors avec la fonction suivante :

$$\textit{Validation} : \Omega^2 \times (\mathcal{M}_{Val}^\Psi)^{J_{Val}} \longrightarrow \mathcal{M}_s^\Theta \quad (3.9)$$

et est décomposé en autant de sous-processus représentés sur la figure 3.5.

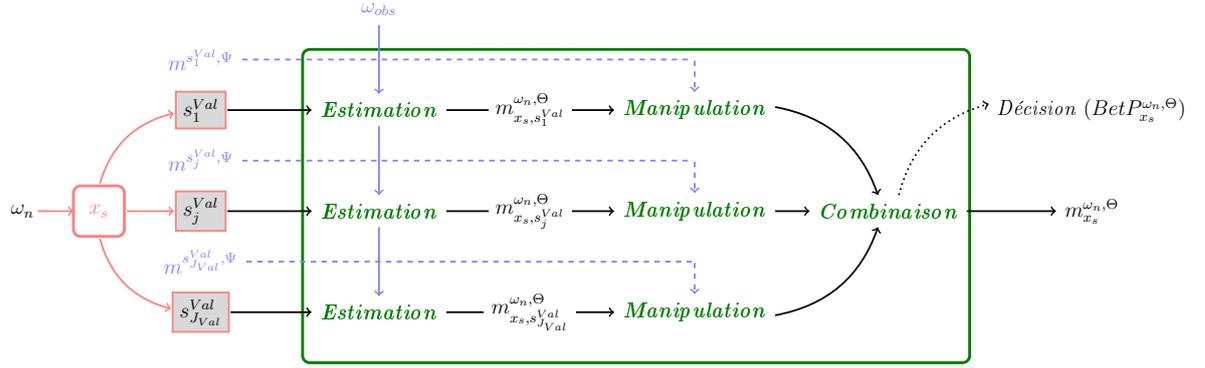


FIG. 3.5 – Décomposition du processus évidentialisé de Validation pour un modèle x_s et un jeu de paramètres testé ω_n . Les différents sous-processus – c.-à-d., Estimation, Manipulation, Combinaison – sont détaillés dans le chapitre suivant traitant de la validation dans le cadre de simulations orientées agents. Le sous-processus de Décision n'est que facultatif et dépendant des besoins du modélisateur et de l'application : au sein du processus plus général d'Etalonnage, la décision n'est utile que durant l'étape de Sélection ou en toute fin du SEAD, il est donc préférable de ne véhiculer, entre les processus intermédiaires, que des fonctions de masse.

3.4.3.4 Processus de Sélection

« *A partir des validations précédentes, quelle nouvelle hypothèse $\omega_n \in \Omega$ est-il préférable de tester ?* »

De manière identique au processus précédent, l'ensemble de sources $s_j^{Sel}, \forall j \in [1, J_{Sel}]$, exprimant leurs croyances à l'aide de fonctions de masse définies sur Ω , est noté \mathcal{M}^Ω . Le processus de Sélection nécessite qu'une décision soit effectivement arrêtée, cela est fait grâce à la transformation pignistique de la fonction $m^\Omega[\mathcal{M}_s^\Theta] \in \mathcal{M}^\Omega$, c.f., figure 3.6. Ce processus est caractérisé par la fonction suivante :

$$\text{Sélection} : (\mathcal{M}_s^\Theta)^N \times (\mathcal{M}_{Sel}^\Psi)^{J_{Sel}} \longrightarrow \Omega. \quad (3.10)$$

3.4.3.5 Processus de Mise à jour

Le processus de Mise à jour est un processus intermédiaire intégrant la croyance issue de la validation d'une hypothèse $\omega_n \in \Omega$ à l'ensemble des croyances relatives aux validations précédentes. Il est défini par :

$$\text{Mise à jour} : \mathcal{M}_s^\Theta \longrightarrow (\mathcal{M}_s^\Theta)^N. \quad (3.11)$$

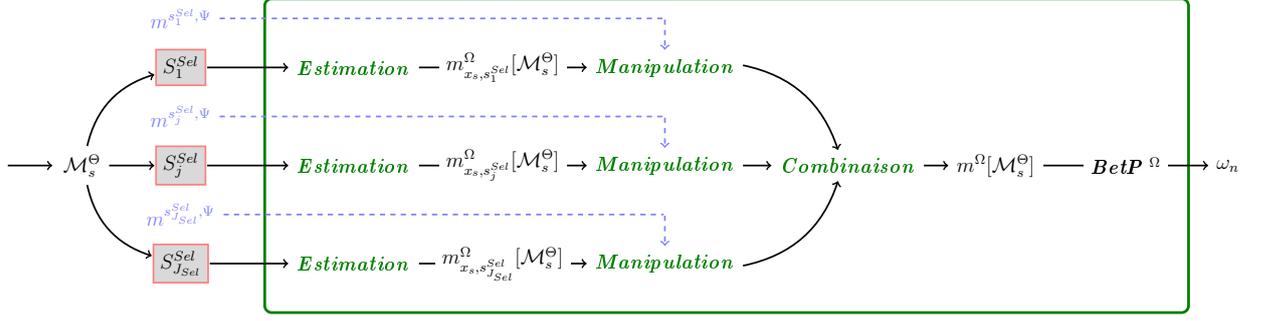


FIG. 3.6 – *Processus de Sélection évidentialisé permettant de décider de la prochaine hypothèse à tester à partir des croyances de sources se basant sur les résultats de précédentes validations. Etant dans le cadre du modèle des croyances transférables, la transformation pignistique – c.f., eq. 2.38, p. 61 – a été choisie.*

3.4.3.6 Processus d'Etalonnage

Rapporté à la théorie des fonctions de croyance, le processus global d'*Etalonnage* peut à nouveau être issu de la composition mathématique des fonctions précédemment définies :

$$\begin{aligned} \text{Etalonnage} &: (\text{Mise à jour} \circ \text{Validation} \circ \text{Etat} \circ \text{Sélection})^N ; \\ \text{Etalonnage} &: (\mathcal{M}_s^\Theta)^N \times (\mathcal{M}_{Sel}^\Psi)^{J_{Sel}} \times (\mathcal{M}_{Obs}^\Psi)^{J_{Obs}} \times (\mathcal{M}_{Val}^\Psi)^{J_{Val}} \longrightarrow (\mathcal{M}_s^\Theta)^N, \end{aligned} \quad (3.12)$$

avec N , le nombre d'hypothèses testées. Les paramètres J_{Sel} , J_{Obs} , J_{Val} sont respectivement les nombres de sources impliquées dans les processus de *Sélection*, d'*Observation* et de *Validation*.

3.5 Architecture

A partir des sous-sections précédentes, les différentes *briques* peuvent être assemblées afin de former l'architecture générale du système évidentiel d'aide à la décision (SEAD) destiné aux systèmes complexes, c.f., figure 3.7.

3.5.1 Processus de Décision

3.5.1.1 Processus de *Manipulation_s*

« *Quels sont les meilleurs jeux de paramètres du modèle x_s ?* »

Chaque processus de *Manipulation_s*, $\forall s \in [1, S]$, est exécuté après le processus d'*Etalonnage_s* d'un modèle x_s , défini dans la section précédente et retournant un ensemble \mathcal{M}_s^Θ de N fonctions de masse de croyance, exprimées sur Θ , représentant chacune la validité du jeu de paramètres ω_n , $\forall n \in [1, N]$.

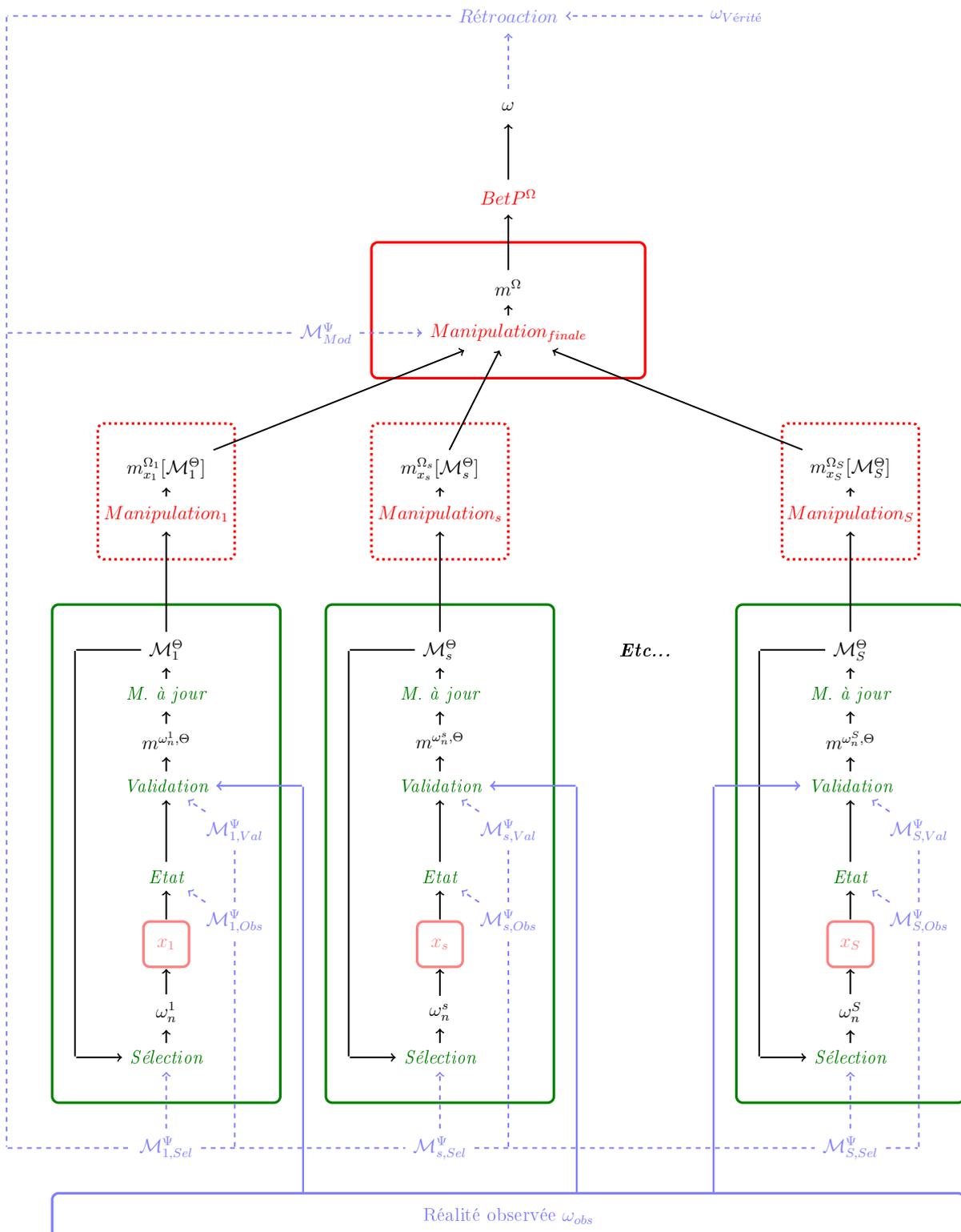


FIG. 3.7 – Architecture générale du système évidentiel d'aide à la décision. Des indices $s, \forall s \in [1, S]$, relatifs au modèle courant ont été ajoutés dans la figure.

Comme représenté sur la figure 3.7, p. 88 – c.f., pointillés rouges –, le processus de $Manipulation_s$ intervient pour effectuer un changement de cadre de discernement – c.f., opérations de raffinement, sous-section 2.3.3.4, chap. 2 – et exprimer la croyance en le meilleur jeu de paramètres pour le modèle x_s .

Le processus de $Manipulation_s$ est défini par la fonction suivante :

$$Manipulation_s : (\mathcal{M}_s^\Theta)^N \longrightarrow \mathcal{M}^{\Omega_s}, \quad (3.13)$$

où \mathcal{M}^{Ω_s} est l'ensemble des fonctions de croyance exprimées sur Ω_s , par rapport au modèle x_s .

3.5.1.2 Processus de $Manipulation_{finale}$

« *Quels sont les meilleurs jeux de paramètres, supportés par l'ensemble des modèles x_s , expliquant les observations réelles ω_{obs} ?* »

Ce processus de $Manipulation_{finale}$ consiste à choisir, parmi l'ensemble des jeux de paramètres Ω , le(s) meilleur(s) jeu(x) de paramètres supporté(s) par la majorité des modèles x_s , $\forall s \in [1, S]$ étalonnés.

Des méta-informations concernant la fiabilité des modèles utilisés peuvent également être intégrées au processus. Elles sont caractérisées par des fonctions de masse de croyance, exprimées dans l'ensemble Ψ et notées : $m^{x_s, \Psi} \in \mathcal{M}_{Mod}^\Psi$. \mathcal{M}_{Mod}^Ψ est l'ensemble des fonctions de masse de croyance exprimant la fiabilité des modèles x_s .

Ce processus est formalisé par l'équation suivante :

$$Manipulation_{finale} : (\mathcal{M}^{\Omega_s} \times \mathcal{M}_{Mod}^\Psi)^S \longrightarrow \mathcal{M}^\Omega. \quad (3.14)$$

3.5.1.3 Processus général de $Décision$

Pour clôturer la description du processus général de $Décision$, une méthode de décision doit finalement être adoptée – p. ex., la transformation pignistique, notée $BetP^\Omega$. Le processus est défini par la fonction :

$$\begin{aligned} Décision & : BetP^\Omega \circ Manipulation_{Finale} \circ (Manipulation_s \circ Etalonnage_s)^S ; \\ Décision & : ((\mathcal{M}_s^\Theta)^N \times (\mathcal{M}_{Sel}^\Psi)^{J_{Sel}} \times (\mathcal{M}_{Obs}^\Psi)^{J_{Obs}} \times (\mathcal{M}_{Val}^\Psi)^{J_{Val}} \times \mathcal{M}_{Mod}^\Psi)^S \longrightarrow \Omega. \end{aligned} \quad (3.15)$$

3.5.2 Processus de $Rétroaction$

Il est possible que des méta-informations puissent *a posteriori* expliquer l'état observé ω_{obs} du système réel. Ces informations peuvent alors venir infirmer ou confirmer la décision finale obtenue du processus général de $Décision$.

Exemple 8. *Un médecin constate une série de symptômes sur un patient. Utilisant un tel SEAD, il obtient une réponse orientant les soins à prodiguer. En fonction du rétablissement et de l'évolution des symptômes, le médecin pourrait alors être capable de confirmer ou non les décisions prises par le système.*

Pour prendre en compte ces méta-informations, un processus, nommé *Rétroaction*, doit pouvoir *comparer* la décision $\omega \in \Omega$ fournie par le SEAD à la vérité donnée $\omega_{V\acute{e}rit\acute{e}} \in \Omega$. Un tel processus de *Rétroaction* peut être caractérisé par la fonction suivante :

$$\begin{aligned} \text{Rétroaction} : \Omega^2 \times (\mathcal{M}_{Sel}^\Psi)^{J_{Sel}} \times (\mathcal{M}_{Obs}^\Psi)^{J_{Obs}} \times (\mathcal{M}_{Val}^\Psi)^{J_{Val}} \times (\mathcal{M}_{Mod}^\Psi)^S \longrightarrow \\ (\mathcal{M}_{Sel}^\Psi)^{J_{Sel}} \times (\mathcal{M}_{Obs}^\Psi)^{J_{Obs}} \times (\mathcal{M}_{Val}^\Psi)^{J_{Val}}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

En approfondissant la définition du processus de *Rétroaction*, celui-ci consiste à *valider* les décisions prises par le système par rapport à une vérité connue ultérieurement. Il représente le deuxième niveau d'*étalonnage*, étalonnant l'ensemble des croyances exprimées sur le cadre Ψ , pour les différents processus et modèles.

3.6 Commentaires et perspectives

3.6.1 Commentaires

Dans les sections 3.4 et 3.5, les détails théoriques concernant les procédés d'*Estimation*, de *Manipulation* et de *Combinaison* des fonctions de croyance des différents processus n'ont pas tous été précisés. Ces procédés sont communément propres aux systèmes d'étude traités, aux connaissances empiriques disponibles, aux visions et besoins des experts, des modélisateurs, *etc.* Cependant, quelques principes peuvent être retenus.

3.6.1.1 Fonctions de croyance et opérations associées

Estimation Les estimations des fonctions de masse peuvent être fondées sur les méthodes présentées dans la section 2.4 du chapitre 2 ou sur des connaissances empiriques, comme celles utilisées dans le chapitre suivant ; voir p. ex. [274].

Dans le cas de processus dont les cadres de discernement diffèrent en *entrée* et en *sortie*, une opération de changement de cadre est impérative, c.f., opérations de grossissement et de raffinement, sous-section 2.3.3.4, chap. 2. C'est le cas des processus de *Sélection*, de *Manipulation_s*, $\forall s \in [1, S]$, et de *Manipulation_{finale}*.

Manipulation La principale opération de manipulation du SEAD consiste à affaiblir les fonctions de croyances relativement à la fiabilité des sources émettrices. Dans le cas d'absence d'information sur ces fiabilités, il est admis que toutes les sources sont considérées comme parfaitement fiables. Au cours des processus répétés de *Rétroaction*, ces fiabilités seront mises à jour pour tendre progressivement vers leur valeur optimale.

Combinaison Les sources étant considérées comme fiables – ou les fiabilités ayant été gérées *a priori* à l’aide de l’affaiblissement –, seuls les deux opérateurs de combinaison conjonctive non-normalisée, de la section 2.3.3 du chapitre 2, peuvent être utilisés. En fonction des origines et des fonctionnements des sources – connus généralement de connaissances expertes –, la distinctivité peut être ou non supposée et l’un ou l’autre des deux opérateurs préféré.

3.6.1.2 Importance de l’orientation multi-agents et *agentification* des sources et processus

Négligée dans ce chapitre, l’orientation *multi-agents* est pourtant essentielle pour le présent système d’aide à la décision. Au même titre que les fonctions de croyance, les agents sont au centre du SEAD, pour deux raisons :

1. les modèles x_s , $\forall s \in [1, S]$, par lesquels une majorité des informations est véhiculée, sont basés sur le paradigme agent¹³⁰ ;
2. les sources et les processus du SEAD sont *agentifiés*¹³¹ et intégrés dans un unique environnement multi-agents où cohabitent agents des modèles – pouvant être réactifs – avec agents du SEAD – plus cognitifs.

Comme cela a été vu dans la sous-section 1.4.4 du chapitre 1, les sources et les processus communiquent alors entre eux par des échanges de messages. Ces messages sont soit des *questions* envoyées des processus aux sources, soit des *réponses* exprimées sous la forme de fonctions de croyance, envoyées des sources aux processus. Une structure de communication comme celle présentée dans la figure 3.8 est possible.

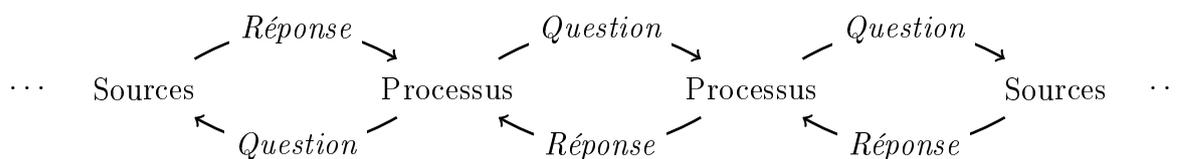


FIG. 3.8 – Présentation des échanges de messages possibles entre les agents *Processus* et *Sources*.

¹³⁰Une problématique majeure, liée à la modélisation multi-agents, a été traitée durant ce projet de recherche : la problématique de la modélisation multi-niveaux, c.-à-d., permettant d’associer dans un même modèle, des connaissances de différents niveaux de connaissances, c.f., les travaux [200] et [198]. Ceux-ci ne sont pas détaillés dans ce manuscrit.

¹³¹Expression signifiant qu’un acteur ou un objet, même non-actant, d’un système réel est modélisé par un agent dans le SEAD.

3.6.2 Perspectives

Méta-informations et *Rétroaction* Plusieurs éléments du SEAD peuvent être améliorés. Même si le SEAD est bien sûr défini pour un système d'étude, il est envisageable de considérer des sous-classes particulières de ce même système. Les méta-informations pourraient alors être relatives à la classe d'appartenance du système réel courant. Des considérations de la sorte pourraient avoir une portée supplémentaire en intégrant des opérations d'affaiblissement dit contextuel, c.f., [178].

Exemple 9. *Dans le cas de la modélisation d'une société animale, un modèle x_1 peut avoir été développé pour modéliser la société dans des conditions de température entre 10°C et 20°C. Pour un système réel où les températures ambiantes sont toujours supérieures à 20°C, il n'est ni interdit ni impossible d'utiliser x_1 , cependant son importance doit être limitée lors de la combinaison. Les croyances issues de ce modèle peuvent donc être pondérées lors d'une opération d'affaiblissement contextualisée à la température ambiante.*

De plus, pour des raisons de clareté, cette présentation ne se limite qu'aux méta-informations de fiabilité. Pour plus d'expressivité, il est souhaitable d'utiliser les informations duales, comme la *prudence*, c.f., sous-section 2.3.3.5, chap. précédent.

La *Rétroaction* est un processus extrêmement complexe qui n'est pas toujours, dans la pratique, effectif sur l'ensemble des sources, des modèles et des processus. En effet, comme introduit à la page 90, ce processus a pour buts de valider les décisions du système et d'étalonner progressivement les méta-informations pour améliorer les résultats généraux. Pour ce faire, une importante quantité d'informations est nécessaire – de préférence, avant la mise en service du SEAD –, ce qui n'est pas toujours concevable avec des systèmes complexes.

Hypothèses et paramètre *temps* A chaque instant t_n , $\forall n \in [1, N]$, un unique jeu de paramètres ω_n a été considéré¹³². Dans le cas d'une mise en pratique, un élargissement du système et une amélioration du processus de *Sélection* sont possibles, intégrant un nombre potentiellement infini de jeux de paramètres à chaque instant.

Prise en compte des imperfections Le chapitre ne s'est canalisé que sur les processus sous-jacents à la prise de décision. Une partie centrale d'un système d'aide à la décision réside dans son Interface Homme-Machine (IHM), primordiale pour l'intégration des observations réelles et pour l'interaction des experts du domaine durant les différents processus. Il ne s'agit plus d'un système d'aide à la décision mais d'un Système Interactif d'Aide à la Décision (SIAD) où l'utilisateur devient également acteur de la décision,

¹³²Choix effectué pour deux raisons :

1. afin de rendre plus aisée la compréhension – c.f., figure 3.1 ;
2. parce que l'application présentée ci-après ne se limite, pour le moment, qu'à un jeu de paramètres par instant.

pouvant même communiquer avec les agents – *Sources* et *Processus* – du système pour parfaire les décisions du système.

D'importants travaux doivent donc être considérés pour permettre une meilleure intégration des informations imparfaites, qualitatives et quantitatives fournies par l'*expert-utilisateur* du SIAD, c.f., p. ex. [296, 164].

Fonctions de croyance aux niveaux des agents du SEAD Enfin, les comportements et les décisions des agents du SEAD n'ont pas tous été étudiés. A l'avenir, une généralisation de l'*évidentialisation* des agents – c.-à-d., dont les comportements et décisions sont basés sur la théorie des fonctions de croyance – du SEAD, au niveau des modèles x_s par exemple, devrait permettre le perfectionnement du système.

3.7 Conclusion

Dans ce troisième chapitre de thèse, une architecture de système évidentiel d'aide à la décision a été présentée et formalisée. Un nombre réduit de processus essentiels a été retenu et deux niveaux de *Validation-Etalonnage* ont été mis en avant : l'étalonnage des modèles x_s – autour desquels le SIAD est structuré, c.f., sous-section 3.4.3 – et un étalonnage du SEAD – pour optimiser les méta-informations, c.f., processus de *Rétroaction*, section 3.5 – permettant d'améliorer les décisions finales du système.

L'accent a été mis sur la théorie des fonctions de croyance pour la représentation et la manipulation des informations et des décisions au sein de tels systèmes. Dans le chapitre suivant, une attention particulière est accordée à la validation *dynamique* de simulations orientées agents. Les processus de *Validation* et, dans une moindre mesure, d'*Observation* et de *Manipulation_s* sont détaillés. Les deux outils que sont les fonctions de croyance et les systèmes multi-agents sont essentiels pour améliorer la prise de décision dans le cadre de systèmes complexes.

Chapitre 4

Validation évidentielle de simulations orientées agents

Sommaire

4.1	Introduction	94
4.1.1	Aperçu des méthodes d'observation et de validation de SOA	95
4.1.2	Motivations	96
4.2	Validation évidentielle dynamique de SOA	98
4.2.1	Notations, principes et architecture pyramidale	98
4.2.2	Comportement des agents <i>sondés</i> ag_j	100
4.2.3	Comportement des <i>Agents-Paramètre</i> p_i	101
4.2.4	Comportement de l' <i>Agent-Validation</i>	105
4.2.5	Comportement de l' <i>Agent-Launcher</i>	107
4.2.6	Algorithme de synthèse	108
4.3	Liens avec le processus de <i>Manipulation_s</i>	109
4.3.1	Processus de <i>Manipulation_s</i> et extension vide	109
4.3.2	Combinaison finale	110
4.4	Conclusions et perspectives	111

4.1 Introduction

Rappel : *La validation est un processus consistant à comparer un modèle et son comportement au système réel et son comportement. Elle s'effectue généralement au moyen d'une mesure de distance entre les paramètres de sortie du modèle et les mesures effectuées sur le système réel. C.f., définition p. 76.*

Après la présentation générale du SEAD, ce chapitre approfondit l'un de ses principaux processus : la *Validation* de simulations orientées agents (SOA), considérée comme « une des tâches les plus difficiles et importantes à laquelle un modélisateur peut être confronté » [20, trad. p. 388]. Utilisé en amont de ce dernier, le processus d'*Observation*

est également concerné par cette étude¹³³.

La suite du développement s'inspire des articles [274] et [273].

Avant de débiter la présentation de la *validation évidentielle dynamique* de SOA – section 4.2 –, il est intéressant de s'arrêter brièvement sur les méthodes existantes d'observation et de validation.

4.1.1 Aperçu des méthodes d'observation et de validation de SOA

4.1.1.1 Observation de SOA

Comme présenté dans l'article [199], les coûts algorithmiques d'une SOA, importants pour des systèmes complexes, augmentent considérablement lorsqu'un traitement est nécessaire. Par exemple, la validation est souvent réalisée par le biais d'observations des propriétés internes des agents de la simulation. Les données étant nombreuses, hétérogènes et leurs unités et types – c.-à-d., quantitatif, qualitatif – étant différents, la détermination de la *proximité* d'une simulation à une réalité reste difficile et très coûteuse en temps de calcul. Cela est d'autant plus difficile que les informations considérées sont imparfaites.

Dans la littérature des systèmes multi-agents, deux familles de méthodes d'observation sont habituellement distinguées :

- l'observation basée sur les rapports d'agents¹³⁴. Ce type d'observation suppose que chaque agent du système envoie un message contenant les valeurs des propriétés à observer à un agent supervisant la validation [287] ;
- l'observation indirecte consiste à observer les conséquences des actions des agents – p. ex., communication, déplacement, etc. – pour inférer les valeurs des propriétés à observer [142].

Dans le cas de SOA, [199] rappelle que la plupart des plateformes de simulation disposent d'outils d'observation, fondés sur la notion de *sondage*¹³⁵. Un *agent-observateur*, est ainsi capable d'interroger l'ensemble des agents de la simulation pour avoir un accès direct aux propriétés à observer. L'article montre que la théorie des sondages – p. ex., [9, 163] –, se révèle être un outil adapté pour sélectionner *intelligemment* des agents et observer leurs propriétés, tout en réduisant les temps de calcul lorsque le nombre d'agents est grand, c.-à-d., plusieurs milliers.

¹³³Les principes et notations de ce chapitre s'inspirent du chapitre précédent. Le lecteur est invité à relire les sous-sections 3.2.1, 3.3.1, 3.3.2.1 et 3.4.3.3 avant de poursuivre la lecture.

¹³⁴En anglais, *report based monitoring*.

¹³⁵En anglais, *probing*.

4.1.1.2 Validation de SOA

Plusieurs travaux de la littérature introduisent des méthodologies de validation de simulations agents – p. ex. : [208, 42, 217, 289, 100], etc. Leurs motivations sont pourtant différentes de celles du SEAD : la validation n’y est utile qu’un nombre de fois limité pour des modèles dont la réalité de référence, souvent simplifiée, ne varie pas. Ces travaux s’appuient sur des procédures empiriques où une intervention de l’expert du domaine est nécessaire. Celui-ci intervient successivement pour valider des cas dénués de complexité et pour lesquels une connaissance *a posteriori* a déjà permis de réduire le *champ des possibles*.

Dans [292], les auteurs précisent d’ailleurs que ces méthodes, surtout issues de procédés de vérification et de validation de systèmes industriels – c.f., [19, chap. 10] –, se résument en des méthodes manuelles, d’analyse graphique ou visuelle des comportements de certains agents de la simulation.

Dans le cas du système d’aide à la décision, chaque nouveau cas réel considéré amène une réalité de référence différente. Lorsque les agents sont nombreux, que leurs interactions sont importantes et que la durée de simulation excède quelques minutes, il est inconcevable d’imposer une validation *manuelle* pour chaque modèle et chaque hypothèse¹³⁶. Même si de rares travaux proposent des algorithmes de validation ou utilisent des tests statistiques pour quantifier cette étape, p. ex. [219, 255, 204], aucune solution proposée dans le cadre des SOA ne fait à *notre connaissance* cohabiter :

1. une automatisation complète de la validation de SOA ;
2. un cadre formel pour représenter et manipuler les différentes informations, qualitatives et quantitatives ;
3. la prise en compte des temps de calcul exorbitants des SOA.

4.1.2 Motivations

Deux caractères essentiels des SOA, omis pour des raisons de clareté dans le chapitre 3, peuvent maintenant être rappelés : la *stochasticité* des événements et la *dynamique temporelle* des simulations :

- la stochasticité inhérente aux systèmes complexes ne permet pas à un modèle, initialisé avec un jeu de paramètres et exécuté à plusieurs reprises, de toujours reproduire le même état final. Le processus de *Validation* doit être adapté à ce *non-déterminisme* et être en mesure de contrôler la *stabilité statistique* des résultats d’un couple modèle/jeu de paramètres ;

¹³⁶De par la définition du SEAD, il semble difficile d’imposer à l’expert une présence constante pour effectuer les dizaines de validations nécessaires aux étalonnages des modèles. La sollicitation de l’expert doit être réduite aux étapes cruciales du SAD, p. ex. : observations de la réalité et participation au processus de *Retroaction*, c.f., p. 89.

- il est possible de tirer profit de l’aspect dynamique des simulations et d’adapter en conséquence le processus de *Validation*. Celui-ci, ayant été considéré de manière *statique* – c.-à-d., une seule validation en fin de simulation à t_{obs} , c.f., fig. p. 80 –, peut être dynamisé.

Ainsi, en intégrant ces dernières remarques et celles de la sous-section 4.1.1, le processus de *Validation* est étendu. Même s’il s’agit de systèmes complexes, il est possible que certaines dynamiques de paramètres soient connues ou estimées. C’est le cas, par exemple, de paramètres aux dynamiques monotones¹³⁷. L’anticipation des évolutions de ces paramètres et la prédiction, au cours du temps, de la validité des hypothèses testées sont alors envisageables.

Dans ce chapitre, la définition habituelle de la validation – c.-à-d., « *comparer le modèle au système réel* » – est alors élargie en une définition plus générale : « *vérifier si le modèle est toujours en accord avec le système réel* ». Cette nouvelle définition met implicitement en avant l’*aspect dynamique – temporel* – de la validation, négligé dans la définition initiale. La considération de cette définition, appliquée aux simulations orientées agents, vise à réduire les temps de calcul trop importants en *stoppant dynamiquement* les simulations, sans devoir attendre le pas de temps équivalent aux observations du système réel, c.-à-d., t_{obs} .

Exemple 10. *Cet exemple poursuit l’exemple 2 du chapitre précédent. Soit une simulation, notée x_1 , simulant l’évolution d’une société d’insectes. x_1 est initialisée avec un jeu de paramètres quelconque $\omega_n \in \Omega$ et lancée à un pas de temps $t_n \in [t_{init}, t_{obs}]$.*

Au cours de la simulation, à l’instant $t_v < t_{obs}$, si le nombre d’individus de la société devient nul – c.-à-d. que la société est morte – tandis que les observations réelles à t_{obs} révèlent que la société est en plein essor, il est inutile de poursuivre la simulation. La simulation peut être stoppée et une autre hypothèse ω_n testée.

Dans ce chapitre, le principe d’*agentification*¹³⁸ est retenu et des *Agents-Validation sondent* les agents de la simulation. La théorie des fonctions de croyance est présentée comme l’outil de représentation et de manipulation des informations du processus de *Validation*. Ce formalisme est utilisé pour manipuler les messages échangés par les agents de la simulation interrogés. La section suivante rappelle certaines notations introduites dans le chapitre précédent et présente l’architecture pyramidale de *Validation*. Cette architecture est ensuite vue d’une manière plus globale dans le SEAD, c.f., section 4.3.

¹³⁷Le taux de développement d’un insecte est un exemple de paramètre dont la dynamique est connue, croissante, c.f., partie III.

¹³⁸C.f., note de bas de page 131 : expression signifiant qu’un acteur ou un objet, même non-actant, d’un système réel est modélisé par un agent dans le SAD.

4.2 Validation évidentielle dynamique de SOA

4.2.1 Notations, principes et architecture pyramidale

Système et modèles Soit un système réel $x_{\text{réel}}$ et ses modèles multi-agents x_s , $\forall s \in [1, S]$, évoluant tous dans l'intervalle de temps $[t_{\text{init}}, t_{\text{obs}}]$. La variable t_{init} est l'instant de création du système réel et t_{obs} est l'instant des observations du système réel. Le système et ses modèles sont caractérisés par un ensemble de paramètres $P = \{p_1, \dots, p_i, \dots, p_I\}$ dont les domaines respectifs de définition $\{\Delta_1, \dots, \Delta_i, \dots, \Delta_I\}$ sont connus.

Observations réelles A l'instant t_{obs} , un expert fournit un vecteur à I dimensions correspondant à ses croyances sur les valeurs des paramètres P du système réel. Ce vecteur est noté $\omega_{\text{obs}} \in \Omega$, où Ω est l'ensemble des vecteurs de croyances sur les valeurs des paramètres P . Les I composantes de ω_{obs} sont des fonctions de croyance, exprimées sur les cadres de discernement Δ_i et notées : $m^{\omega_{\text{obs}}, \Delta_i}[p_i]$. Le vecteur ω_{obs} est considéré comme l'unique réalité de référence des modèles x_s .

Agentifications de l'Observation et validations intermédiaires La stratégie de validation adoptée consiste à *agentifier* chaque paramètre P d'une simulation. Ces derniers deviennent alors à la fois des acteurs du processus d'*Observation* et des sources du processus de *Validation*.

Ainsi, soit un modèle x_s quelconque, initialisé avec un vecteur $\omega_n \in \Omega$, lancé à l'instant $t_n \in [t_{\text{init}}, t_{\text{obs}}]$ et composé d'agents de simulation $Ag = \{ag_1, \dots, ag_j, \dots, ag_J\}$. Au cours de la simulation, dans l'intervalle de temps $[t^-, t^+] \subseteq [t_n, t_{\text{obs}}]$, chaque *Agent-Paramètre* p_i tente d'effectuer une validation locale en répondant à la question suivante :

Q_{val} : “Considérant le jeu de paramètres d'initialisation $\omega_n \in \Omega$, la simulation est-elle toujours en accord avec la réalité $\omega_{\text{obs}} \in \Omega$, donnée par l'expert à l'instant t_{obs} ?”

Chaque p_i répond à la question Q_{val} quand il en est capable, en fonction de ses disponibilités, entre la contrainte de temps minimale t^- et la contrainte de temps maximale t^+ . Pour répondre à cette première question, il dispose d'une capacité de sondage d'un ensemble d'agents appropriés $Ag' \subseteq Ag$ à qui il adresse une question subsidiaire Q_{obs} :

Q_{obs} : “Quelle est la valeur du paramètre p_i ?”

Un agent de Ag' , devenu une source du processus d'*Observation*, répond à cette question sous la forme d'une fonction de croyance exprimée sur le cadre de discernement Δ_i , à un instant $t_v \in [t^-, t^+]$. Une fois réceptionnées, les réponses de ces agents sont manipulées puis combinées par p_i pour que ce dernier puisse répondre à la question initiale Q_{val} . Cette opération est effectuée par comparaison des croyances de l'expert à t_{obs} aux siennes

à t_v . La réponse de p_i est formalisée par une fonction de croyance exprimée sur le cadre $\Theta = \{oui, non\}$ et envoyée à un agent supérieur responsable des P Agents-Paramètre.

Architecture pyramidale Dans la plupart des plateformes de simulations multi-agents, la simulation est contrôlée – c.-à-d., lancement de la simulation, création des agents, etc. – par un agent appelé *Agent-Launcher*¹³⁹. Dans ces plateformes, cet agent initialise habituellement la simulation et lance les agents *Ag* de la simulation. Dans l’architecture proposée, l’*Agent-Launcher* lance également l’*Agent-Validation* nécessaire à la validation de la simulation et responsable des *Agents-Paramètre P*.

Le processus de *Validation* est décomposable en deux niveaux. L’architecture peut être qualifiée de pyramidale, en raison du nombre croissant d’agents impliqués à chacun des niveaux, de l’*Agent-Launcher* aux agents de la simulation *Ag*, c.f., figure 4.1.

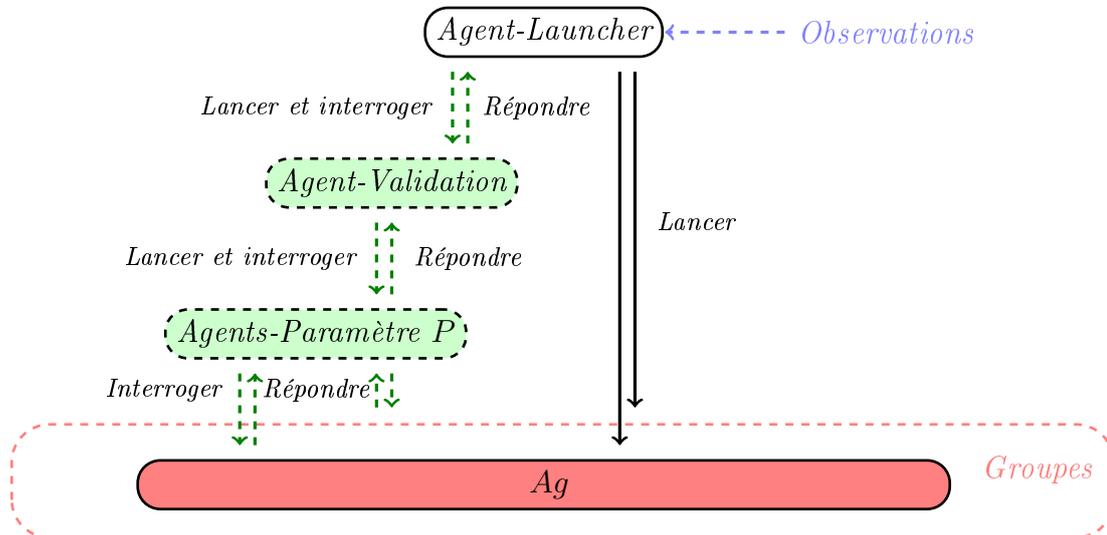


FIG. 4.1 – Architecture pyramidale de validation évidentielle. Les agents en vert sur la figure correspondent aux acteurs de la validation. Les flèches vertes et en pointillés caractérisent l’aspect évidentiel des messages échangés.

Ci-dessous, la présentation poursuit le cheminement logique des fonctions de masse de croyance : du bas – à partir des agents ag_j – vers le haut de la pyramide – vers l’*Agent-Launcher*.

¹³⁹De l’anglais *to launch* signifiant *lancer* ; nom utilisé par exemple dans la plateforme MadKit, c.f. sous-section 1.4.4.4.

4.2.2 Comportement des agents *sondés* ag_j

4.2.2.1 Cycle de vie

A chaque pas de temps, après son cycle de vie habituel, un agent de la simulation ag_j vérifie qu'un message Q_{obs} ne lui est pas parvenu d'un *Agent-Paramètre* p_i . Lorsqu'il est contacté à t^- , s'il est concerné par cette requête, il garde en mémoire la question et sa limite de temps t^+ associée. En fonction de son activité, entre les pas de temps t^- et t^+ , il peut répondre à la question. A $t_v \in [t^-, t^+]$, ag_j répond à la question en envoyant un message sous forme d'une fonction de croyance à p_i , exprimée sur le cadre de discernement Δ_i .

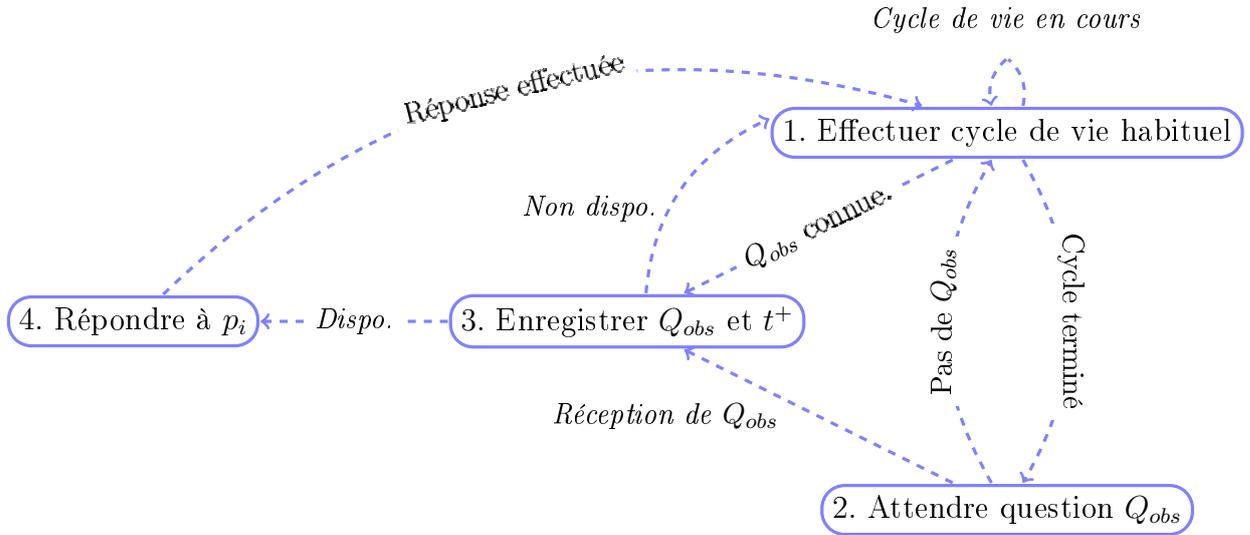


FIG. 4.2 – Comportement d'un agent $ag_j \in Ag'$, $Ag' \subseteq Ag$.

4.2.2.2 Processus évidentiel d'*Observation*

A l'instant $t_v \in [t^-, t^+]$, pour répondre à la question Q_{obs} , un agent $ag_j \in Ag'$ dispose de nombreuses manières pour estimer ses croyances sur la valeur du paramètre p_i . Comme remarqué dans l'introduction de la section 2.4 du chap. 2, l'étape d'estimation reste fortement subjective et liée à l'application.

Les présents travaux ne se limitent qu'à des paramètres internes aux agents ag_j . Ces derniers ont donc une complète visibilité de leurs valeurs et peuvent s'exprimer avec certitude. Préalablement, des connaissances empiriques sur l'imprécision de certains paramètres peuvent être connues et la méthode d'estimation peut en tenir compte ; relire à ce sujet l'exemple 7, p. 84 sur la précision de 10% d'un paramètre. De plus, même si l'intérêt des fonctions de croyance est ici limité, il est possible que la croyance de ag_j soit totalement précise et certaine – c.-à-d. que la fonction de masse est catégorique et bayésienne ; relire l'exemple 6, p. 83.

Ainsi, pour une simulation x_s , après avoir été sollicité par un *Agent-Paramètre* p_i , un agent ag_j répond à la question Q_{obs} , à l'instant t_v , par l'intermédiaire d'une fonction de masse notée : ${}^{t_v}m_{x_s, ag_j}^{\omega_n, \Delta_i}[p_i]$.

4.2.3 Comportement des *Agents-Paramètre* p_i

4.2.3.1 Cycle de vie

Comme illustré dans la figure 4.3, une fois lancé, un *Agent-Paramètre* p_i :

1. attend la sollicitation d'un *Agent-Validation* ;
2. sélectionne un groupe d'agents $Ag' \subseteq Ag$ à sonder ;
3. informe les agents de Ag' de la question Q_{obs} ;
4. communique la limite de temps t^+ fournie par son *Agent-Validation* ;
5. lorsque l'ensemble des agents de Ag' a répondu ou que la limite de temps t^+ est dépassée, il manipule et combine les réponses ;
6. à partir de la croyance $m^{\omega_{obs}, \Delta_i}[p_i]$ et de la combinaison des réponses obtenues, il répond alors à la question initiale de l'*Agent-Validation*.

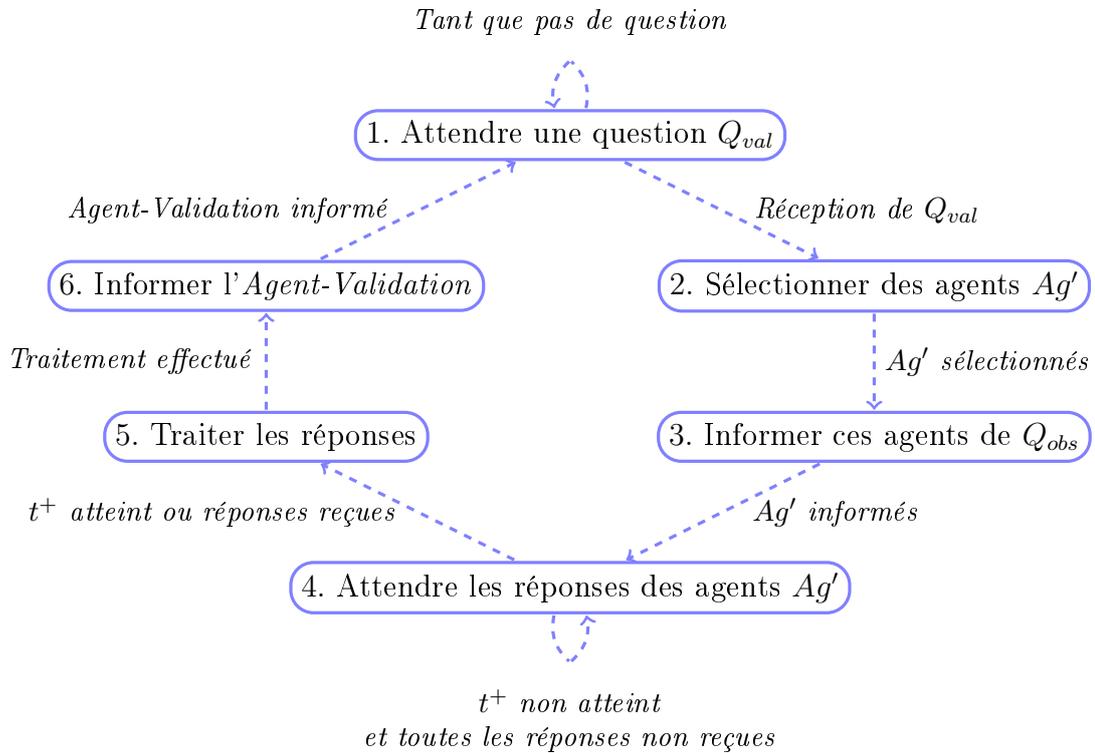


FIG. 4.3 – Comportement d'un *Agent-Paramètre* p_i .

4.2.3.2 Gestion des croyances par un *Agent-Paramètre* p_i

Aux différents instants t_v compris entre les bornes $[t^-, t^+]$, un *Agent-Paramètre* p_i reçoit l'ensemble des réponses de ses agents Ag' . Pour chaque réponse ${}^{t_v}m_{x_s, ag_j}^{\omega_n, \Delta_i}[p_i]$ reçue, il effectue deux opérations successives pour pouvoir finalement effectuer une combinaison et aboutir à sa croyance en la validité du paramètre :

- une transformation à partir d'une mesure de distance, permettant d'obtenir la croyance en la validité du paramètre supportée par un agent ag_j ;
- un affaiblissement *temporel*.

Mesure de distance entre deux fonctions de masse Une opération notée f_{val} , est d'abord nécessaire pour exprimer la croyance en la validité du paramètre p_i à partir des croyances d'un agent ag_j . Cette nouvelle croyance est fonction de la comparaison entre les croyances de l'expert $m^{\omega_{obs}, \Delta_i}[p_i]$ et celles de l'agent ${}^{t_v}m_{x_s, ag_j}^{\omega_n, \Delta_i}[p_i]$. Elle s'exprime dans le cadre Θ et est notée : ${}^{t_v}m_{x_s, ag_j}^{\omega_n, \Theta}[{}^{t_v}m_{x_s, ag_j}^{\omega_n, \Delta_i}[p_i]]$ ou ${}^{t_v}m_{x_s, ag_j}^{\omega_n, \Theta}$ et peut être obtenue grâce à une *mesure de distance*, notée $Dist$, entre les deux fonctions de masse ${}^{t_v}m_{x_s, ag_j}^{\omega_n, \Delta_i}[p_i]$ et $m^{\omega_{obs}, \Delta_i}[p_i]$.

Une distance correspond à une mesure de dissimilarité entre deux fonctions de masse. Le choix d'une distance adaptée n'est pas aisé, en particulier parce que de nombreuses propositions ont déjà été faites dans la littérature. Un large panorama des mesures existantes a récemment été présenté dans [138]. Ce manuscrit ne présente que la mesure la plus fréquemment utilisée : la distance de Jusselme [137].

La distance de Jusselme entre deux fonctions de masse m_1 et m_2 , définies sur un même cadre de discernement Δ_i , est donnée par :

$$Dist(m_1, m_2) = \sqrt{\frac{1}{2} (||m_1||^2 + ||m_2||^2 - 2 \cdot \langle m_1, m_2 \rangle)}, \quad (4.1)$$

où $\langle m_1, m_2 \rangle$ est défini par :

$$\langle m_1, m_2 \rangle = \sum_{A_x \subseteq \Delta_i} \sum_{A_y \subseteq \Delta_i} m_1(A_x) m_2(A_y) \frac{|A_x \cap A_y|}{|A_x \cup A_y|}. \quad (4.2)$$

Dans l'équation 4.1, la valeur $||m||^2$ est donnée par : $||m||^2 = \langle m, m \rangle^{140}$. La distance varie entre 0 – si les deux fonctions de masse sont identiques – et 1 – si elles sont complètement conflictuelles.

Ainsi, pour les deux fonctions de masse ${}^{t_v}m_{x_s, ag_j}^{\omega_n, \Delta_i}[p_i]$ et $m^{\omega_{obs}, \Delta_i}[p_i]$, leur distance est obtenue par :

$$0 \leq Dist({}^{t_v}m_{x_s, ag_j}^{\omega_n, \Delta_i}[p_i], m^{\omega_{obs}, \Delta_i}[p_i]) \leq 1. \quad (4.3)$$

¹⁴⁰Dans l'éq. 4.2, l'indice $\frac{|A_x \cap A_y|}{|A_x \cup A_y|}$, $\forall A_x, A_y \in 2^{\Delta_i}$, correspond à l'indice de Jaccard, il évalue la proximité entre les ensembles A_x et A_y . D'autres indices ont été développés, c.f., [138].

Obtention de la validité du paramètre à partir d'une mesure de distance Pour exprimer sa croyance en la validité du paramètre, à partir de la seule croyance d' ag_j , l'*Agent-Paramètre* p_i effectue une opération, notée f_{val} , définie par :

$${}^{t_v}m_{x_s,ag_j}^{\omega_n,\Theta} = f_{val}(Dist({}^{t_v}m_{x_s,ag_j}^{\omega_n,\Delta_i}[p_i], m^{\omega_{obs},\Delta_i}[p_i])). \quad (4.4)$$

Plus précisément, f_{val} est décomposable en trois fonctions f_{oui} , f_{non} et f_{Θ} , telles que :

$$\begin{cases} {}^{t_v}m_{x_s,ag_j}^{\omega_n,\Theta}(\{oui\}) &= f_{oui}(Dist({}^{t_v}m_{x_s,ag_j}^{\omega_n,\Delta_i}[p_i], m^{\omega_{obs},\Delta_i}[p_i])); \\ {}^{t_v}m_{x_s,ag_j}^{\omega_n,\Theta}(\{non\}) &= f_{non}(Dist({}^{t_v}m_{x_s,ag_j}^{\omega_n,\Delta_i}[p_i], m^{\omega_{obs},\Delta_i}[p_i])); \\ {}^{t_v}m_{x_s,ag_j}^{\omega_n,\Theta}(\{\Theta\}) &= f_{\Theta}(Dist({}^{t_v}m_{x_s,ag_j}^{\omega_n,\Delta_i}[p_i], m^{\omega_{obs},\Delta_i}[p_i])). \end{cases} \quad (4.5)$$

Ces trois fonctions, définies de $[0, 1]$ dans 2^{Θ} , dans le cadre de ces travaux, sont de la forme représentée par la figure 4.4.

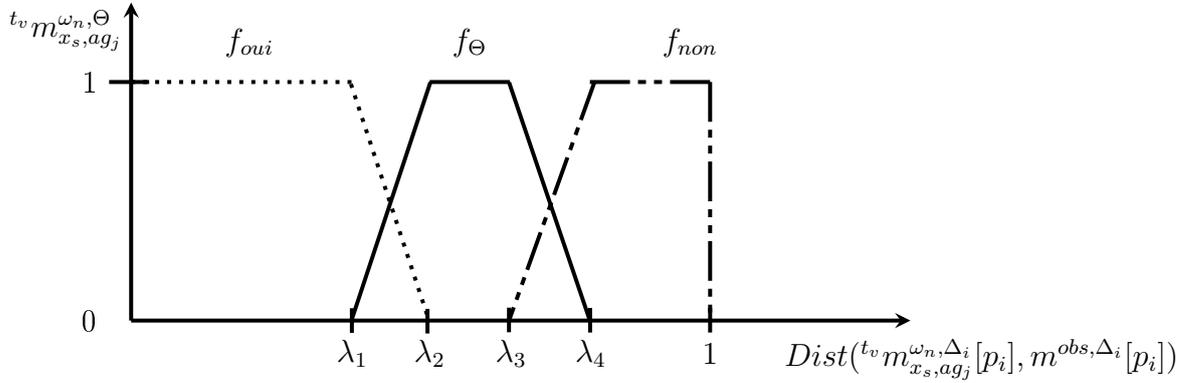


FIG. 4.4 – Passage d'une fonction de masse exprimée sur Δ_i à une fonction de masse exprimée sur Θ . Cette opération effectue un passage de la croyance ${}^{t_v}m_{x_s,ag_j}^{\omega_n,\Delta_i}[p_i]$ sur la valeur du paramètre p_i , vue par un agent ag_j , à une croyance sur la validité de ce paramètre, ${}^{t_v}m_{x_s,ag_j}^{\omega_n,\Theta}$, à l'instant t_v . L'expression $Dist({}^{t_v}m_{x_s,ag_j}^{\omega_n,\Delta_i}[p_i], m^{\omega_{obs},\Delta_i}[p_i])$ correspond à la mesure de distance entre les croyances de ag_j et les observations de l'expert. Les valeurs $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ et λ_4 correspondent à des seuils, actuellement définis de manière empirique. Ainsi, par exemple, lorsque les croyances de l'agent sont absolument identiques à celles de l'expert, alors : $Dist({}^{t_v}m_{x_s,ag_j}^{\omega_n,\Delta_i}[p_i], m^{\omega_{obs},\Delta_i}[p_i]) = 0$ et ${}^{t_v}m_{x_s,ag_j}^{\omega_n,\Theta}(\{oui\}) = 1$.

Affaiblissement temporel La combinaison des fonctions de masse ${}^{t_v}m_{x_s,ag_j}^{\omega_n,\Theta}$ des agents $ag_j \in Ag'$ n'est possible que lorsque tous ont répondu à l'*Agent-Paramètre* p_i , c.-à-d., au maximum à l'instant t^+ . Pour que cela soit possible à cet instant t^+ , une opération d'affaiblissement, inspirée du *principe de l'oubli*¹⁴¹, affaiblit les croyances dans le temps. Ce principe, issu de travaux sur la mémoire, considère que l'information accumulée diminue constamment, de manière asymptotique, sans tendre vers un oubli total [285, p. 344].

¹⁴¹En anglais, *memory decay theory*.

Dans le cadre des fonctions de croyance, ce principe a été repris et appliqué par P. Smets dans [253]. Ainsi, à partir de l'équation d'affaiblissement – eq. 2.30, p. 58 –, le facteur d'affaiblissement devient une fonction du temps ; où $\alpha(t^-) = 1$ et $\lim_{t_v \rightarrow t^+} \alpha(t_v) = 0$ – c.f., fig. 4.5.

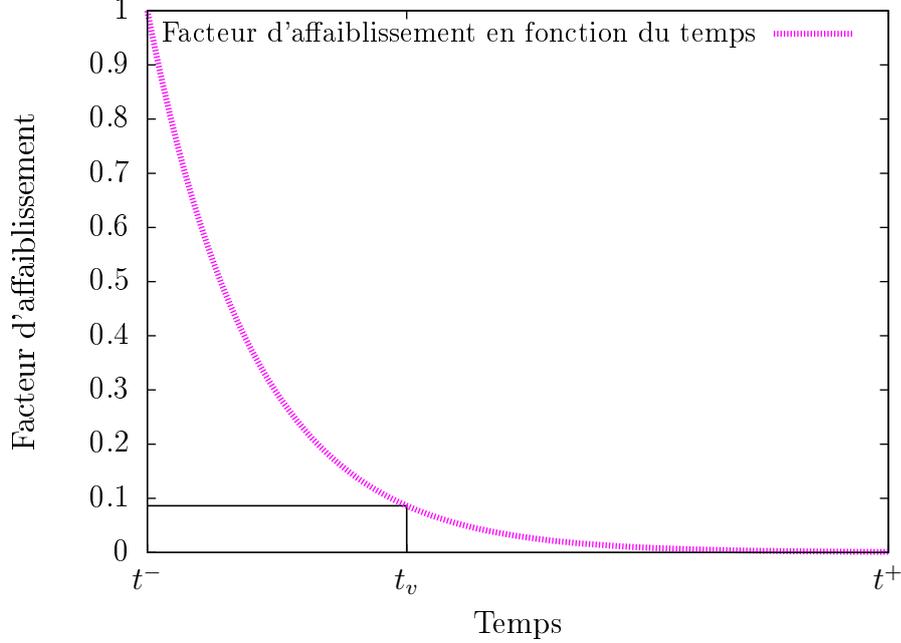


FIG. 4.5 – *Facteur d'affaiblissement en fonction de t_v . Par exemple, une fonction de masse est émise par ag_j à l'instant t_v . A t^+ , lorsque l'Agent-Paramètre p_i souhaite manipuler cette croyance, il estime que celle-ci a évolué depuis son émission et l'affaiblit en conséquence, $\alpha(t_v) = 0.09$.*

La nouvelle croyance ${}^{t^+}m_{x_s, ag_j}^{\omega_n, \Theta}$ exprimant la validité du paramètre p_i , à partir des croyances de l'agent ag_j , à l'instant t^+ peut être obtenue de l'expression suivante :

$${}^{t^+}m_{x_s, ag_j}^{\omega_n, \Theta} = Disc({}^{t_v}m_{x_s, ag_j}^{\omega_n, \Theta}, \alpha(t_v)), \quad \forall ag_j \in Ag'. \quad (4.6)$$

Combinaison des croyances Enfin, pour obtenir la fonction de masse ${}^{t^+}m_{x_s, p_i}^{\omega_n, \Theta}$ relative à la validité du paramètre p_i à l'instant t^+ , l'Agent-Paramètre p_i combine toutes les fonctions de masse ${}^{t^+}m_{x_s, ag_j}^{\omega_n, \Theta}$ avec la règle prudente proposée par T. Dencœur – c.f., eq. 2.21, p. 56 – :

$${}^{t^+}m_{x_s, p_i}^{\omega_n, \Theta} = \bigwedge_{ag_i \in Ag'} {}^{t^+}m_{x_s, ag_j}^{\omega_n, \Theta}. \quad (4.7)$$

Dans ce contexte, la règle de combinaison prudente est préférée pour sa propriété d'idempotence : les agents Ag' , dont sont issues les croyances initiales, ne peuvent être considérés comme distincts – p. ex., ils évoluent avec les mêmes modèles de comportement, peuvent interagir, etc.

4.2.4 Comportement de l'Agent-Validation

4.2.4.1 Cycle de vie

Au niveau le plus élevé de la *Validation*, l'*Agent-Validation* contrôle la globalité du processus, c.f., fig. 4.6. Après avoir été créé par l'*Agent-Launcher*, il lance les *Agents-Paramètre* – dont le nombre peut varier en fonction des observations fournies par l'expert. Une fois en cours de fonctionnement, il :

1. détermine les prochaines limites de temps t^- et t^+ ;
2. lance les *Agents-Paramètre* en leur transmettant la question Q_{val} ;
3. les informe :
 - des agents Ag susceptibles de les aider à répondre à la question ;
 - de la croyance $m^{\omega_{obs}, \Delta_i}[p_i]$ de l'expert ;
 - des limites de temps t^- et t^+ entre lesquelles les *Agents-Paramètre* doivent répondre ;
4. manipule et combine, après leur réception ou lorsque la limite t^+ est atteinte, les réponses pour obtenir la croyance en la validité de la simulation ;
5. informe son *Agent-Launcher* de l'état de la simulation si la croyance sur le singleton $\{non\}$ est supérieure à celle du singleton $\{oui\}$ – c.-à-d. que la simulation n'est plus valide – ;
6. recommence son cycle à l'étape 1 sinon.

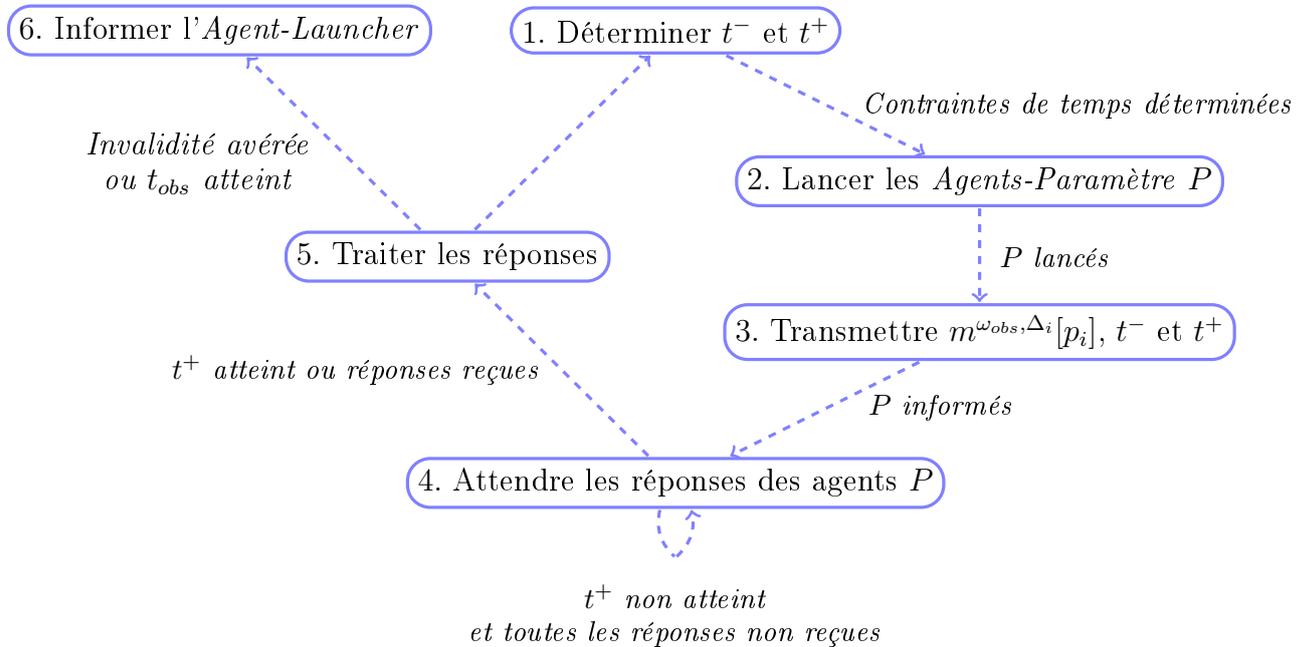


FIG. 4.6 – Comportement de l'Agent-Validation.

Dans le cadre des présents travaux, les contraintes de temps sont estimées empiriquement – voir p. ex., partie III –, en fonction de connaissances de l’expert sur les dynamiques de certains paramètres. La validation est effectuée de manière cyclique et les *Agents-Paramètre* répondent donc périodiquement à la question Q_{val} . Cela se déroule, au maximum, jusqu’à la fin de la simulation – c.-à-d., t_{obs} – ou jusqu’à ce que l’invalidité soit constatée. Dans le cas d’architectures plus évoluées, aux contraintes plus élaborées, des techniques basées sur les *plans de sondage* [9] peuvent être mises en place afin que l’*Agent-Validation* définisse plus judicieusement les intervalles de sondages.

A l’instant t^+ , l’*Agent-Validation* manipule et combine les réponses reçues de ses agents p_i subordonnés. Selon le résultat de la combinaison, il est à même de contacter l’*Agent-Launcher* pour l’informer de l’état de la simulation en cours. Ce dernier stoppe alors la simulation et envoie l’état de la simulation au processus de *Mise à jour* – c.f., description p. 79 et 86. Cet état est représenté par une fonction de croyance également exprimée sur $\Theta = \{oui, non\}$.

Remarque 4. *Le lecteur remarquera que, lorsque $t^- = t^+ = t_{obs}$, à l’instant t_{obs} , la définition de la validation « vérifier si le modèle est toujours en accord avec le système réel » est équivalente à la définition initiale « comparer les résultats du modèle aux mesures effectuées sur le système réel ».*

4.2.4.2 Combinaison finale

Parce que les *Agents-Paramètre* ne sondent pas les mêmes agents Ag' et qu’ils estiment la validité de paramètres différents, ils peuvent être considérés indépendants¹⁴². La règle conjonctive semble adaptée et la validité de la simulation x_s , à l’instant t^+ , est obtenue avec l’équation suivante :

$${}^{t^+}m_{x_s}^{\omega_n, \Theta} = \bigodot_{p_i \in P} {}^{t^+}m_{x_s, p_i}^{\omega_n, \Theta}. \quad (4.8)$$

Une fois, cette dernière fonction de masse ${}^{t^+}m_{x_s}^{\omega_n, \Theta}$ obtenue, une transformation pignistique est effectuée par l’*Agent-Validation*. Ainsi, lorsque ${}^{t^+}BetP_{x_s}^{\omega_n, \Theta}(\{non\})$ devient supérieure à ${}^{t^+}BetP_{x_s}^{\omega_n, \Theta}(\{oui\})$, alors la simulation n’est plus considérée comme valide et la fonction de masse ${}^{t^+}m_{x_s}^{\omega_n, \Theta}$ est envoyée à l’*Agent-Launcher*.

Une schématisation du processus global de *Validation* est visible sur la figure 4.7.

¹⁴²En référence au premier chapitre, l’indépendance est une considération critiquable et des travaux sur l’impact des opérateurs dans un tel contexte sont actuellement en cours – c.f., sous-section 2.3.3.1, p. 50.

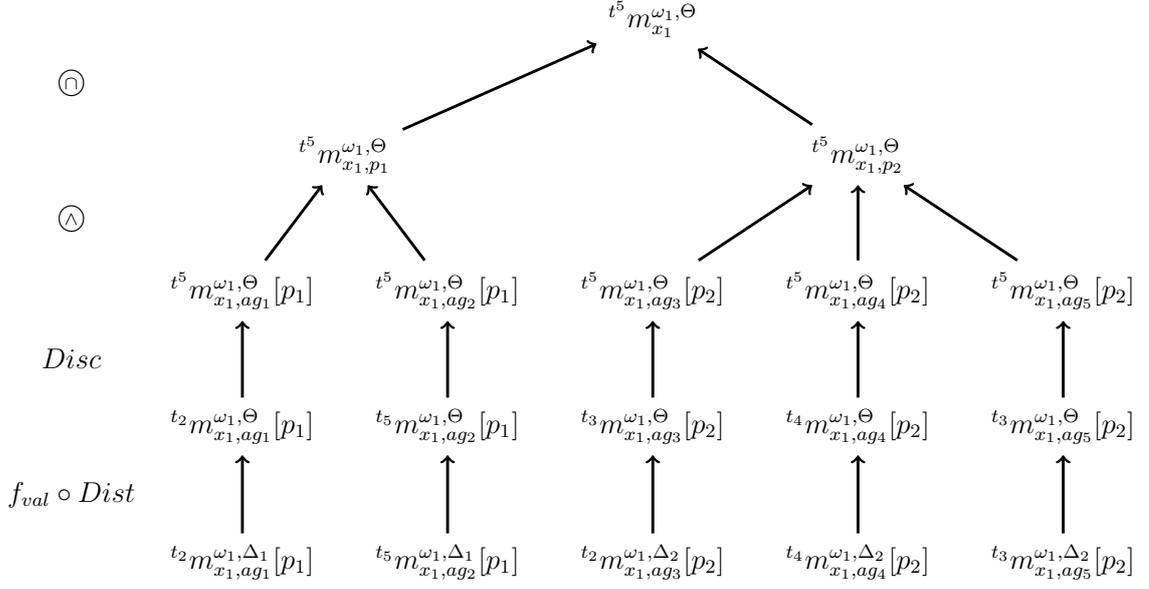


FIG. 4.7 – Exemple de Validation avec cinq agents de simulation, deux paramètres, entre les limites de temps $t^- = t_1$ et $t^+ = t_5$.

4.2.5 Comportement de l'Agent-Launcher

4.2.5.1 Fin et validité d'une simulation

La tâche de clôture d'une simulation revient à l'Agent-Launcher. Lorsque ce dernier reçoit la fonction de masse de son Agent-Validation, cela signifie :

1. soit, que la simulation est terminée sans que l'invalidité ait été constatée par l'Agent-Validation – c.-à-d., t_{obs} est atteint – ;
2. soit, que la simulation n'est plus valide et que l'instant t_{obs} n'est pas atteint – c.-à-d., réception à $t^+ < t_{obs}$.

Dans le cas 1., la validité de la simulation est représentée par la fonction de croyance $m_{x_s}^{\omega_n, \Theta} = t_{obs} m_{x_s}^{\omega_n, \Theta}$. Dans le cas 2., si la simulation est stoppée à l'instant $t^+ \neq t_{obs}$, une dernière opération d'affaiblissement est réalisée. Cette opération s'inspire de l'opération d'affaiblissement donnée par l'équation 4.6 et la figure 4.5 ; où ici, $\alpha(t_n) = 1$ et $\lim_{t^+ \rightarrow t_{obs}} \alpha(t^+) = 0$. La fonction de croyance affaiblie, représentant la croyance à l'instant t_{obs} , peut être déduite de l'expression suivante :

$$m_{x_s}^{\omega_n, \Theta} = Disc(t^+ m_{x_s}^{\omega_n, \Theta}, \alpha(t^+)). \quad (4.9)$$

4.2.5.2 Gestion de la stochasticité

Comme l'introduisait la section 4.1.2, la stochasticité des systèmes complexes implique que des résultats différents peuvent être produits à partir de jeux de paramètres identiques.

Pour prendre en compte cette stochasticité dans la validité, l'*Agent-Launcher* ré-exécute Φ fois un même simulateur x_s avec un même jeu de paramètres ω_n et combine les Φ fonctions de masse, obtenues de l'équation 4.9, $\{m_{x_s,1}^{\omega_n,\Theta}, \dots, m_{x_s,\phi}^{\omega_n,\Theta}, \dots, m_{x_s,\Phi}^{\omega_n,\Theta}\}$ ¹⁴³ :

$$m_{x_s}^{\omega_n,\Theta} = \bigotimes_{\phi=1}^{\Phi} m_{x_s,\phi}^{\omega_n,\Theta}. \quad (4.10)$$

La valeur Φ est actuellement estimée empiriquement, p. ex., $\Phi = 10$. La combinaison prudente est à nouveau préférée, considérant que les Φ « sources » ne peuvent être considérées indépendantes.

4.2.6 Algorithme de synthèse

Le processus général de *Validation*, est résumé par l'algorithme 2 :

Entrées : $x_s, \omega_n, \omega_{obs}$

Sorties : $m_{x_s}^{\omega_n,\Theta}$

Début

// Initialisation :

$m_{x_s}^{\omega_n,\Theta}(\{\Theta\}) = 1$; $\phi = 1$;

Répéter

// $\phi^{\text{ème}}$ répétition :

Lancer x_s avec ω_n , à t_n ;

Répéter

 Sélectionner $t_v \in [t_n, t_{obs}]$ avec $t_v \in [t^-, t^+]$;

 // c.f., eq. 4.8 :

 Calculer $t^+ m_{x_s,\phi}^{\omega_n,\Theta}$;

Jusqu'à $t^+ > t_{obs}$ ou $t^+ \text{Bet}P_{x_s,\phi}^{\omega_n,\Theta}(\{non\}) > t^+ \text{Bet}P_{x_s,\phi}^{\omega_n,\Theta}(\{oui\})$

Si $t^+ < t_{obs}$ **Alors**

 // c.f., eq. 4.9 :

$m_{x_s,\phi}^{\omega_n,\Theta} = \text{Disc}(t^+ m_{x_s,\phi}^{\omega_n,\Theta}, \alpha(t^+))$;

Sinon

$m_{x_s,\phi}^{\omega_n,\Theta} = t^+ m_{x_s}^{\omega_n,\Theta}$;

Fin

$\phi = \phi + 1$;

Jusqu'à $\phi > \Phi$

// c.f., eq. 4.10 :

$m_{x_s}^{\omega_n,\Theta} = m_{x_s}^{\omega_n,\Theta} \bigotimes m_{x_s,\phi}^{\omega_n,\Theta}$;

Fin

Algorithme 2: Algorithme général du processus de *Validation*.

¹⁴³Pour ne pas alourdir la présentation, l'indice *temporaire* ϕ de l'expression $m_{x_s,\phi}^{\omega_n,\Theta}$ n'est utilisé que sur cette page.

4.3 Liens avec le processus de Manipulation_s

Pour un modèle $x_s, \forall s \in [1, S]$, l'objectif du SEAD est de déterminer le meilleur jeu de paramètres $\omega_n, \forall n \in [1, N]$. Comme le montre la figure 3.7, p. 88, le processus de *Validation* est entouré des processus de *Sélection* et de *Mise à jour*; ce dernier étant lui-même suivi du processus de *Manipulation_s*. Les processus de *Sélection* et de *Mise à jour* n'ont été abordés que succinctement dans le cadre de cette thèse, ils s'inspirent actuellement de [195] et [194]. Le processus de *Manipulation_s*, introduit p. 87, est détaillé ci-dessous.

4.3.1 Processus de Manipulation_s et extension vide

Considéré comme une finalisation du processus d'*Etalonnage*, le processus de *Manipulation_s* participe à la question :

Q_{manip} : “Quel est le meilleur jeu de paramètres ω_n du modèle x_s ?”

Pour y répondre, grâce aux N fonctions de masse $m_{x_s}^{\omega_n, \Theta}$ issues du processus de *Validation*, il est impératif de changer de cadre de discernement pour atteindre le cadre Ω . Le cadre de discernement Ω étant un raffinement de Θ , chaque information $m_{x_s}^{\omega_n, \Theta}$ peut être exprimée sur Ω à l'aide d'une opération d'extension vide – c.f., eq. 2.28, p. 58 – :

$$m_{x_s}^{\omega_n, \Omega}(\rho_{manip}(A)) = m_{x_s}^{\omega_n, \Theta}(A), \quad \forall A \subseteq \Theta, \quad (4.11)$$

où ρ_{manip} est le raffinement de Θ dans Ω , illustré par la figure 4.8 et défini par $\rho_{manip}(\{oui\}) = \{\omega_n\}$ et $\rho_{manip}(\{non\}) = \overline{\{\omega_n\}}$.

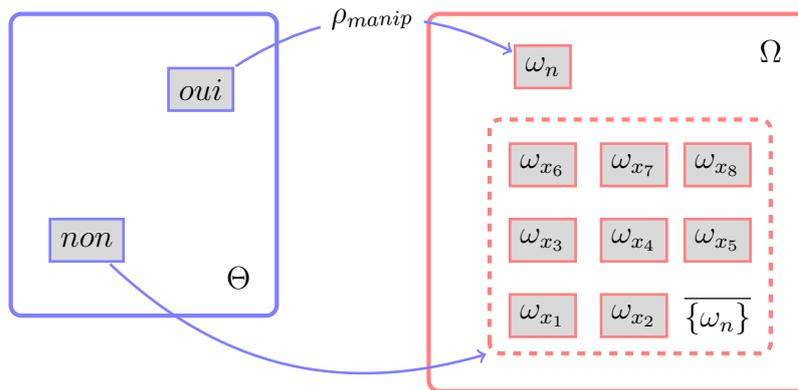


FIG. 4.8 – Grossissement Θ de Ω , avec le raffinement ρ_{maj} de Θ .

Ainsi, pour tout $\omega_n \in \Omega$:

$$\begin{cases} m_{x_s}^{\omega_n, \Omega}(\{\omega_n\}) & = m_{x_s}^{\omega_n, \Theta}(\{oui\}) ; \\ m_{x_s}^{\omega_n, \Omega}(\overline{\{\omega_n\}}) & = m_{x_s}^{\omega_n, \Theta}(\{non\}) ; \\ m_{x_s}^{\omega_n, \Omega}(\Omega) & = m_{x_s}^{\omega_n, \Theta}(\Theta). \end{cases} \quad (4.12)$$

4.3.2 Combinaison finale

Lorsque toutes les fonctions de masse $m_{x_s}^{\omega_n, \Theta}$ ont été raffinées sur Ω , il est finalement possible de les combiner avec la règle de combinaison conjonctive :

$$m_{x_s}^{\Omega} = \bigodot_{\omega_n \in \Omega} m_{x_s}^{\omega_n, \Omega}. \quad (4.13)$$

A partir de cette fonction de masse $m_{x_s}^{\Omega}$, une transformation pignistique peut être effectuée, notée $BetP_{x_s}^{\Omega}$, qui, lorsqu'elle est maximisée, fait apparaître le meilleur jeu de paramètres permettant à la simulation x_s de reproduire les observations ω_{obs} délivrées par l'expert.

Le processus de *Manipulation_s* – sans les détails des processus de *Sélection* et de *Mise à jour* – est illustré dans la figure 4.9 :

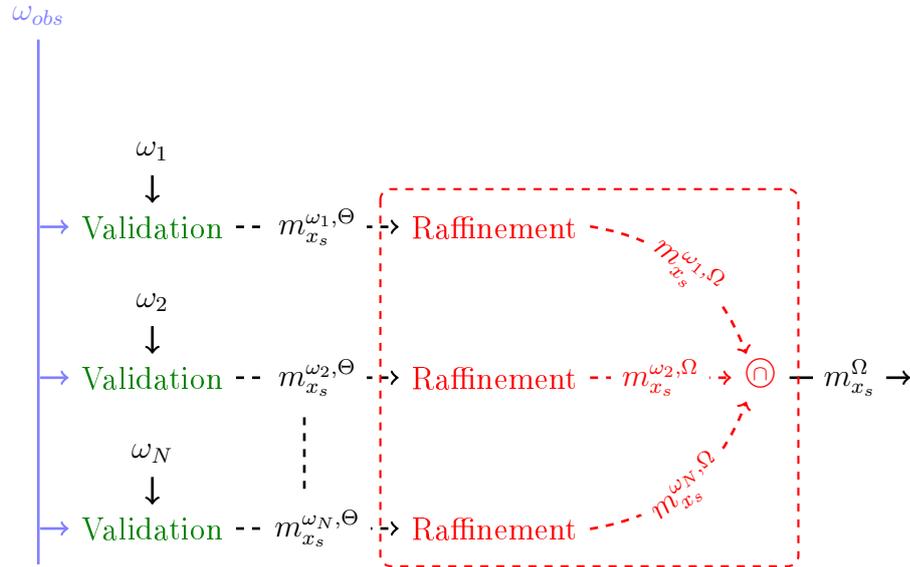


FIG. 4.9 – Présentation du processus évidentiel de *Manipulation_s* – en rouge et en pointillés – succédant le processus de *Validation* – eq. 4.12 et 4.13.

4.4 Conclusions et perspectives

Dans ce quatrième chapitre, une architecture de validation évidentielle et dynamique de simulations multi-agents a été présentée – section 4.2. Un lien a également été fait avec le processus de *Manipulation_s* du SEAD – section 4.3. Les avantages majeurs d’une telle architecture sont :

- la prise en compte de la dynamique des simulations agents pour la réduction des temps de calcul ;
- la considération de la stochasticité des simulations ;
- et l’utilisation du cadre formel proposé par les fonctions de croyance.

Le processus actuel de *Validation* se limite à la considération de paramètres internes aux agents ag_j de la simulation. L’intégration des propriétés des *groupes* d’agents est évidente puisque, bien souvent, ceux-ci sont *agentifiés* au sein des plateformes de simulations agents : le sondage d’un groupe devient identique au sondage d’un agent.

Les recherches futures se pencheront sur la considération des propriétés émergentes, issues des interactions des agents de la simulation. Quelques travaux abordent cette problématique – p. ex., [217] –, il semble essentiel de s’en inspirer et de les intégrer à l’architecture présentée.

Les améliorations du processus de *Validation* et du SEAD passeront inévitablement par l’intégration de méta-informations sur la dynamique des paramètres et sur la description des événements des simulations. Ces méta-informations, utilisables par l’*Agent-Validation*, pourront être modélisées sous la forme d’une *logique de description* et s’inspirées de langages d’ontologies – p. ex., *OWL*¹⁴⁴ – ou de récentes extensions, dont certaines évidentielles : p. ex. *BeliefOWL* [99]. Les objectifs seront de fournir une base de description initiale du système réel que le SEAD pourrait enrichir au fur et à mesure des cas traités.

De plus, des travaux futurs traiteront de la sélection *intelligente* des agents de la simulation et de la détermination des contraintes de temps pour optimiser le processus – p. ex., en s’inspirant des plans de sondage. Enfin, il est également envisagé d’agrémenter la structure générale du SEAD pour automatiser l’estimation des paramètres et seuils du processus de *Validation* estimés empiriquement – p. ex., les seuils de la figure 4.4, p. 103.

La partie suivante présente une application en entomologie médico-légale, qui, au vu des résultats, valide l’architecture du SEAD.

¹⁴⁴C.f., <http://www.w3.org/TR/owl-features/>.

Conclusion

La deuxième partie de ce manuscrit s'est attelée à présenter une architecture de système évidentiel d'aide à la décision (SEAD), destinée aux systèmes complexes. Inspirée du raisonnement abductif – c.f., section 3.2 – et basée sur une formalisation évidentielle du concept d'étalonnage – c.f., section 3.4.3 –, cette architecture est composée de plusieurs processus principaux, introduits dans le chapitre 3. La théorie des fonctions de croyance y est montrée comme adaptée pour représenter et manipuler l'ensemble des informations véhiculé entre les différents processus du SEAD. Le processus évidentialisé d'*Etalonnage* est mis en œuvre autant de fois qu'il existe de modèles prédictifs du système réel – c.f., section 3.5. La présentation effectuée demeure générique et applicable à tout type de modèle prédictif, comme les simulations orientées agents (SOA).

Dans le chapitre 4, la présentation approfondit alors un des processus centraux du SEAD : le processus de *Validation*. Ce dernier a lieu dans le cadre de simulations orientées agents et propose d'*agentifier* un ensemble de responsables de la validation – c.f., section 4.2.1. Cherchant à minimiser les coûts algorithmiques importants et élargissant la vision habituelle de la validation, ce processus profite ainsi des aspects *dynamiques* d'une SOA pour effectuer sa validation.

La troisième et dernière partie de cette thèse se propose d'étudier une implémentation particulière de l'architecture présentée. Celle-ci a lieu dans le cadre d'une application aux systèmes vivants.

Troisième partie

ForenSeek : un système évidentiel
multi-agents d'aide à la décision dédié à
l'entomologie médico-légale

Avant-propos

Les fondements *théoriques* du Système Evidentiel d'Aide à la Décision – présentés dans la partie II – tirent leurs origines de problématiques *appliquées* confrontées à la complexité. Ces travaux ont été initiés par plusieurs laboratoires et structures de recherche de la région Nord-Pas-de-Calais :

- le *Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois* (LGI2A, Béthune) représenté par son directeur Daniel Jolly et son co-directeur Gilles Goncalves – c.f., <http://www.lgi2a.free.fr> – ;
- le *Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal* (LAGIS, Lille) représenté par Philippe Kubiak – c.f., <http://lagis.ec-lille.fr> – ;
- le *Pôle de Compétences Recherche en Ingénierie et Sciences du Vivant* (ISV) de l'école des *Hautes Etudes d'Ingénieur* (HEI, Lille) et son responsable Daniel Dupont – c.f., <http://www.hei.fr> – ;
- le *Laboratoire Environnement et Santé* (Univ. Catholique, Lille) et son directeur Benoît Bourel – c.f., <http://flst.icl-lille.fr> – ;
- le *Laboratoire d'entomologie de l'Institut Médico-Légale* (IML, Lille) représenté par son directeur Didier Gosset et son directeur adjoint Valéry Hédouin.

Plusieurs travaux ont vu le jour grâce aux collaborations de ces structures, p. ex. : les thèses de A. Follet [108], A. Weber [283], D. Charabidze [43] et G. Morvan [194]. Des membres de HEI, du LGI2A, du LAGIS, du *Laboratoire Environnement et Santé* et de l'IML de Lille y collaborent. Un des objectifs de ces collaborations concerne le développement de systèmes d'aide à la décision dédiés aux systèmes complexes. Plus spécifiquement, les membres de ce groupe de travail s'intéressent à la conception, au développement et à la mise en œuvre de méthodes de modélisation et de raisonnement destinées aux systèmes vivants. Ils relient ainsi la *biologie* et l'*informatique/automatique*.

Dans ce contexte, un projet nommé ForenSeek¹⁴⁵ a pris forme autour des problématiques liées à l'entomologie médico-légale¹⁴⁶. Les travaux conjoints de :

- Damien Charabidze, thématicien : master 2 (2005), thèse (2005-2008) [43] et enseignant-chercheur (depuis 2008) ;

¹⁴⁵ForenSeek est une combinaison des mots anglais *forensic* – signifiant *médico-légale* – et *seek* – signifiant *chercher*.

¹⁴⁶L'entomologie médico-légale étudie les insectes nécrophages – et traces d'insectes – observés sur un cadavre afin de déterminer les circonstances de la mort, c.f., chapitre suivant.

- Gildas Morvan, modélisateur et informaticien : master 2 (2006), thèse (2006-2009) [194] et enseignant-chercheur (depuis 2009) ;
- et Alexandre Veremme, modélisateur et informaticien : master 2 (2007) et thèse (2007-2010) ;

ont contribué à structurer le développement d'un outil d'aide à la décision dédié aux experts en entomologie médico-légale.

Les échanges et collaborations de ces trois acteurs, dans le cadre de ForenSeek, sont synthétisés par la figure 1. Il est important de remarquer que la complexité des échanges entre les thématiques *biologique* et *informatique* sont source d'innovations dans chacune d'elles et dans leurs *intersections* – c.-à-d., les systèmes d'aide à la décision.

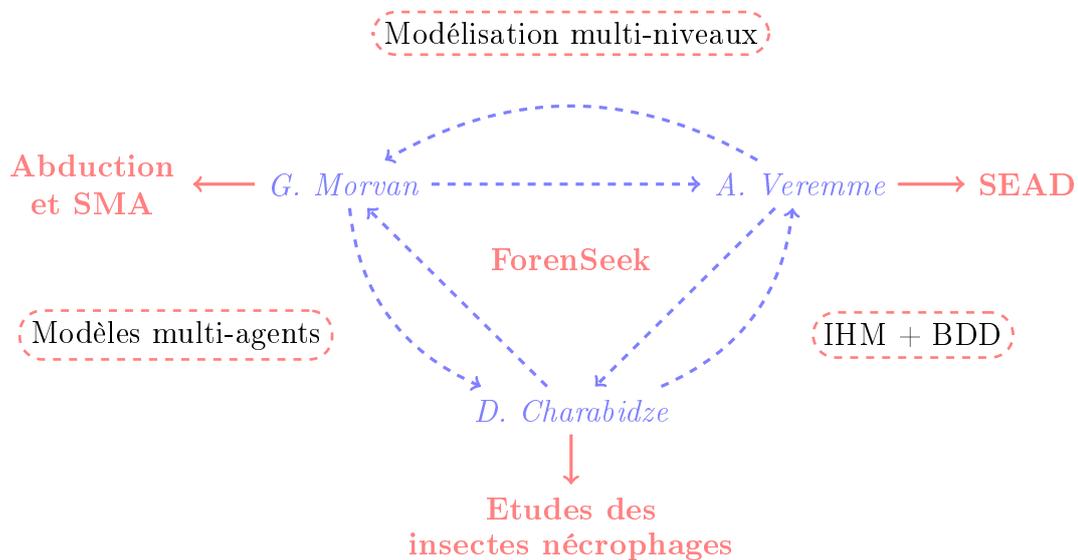


FIG. 1 – Interactions des trois principaux protagonistes du projet ForenSeek. En pointillés roses : les thématiques principales issues des interactions. En rose, en gras : les thématiques de recherche individuelles. IHM : interface homme-machine ; BDD : base de données.

Le projet ForenSeek est décrit dans le chapitre suivant. La première section introduit l'entomologie médico-légale, son importance et ses problématiques. La section suivante présente le système ForenSeek, les modèles multi-agents de décomposition d'un cadavre puis précise la structure du SEAD en entomologie médico-légale. La dernière section détaille les résultats obtenus à partir d'expertises judiciaires réalisées à l'Institut Médico-Légale de Lille.

Chapitre 5

De l'entomologie médico-légale au SEAD ForenSeek

Sommaire

5.1	Introduction	117
5.2	L'entomologie médico-légale	118
5.2.1	Principes et chronologie d'une expertise entomologique	118
5.2.2	Température et développement des diptères	121
5.2.3	Problématiques et imperfections des expertises	125
5.3	Modélisation et simulation de la dégradation d'un corps	129
5.3.1	Modélisation du cadavre	129
5.3.2	Modélisation des agents du système	130
5.3.3	Multiplicité et initialisation des modèles multi-agents	131
5.4	ForenSeek : objectifs, architecture et implémentation	132
5.4.1	Architecture et implémentation	133
5.4.2	Agentification généralisée	134
5.4.3	<i>Validation</i> d'une simulation multi-agents	135
5.4.4	Processus de <i>Manipulation finale</i> au sein de ForenSeek	136
5.5	Résultats	137
5.5.1	Expertise a	138
5.5.2	Expertise b	139
5.5.3	Expertise c	141
5.5.4	Expertise d	142
5.6	Perspectives et conclusions de l'application	144

5.1 Introduction

Lors de la découverte d'un cadavre, notamment au cours d'une enquête criminelle, les enquêteurs tentent de déterminer les causes et conditions du décès. La médecine légale leur apporte généralement des informations essentielles grâce à l'étude des caractéristiques

morphologiques, physiques ou thermiques du corps. Même si de nombreuses méthodes ont vu le jour pour exploiter les indices disponibles¹⁴⁷, celles-ci ne s'avèrent utilisables que pour des *Intervalles Post Mortem* (IPM) dits courts – c.-à-d., inférieurs à 72 heures après la mort.

En effet, après trois jours environ, les méthodes médico-légales traditionnelles deviennent inefficaces, du fait de la disparition des spécificités *post mortem* précédemment utilisées. L'unique technique exploitable, nommée *entomologie médico-légale*, a recours à l'analyse des insectes nécrophages retrouvés *sur ou à proximité* du cadavre. Leur étude permet d'estimer les heures probables du décès.

Présenté dans la section 5.2 suivante, le principe théorique relativement simple de l'entomologie médico-légale apparaît en contradiction avec la complexité de l'écosystème *cadavre-entomofaune-environnement*. Les estimations des experts entomologistes peuvent ainsi être entâchées d'erreurs et de subjectivité : un outil d'aide à la décision semble alors intéressant pour améliorer les estimations des heures possibles de la mort. Commencant par les bases de l'entomologie médico-légale et présentant les difficultés inhérentes à la mise en œuvre d'une telle technique, ce dernier chapitre explicite ensuite les modèles multi-agents de développement de diptères nécrophages. Dans la section 5.4, les derniers niveaux du SEAD, non précisés jusqu'à présent, sont présentés dans le cadre du projet ForenSeek. Enfin, dans la section 5.5, des résultats sont détaillés et comparés aux rapports d'expertise rédigés à l'Institut Médico-Légal (IML) de Lille.

5.2 L'entomologie médico-légale

Cette section s'inspire librement des travaux de thèse de Damien Charabidze [43, 44].

5.2.1 Principes et chronologie d'une expertise entomologique

5.2.1.1 Colonisation d'un cadavre par des insectes nécrophages

Immédiatement après la mort, un cadavre se *transforme* en un environnement nutritif, attractif pour les organismes nécrophages présents dans son écosystème. En fonction de leurs préférences écologiques, les populations présentes – principalement des espèces d'insectes – évoluent progressivement selon la décomposition du cadavre. Bien que certains travaux historiques considèrent le processus de dégradation d'un corps comme une succession *ordonnée et structurée* d'espèces dans le temps¹⁴⁸, celui-ci s'avère être un « processus continu complexe [...] fortement lié aux caractéristiques du milieu et du corps » [43, p. 31]. Une multitude de phénomènes d'attractions, de rétroactions, de répulsions est ainsi mise en œuvre par les différents acteurs, c.f., figure 5.1. Intervenant dans la décomposition, les

¹⁴⁷P. ex. : la mesure de la température rectale; l'estimation de la rigidité cadavérique; l'analyse des lividités cadavériques; ou le dosage du potassium dans l'humeur vitrée de l'œil. C.f., [43, p. 49-52] pour de plus amples détails et pour les références principales.

¹⁴⁸Voir p. ex. les huit *escouades* de Mégnin [176].

femelles de diptères gravides¹⁴⁹, à la recherche d'un substrat adapté pour leur progéniture, sont souvent les premières espèces à coloniser un corps en putréfaction – parfois repéré à plusieurs kilomètres de distance [43, p. 28] – pour y déposer leurs œufs.

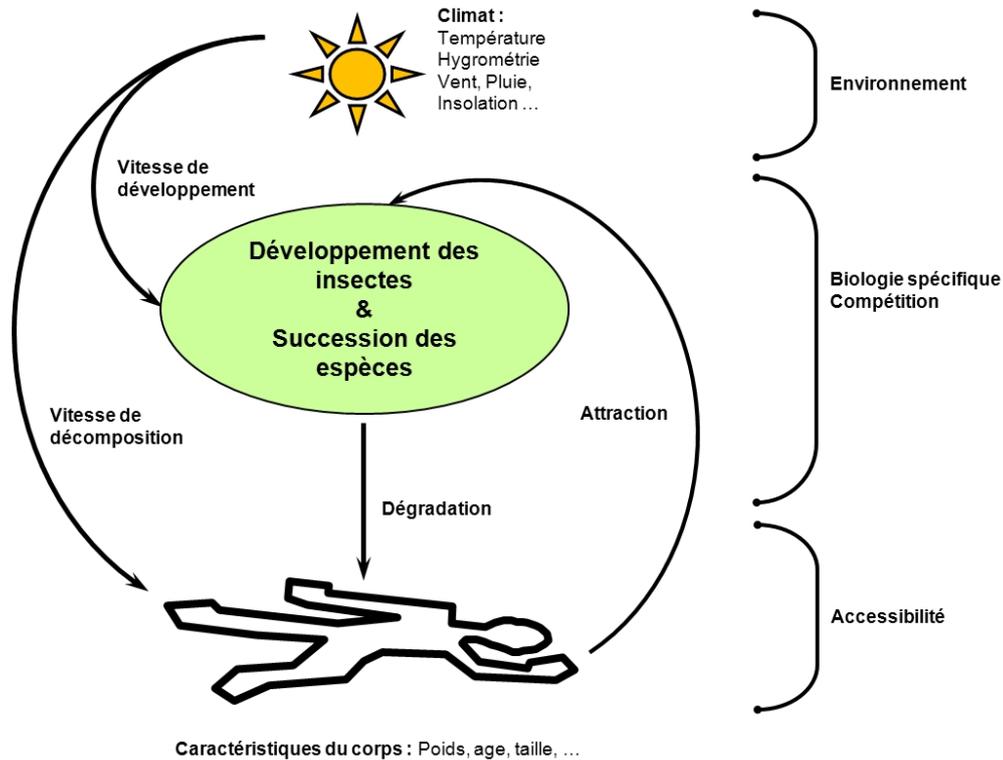


FIG. 5.1 – Schématisation de l'écosystème cadavre. De haut en bas : le climat, l'entomofaune et le cadavre. Les éléments indiqués à droite représentent quelques-uns des principaux facteurs susceptibles de modifier à chaque niveau la dynamique globale de la dégradation du corps. Schéma de [43, p. 47].

Les larves de diptères, une fois pondues sur un cadavre, se développent en suivant un cycle dit *holométabole* – c.-à-d., à métamorphose complète –, c.f., figure 5.2. Les œufs, pondus par grappes de 200 individus environ [118], deviennent après éclosion des larves de stade 1 – noté L1 –. Après deux mues, passant par les stades L2 et L3, les larves s'empupent et se transforment en nymphes. Ces dernières se métamorphosent alors jusqu'à ce que les imagos – c.-à-d., les insectes adultes – puissent rompre les pupes pour émerger.

Comme une majorité des animaux à *sang froid*, la durée de développement des insectes sur un corps est principalement dépendante de la température ressentie. Ainsi, pour une espèce donnée, plus il fait chaud, plus le développement de l'insecte est rapide ; plus il fait froid, plus la vitesse de développement diminue. Lorsque la température ambiante devient trop chaude – c.-à-d., supérieure à environ 45°C –, les individus sont susceptibles

¹⁴⁹C.-à-d., les mouches porteuses d'œufs.

de mourir tandis que lorsqu'elle devient trop froide, les insectes peuvent entrer en *diapause*, état d'arrêt temporaire du développement larvaire en attendant le retour à des conditions plus favorables [43, p. 35].

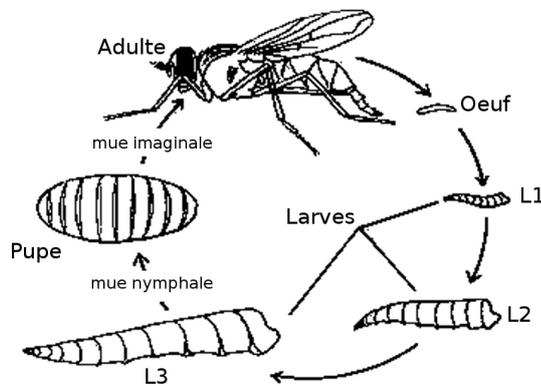


FIG. 5.2 – Cycle de développement holométabole des diptères *Calliphoridae*, de [43, p. 34].

5.2.1.2 Prélèvements entomologiques sur le lieu de découverte du cadavre

En arrivant sur la scène de découverte d'un corps, un enquêteur doit effectuer une série de prélèvements entomologiques, qu'il place sous scellés et qu'il enregistre¹⁵⁰. En théorie, ces scellés sont représentatifs de la population d'insectes présente *sur ou à proximité* du cadavre et peuvent être composés d'individus de tout stade, vivants ou morts. Ils peuvent aussi être composés de traces d'insectes, comme des pupariums – c.-à-d., enveloppes vides indiquant que les larves se sont déjà métamorphosées en mouches adultes.

Conservés à une température ambiante stable et faible – p. ex., dans un réfrigérateur – afin de forcer la diapause des insectes qui les composent, les scellés sont ensuite envoyés à un laboratoire d'expertise entomologique, accompagnés des informations essentielles suivantes :

- date à laquelle la victime a été vue vivante pour la dernière fois – assimilée à la date de disparition supposée de la personne – ;
- date de découverte du cadavre ;
- description précise de l'environnement et températures relevées, mesurées ou estimées entre la date de disparition et la date de découverte^{151, 152}.

Dès la réception d'une mission d'expertise ou la réquisition d'un juge, le laboratoire brise et exploite les scellés.

¹⁵⁰Bien que des protocoles standards de prélèvements aient été proposés dans la littérature – p. ex. [4] –, ceux-ci sont souvent spécifiques aux laboratoires, experts et enquêteurs intervenants.

¹⁵¹Cette période entre les dates de disparition et de découverte correspond à l'IPM maximum.

¹⁵²D'autres données climatiques, comme l'ensoleillement, la pluviométrie et l'hygrométrie peuvent être utiles à la détermination des plages de pontes, p. ex., [290, 5].

5.2.1.3 Analyse des échantillons

Le principe de base de l'expertise entomologique tient compte de la propriété liant *température ressentie* et *vitesse de développement* des insectes. Ainsi, une fois les scellés ouverts, les insectes vivants sont placés en élevage sur de la viande à une température fixe – habituellement de 25°C – jusqu'à leur empupement. Les pupes obtenues sont isolées et les dates enregistrées. Une surveillance continue des émergences est alors effectuée et les dates d'apparition des adultes sont également reportées. Le processus d'observation de l'expert se poursuit jusqu'à ce que l'ensemble des insectes ait émergé. Ces derniers sont ensuite tués et identifiés.

A partir des informations relatives :

- à l'environnement du cadavre – p. ex., les relevés de températures – ;
- aux dates d'empupement et d'émergence observées par l'expert ;
- aux espèces identifiées et aux connaissances biologiques associées à celles-ci – issues de la littérature – ;

il devient possible de déterminer les niveaux de développement atteints par les insectes au moment de la découverte du corps et donc de remonter jusqu'aux instants des pontes¹⁵³. A partir des dates de ponte, l'expert est alors capable de fournir un intervalle *post mortem* minimum : la personne était déjà morte au moment des premières pontes, il est en revanche impossible de savoir exactement de combien précédait le décès. Sous certaines conditions, quelques minutes seulement peuvent séparer le décès des premières pontes [194, p. 66]. Un rapport d'expertise entomologique est alors rédigé à partir de ces conclusions.

Les principales étapes d'une expertise entomologique sont résumées par la figure 5.3.

5.2.2 Température et développement des diptères

Comme introduit dans la sous-section précédente 5.2.1, la durée de développement d'une larve de diptère est essentiellement dépendante de la température ressentie par l'insecte.

Ainsi, pour une espèce donnée p , $\forall p \in [1, P]$, le taux de développement, noté a , d'un insecte de p prend ses valeurs de manière croissante dans l'intervalle $[0, 1]$. La valeur 0 correspond à un développement nul, c.-à-d., au taux initial au moment de la ponte. La valeur 1 signifie que l'insecte a terminé son cycle de développement et atteint le stade *adulte*.

La vitesse de développement $\frac{\Delta a}{\Delta t}$ dans l'intervalle de temps Δt est donnée par une équation de la forme [256] :

$$\frac{\Delta a}{\Delta t} = f_p(T(t)) ; \quad (5.1)$$

avec $T(t)$, la température ressentie par l'insecte à l'instant t . La fonction f_p , pour l'espèce considérée, représente un modèle de développement liant durées de développement

¹⁵³Comme présenté théoriquement dans la section 3.2.2 du chapitre 3, ce raisonnement peut être qualifié d'*abductif*.

et températures. De tels modèles sont nombreux dans la littérature et ceux-ci sont habituellement construits par l'association :

- d'une série de données biologiques issues d'observations en conditions contrôlées – p. ex. : [141, 118, 171, 117], etc. Comme présenté dans la sous-section 5.2.2.1 ci-après, ces données représentent les durées de développement mesurées nécessaires pour atteindre l'émergence ;
- et d'une méthode de régression effectuée sur ces données biologiques. Deux principaux types de modèles de régression sont fréquemment utilisés en entomologie médico-légale, c.f., sous-section 5.2.2.2.

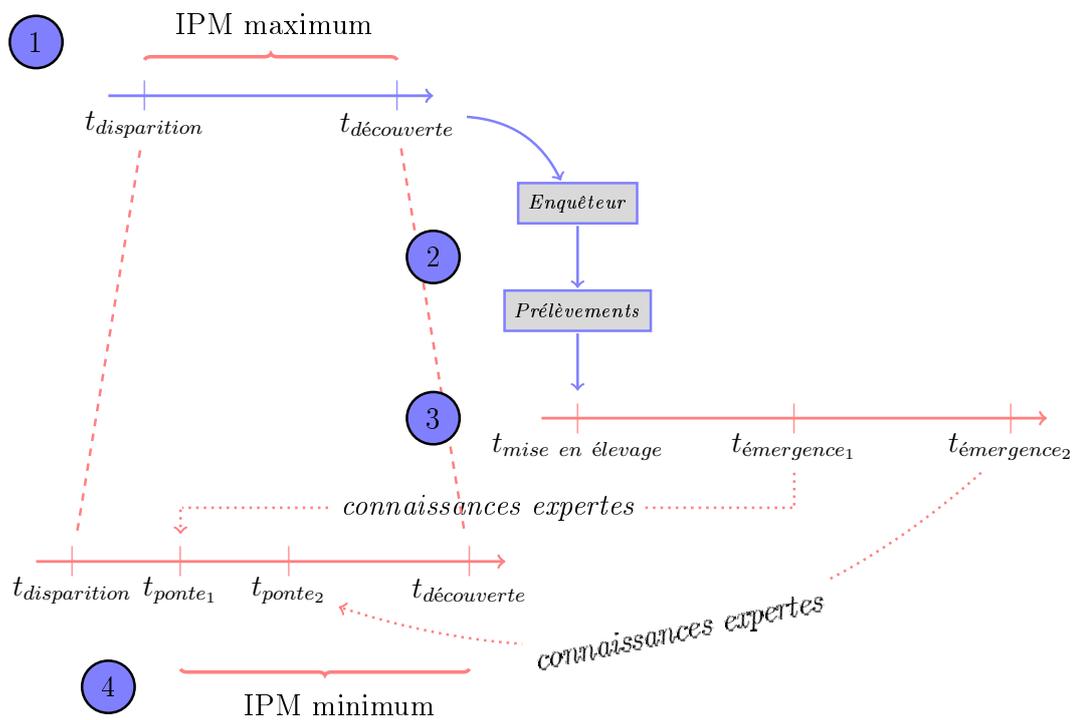


FIG. 5.3 – Schématisation du processus d'expertise entomologique. (1) : mort et colonisation du corps ; (2) : découverte du corps par les enquêteurs ; (3) : mise en élevage des prélèvements et observations des émergences ; (4) : estimation des dates de ponte et de l'IPM minimum.

5.2.2.1 Séries de données biologiques issues d'observations en conditions contrôlées

Nombre de biologistes ont étudié, en conditions contrôlées, les durées de développement nécessaires aux insectes d'une espèce pour atteindre le stade adulte¹⁵⁴. Les conditions

¹⁵⁴Ces travaux de thèse se cantonnent aux durées nécessaires pour atteindre l'émergence mais plusieurs auteurs mentionnent aussi les informations de durées des stades intermédiaires : L1, L2, etc., [117].

d'expérimentation sont rarement identiques et des différences notables de résultats sont ainsi souvent constatées¹⁵⁵, c.f., fig. 5.4. Dans le cadre d'une mission d'expertise, l'expert fait habituellement le choix empirique d'utiliser une ou plusieurs de ces séries pour obtenir, après régression, la vitesse de développement d'un insecte à étudier.

Par convention, pour une espèce p donnée, on note $data_p^d$, $\forall d \in [1, D]$, une série de données biologiques telle que $data_p^d$ est une fonction définie de \mathbb{R} dans \mathbb{R} .

Exemple 11. Soit $data_1^1$, la série de données relatée dans [117] et relative à l'espèce *Lucilia sericata*. Selon ces données, une larve de cette espèce met 297 heures pour atteindre le stade adulte à une température fixe de $25^\circ C$: $data_1^1(25^\circ C) = 297 h$.

Pour une espèce p , un expert entomologiste dispose donc d'un ensemble de séries de données recueillies dans la littérature :

$$Data_p = \{data_p^1, \dots, data_p^d, \dots, data_p^D\}.$$

L'indice D peut être vu comme le nombre de références expérimentales connues de l'expert pour l'espèce p .

5.2.2.2 Les modèles de régression

Le modèle des degrés heures accumulés Le modèle des *degrés heures accumulés*^{156, 157} est une fonction de régression linéaire de la forme suivante :

$$f_p^{ADH, Data_p}(T(t)) = \begin{cases} \alpha \cdot T(t) + \beta, & \forall T(t) \in [T_{min}, T_{max}] ; \\ 0, & \forall T(t) < T_{min}. \end{cases} \quad (5.2)$$

T_{min} et T_{max} sont respectivement la température minimale et maximale de développement. La température T_{max} est généralement proche de la température létale – c.-à-d., proche de $45^\circ C$ – et T_{min} peut être obtenue par $\frac{-\beta}{\alpha}$. Les seuils α et β sont obtenus par régression à partir de l'ensemble des séries de données $Data_p$ relatifs à l'espèce étudiée.

Cette méthode de régression, pratique et communément utilisée en entomologie médico-légale [43, p. 68], est théoriquement invalide lorsque la température ressentie par l'insecte ne figure plus dans l'intervalle $[T_{min}, T_{max}]$.

¹⁵⁵Les explications sont multiples et n'ont pas uniquement trait aux protocoles expérimentaux : d'autres facteurs peuvent influencer la durée de développement, comme p. ex., la latitude [222, chap. 4].

¹⁵⁶En anglais : *accumulated degree hours* (ADH).

¹⁵⁷Dans la littérature, un modèle équivalent, basé sur des pas de temps de l'ordre de la journée peut également être utilisé : le modèle des degrés jours accumulés (ADD). Pour des raisons de clareté, ce manuscrit se limite au modèle des ADH.

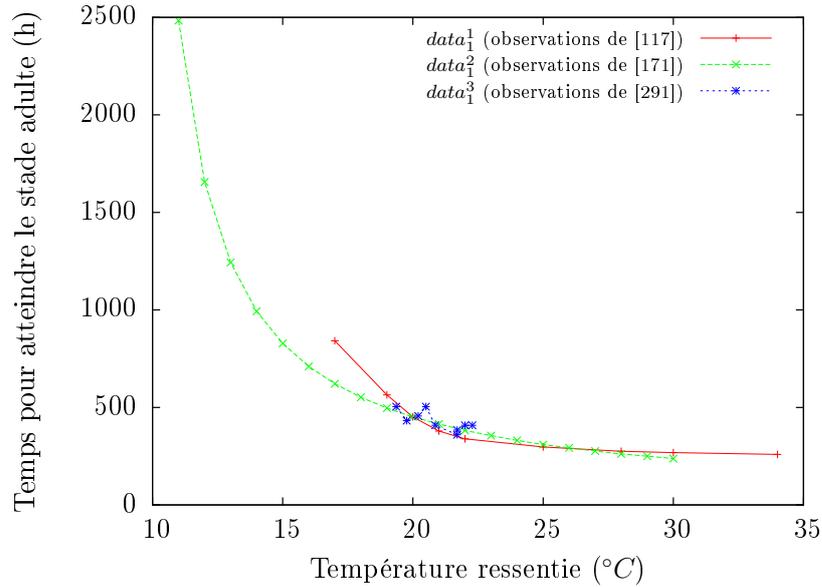


FIG. 5.4 – Exemple de séries de données caractérisant les durées nécessaires à l'espèce *Lucilia sericata* pour atteindre le stade adulte en fonction de la température. Plus la température est élevée, plus le temps de développement est réduit, plus la vitesse de développement est rapide.

Le modèle de Stinner Pour mieux prendre en compte les températures extrêmes, des modèles curvilinéaires ont été proposés. Dans cette catégorie, le modèle de Stinner [256] demeure une référence :

$$f_p^{Sti,Data_p}(T(t)) = \begin{cases} \frac{k_1}{1+e^{k_2+k_3 \cdot T(t)}}, & \forall T(t) < T_{opt} ; \\ \frac{k_1}{1+e^{k_2+k_3 \cdot (-2 \cdot T_{opt}-T(t))}}, & \forall T(t) > T_{opt}. \end{cases} \quad (5.3)$$

Dans l'équation 5.3, les variables k_1 , k_2 et k_3 sont des constantes d'ajustement et T_{opt} représente la température optimale de développement. Comme le rappelle [194, p. 70], « ce modèle présente un compromis intéressant entre facilité d'utilisation et précision ».

5.2.2.3 Calcul du taux de développement

En théorie, dans un environnement contrôlé où les températures sont connues, la détermination du taux de développement accumulé par une larve entre deux instants t_1 et t_2 est évidente :

$$a(t_2) = \sum_{t \in [t_1, t_2]} \Delta a(t), \quad (5.4)$$

où $\Delta a(t)$ est la variation du taux de développement à l'instant t et peut être obtenue à partir du modèle de régression linéaire $f_p^{ADH,Data_p}$ – c.f., eq. 5.2 – ou curvilinéaire $f_p^{Sti,Data_p}$ – c.f., eq. 5.3.

Remarque 5. Le lecteur remarquera que lorsque les conditions de préservation sont respectées, le taux de développement d'une larve à l'instant de la découverte du cadavre, $a(t_{\text{découverte}})$, est égal au taux de développement de la mise en élevage, $a(t_{\text{mise en élevage}})$. Il est le résultat de la différence entre le taux de développement atteint à l'émergence de la mouche – c.-à-d., $a(t_{\text{émergence}}) = 1$ – et le taux accumulé au cours de l'élevage :

$$\begin{aligned} a(t_{\text{découverte}}) &= a(t_{\text{mise en élevage}}) ; \\ &= a(t_{\text{émergence}}) - \sum_{t \in [t_{\text{mise en élevage}}, t_{\text{émergence}}]} \Delta a(T_{\text{élevage}}) ; \\ &= 1 - \sum_{t \in [t_{\text{mise en élevage}}, t_{\text{émergence}}]} \Delta a(25^{\circ}\text{C}). \end{aligned} \quad (5.5)$$

L'équation 5.5 est vérifiée lorsque la température d'élevage est de 25°C et que les sclérites ont parfaitement bien été conservés au frais avant la mise en élevage – c.-à-d., à une température entraînant la diapause des insectes.

Par la suite, dans le cadre de simulations prédictives de décomposition d'un corps, le taux de développement observé à la découverte du corps $a(t_{\text{découverte}})$ sur un insecte d'une espèce p , $\forall p \in [0, P]$, est noté a_p^{max} . Ce taux a_p^{max} correspond au taux de développement maximal que les insectes de l'espèce p devront atteindre pour corroborer les observations des experts. Ceci est détaillé dans la section 5.4 suivante.

5.2.3 Problématiques et imperfections des expertises

5.2.3.1 Estimation de la température

La qualité d'une expertise entomologique est entièrement tributaire de la connaissance de la température *ressentie* par les insectes. Sous certaines hypothèses simplificatrices, cette température peut être assimilable à celle de l'environnement – p. ex., cette hypothèse est faite lors de la mise en élevage. Mais en pratique, dans l'écosystème complexe que forment l'environnement, le cadavre et l'entomofaune, de nombreux phénomènes viennent en perturber sa perception : l'existence de micro-climats, l'inertie thermique du cadavre et l'effet des masses de larves. L'impossibilité de prise en compte de ces phénomènes dans une expertise *manuelle* constitue la principale limite de la méthode entomologique et oblige les experts à faire preuve de grande prudence dans leurs conclusions.

Les micro-climats Deux principaux cas se distinguent habituellement lors d'expertises entomologiques [43, p. 61] :

- le cadavre est retrouvé en intérieur et la température est observée fixe ou cyclique – p. ex., en présence d'un système de climatisation ou de chauffage thermostaté – ;
- le cadavre se trouve en extérieur et la température considérée est alors celle de la station météorologique la plus proche. Lorsqu'un micro-climat est constaté sur le lieu de découverte, il est possible de relever les températures *a posteriori* pour les corrélérer à celles de la station. Cette méthode, utilisée par exemple dans [113], peut

permettre l'amélioration de la précision de l'IPM¹⁵⁸.

Lorsque la corrélation est impossible ou que les températures sont inconnues – p. ex., le corps est retrouvé au fond d'un puits où la pose d'une sonde thermique est difficile –, l'expert envisage et suppose arbitrairement différentes valeurs de températures extrêmes pour obtenir plusieurs IPM minimum : *élargi* lorsque la température est supposée basse ou *réduit* lorsque la température est supposée plus élevée¹⁵⁹.

L'inertie thermique du cadavre Comme tout objet physique, un corps humain en décomposition possède une inertie thermique pouvant impacter le développement des insectes, c.f., fig. 5.5. Étudiée en médecine légale – p. ex., [127, 128, 169, 170, 272, 48] –, l'inertie est pourtant rarement abordée en entomologie médico-légale. Quelques cas rapportés dans la littérature – p. ex., [43, p. 175-179] –, démontrent cependant que les conclusions quant à l'IPM sont modifiées lorsque l'inertie est considérée ; en effet :

- la température du corps pendant les premières heures peut être nettement supérieure à la température ambiante ;
- le corps effectue un amortissement de la température environnementale ;
- il se comporte comme une enveloppe pour les masses de larves et préserve leur chaleur émise.

L'effet des masses de larves Les larves de diptères possèdent un comportement grégaire provoquant la formation de *masses* dans lesquelles de fortes augmentations de températures peuvent être constatées¹⁶⁰. Ce phénomène, pouvant être qualifié d'*autorégulation* – c.f., fig. 5.6 –, permettrait aux asticots d'optimiser leur développement et de minimiser le temps passé sur le corps. Cette augmentation de la température semble avoir une importance sur le développement des diptères – p. ex., [171, 143], etc.¹⁶¹ – mais peu de travaux s'attachent à comprendre et à modéliser le phénomène, difficilement palpable pour un expert.

5.2.3.2 Variabilité inter-individuelle du temps de développement

Les individus d'une même espèce, issus d'une même ponte et sujets aux mêmes températures, ne se développent pas tous à la même vitesse [220]. « Cette hétérogénéité se traduit par des périodes de transition durant lesquelles plusieurs stades différents peuvent cohabiter alors que les individus étaient initialement synchrones » [43, p. 111]. Dans la littérature, Tarone *et al.* [260] rapportent ainsi un écart du temps de développement pouvant atteindre 176 heures pour des individus d'une même population.

¹⁵⁸Elle demeure cependant controversée.

¹⁵⁹Ce principe a été appliqué pour certaines expertises à l'IML de Lille.

¹⁶⁰Dans [118], des différences de températures de presque 20°C avec la température ambiante ont été mesurées.

¹⁶¹C.f., [194, p. 73] pour une liste de travaux faisant référence à l'effet des masses de larves.

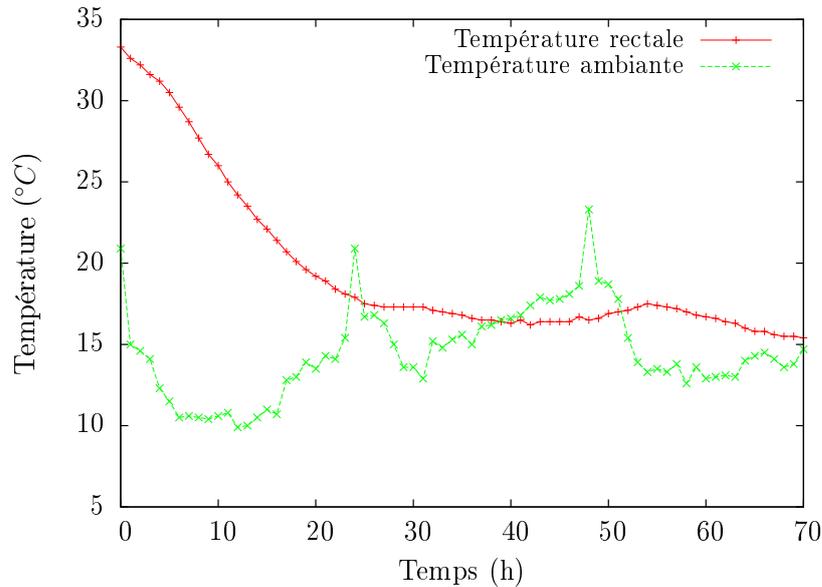


FIG. 5.5 – Observation de l’inertie thermique d’un cadavre en décomposition. Expérience réalisée sur un porc de 30kg euthanasié dans le cadre d’un projet de recherche médical.

Des méthodes de prise en compte de cette variabilité ont été proposées, p. ex. la méthode de Régnière [220]¹⁶² mais elles demeurent délicates à mettre en œuvre. Selon la représentativité et la qualité des prélèvements effectués au moment de la découverte du cadavre, les conclusions de l’expertise peuvent être modifiées.

5.2.3.3 Multiplicité des modèles biologiques

Comme présenté dans la sous-section 5.2.2.1, pour une même espèce, un expert peut disposer d’une multitude de séries de données de développement à partir desquelles la régression est effectuée. Pour une espèce p , $\forall p \in [1, P]$, lorsqu’un expert dispose de D séries de données et de M modèles de régression – p. ex., modèles des ADH ou de Stinner –, il a un maximum de choix possibles donné par :

$$\text{Choix}_p = (2^D - 1) \times M. \quad (5.6)$$

Exemple 12. Soit $\text{Data}_1 = \{\text{data}_1^1, \text{data}_1^2, \text{data}_1^3\}$, l’ensemble des trois séries de données représentées sur la figure 5.4 pour l’espèce *Lucilia sericata*. Pour faire sa régression, l’expert a sept choix possibles, prendre :

1. la série data_1^1 uniquement ;
2. la série data_1^2 uniquement ;

¹⁶²C.f., les travaux de [194, p. 70-73] pour de plus amples détails.

3. la série $data_1^3$ uniquement ;
4. les deux séries $data_1^1$ et $data_1^2$;
5. les deux séries $data_1^1$ et $data_1^3$;
6. les deux séries $data_1^2$ et $data_1^3$;
7. les trois séries $data_1^1$, $data_1^2$ et $data_1^3$.

A partir de ces sept choix, si l'expert dispose des modèles de régression des ADH ou de Stinner, il a donc : $Choix_1 = 7 \times 2 = 14$.

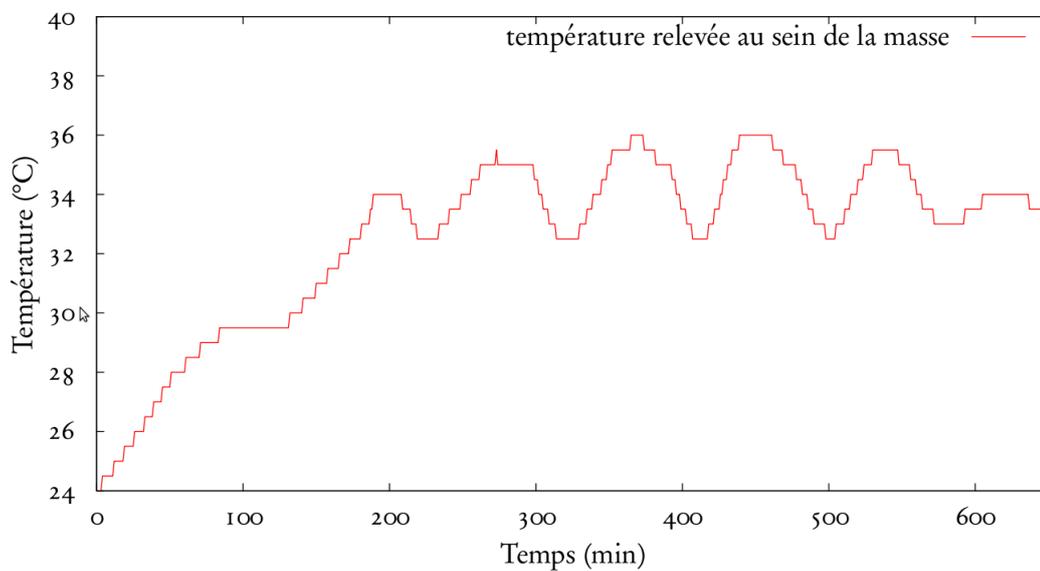


FIG. 5.6 – Autorégulation de la température d'une masse de larves de stade L2 de l'espèce *P. terraenovae*, placée dans un environnement à 30°C. Expérience réalisée dans le cadre du projet ForenSeek à la verminière de St-Pourçain-Sur-Sioule.

Ce choix est habituellement motivé par l'expérience de l'expert et certaines caractéristiques liées à l'expertise courante. Souvent, une majorité des séries de données est utilisée, mais rien ne justifie pleinement l'utilisation d'une série de données plutôt qu'une autre ou la préférence d'un modèle de régression plutôt qu'un autre.

5.3 Modélisation et simulation de la dégradation d'un corps

Pour prendre en compte l'ensemble des difficultés relatives à la technique entomologique – c.-à-d., micro-climats, inertie thermique du cadavre, effets des masses de larves, variabilité inter-individuelle et multitudes de modèles entomologiques –, le développement d'un outil d'aide à la décision s'est imposé. En effet, par manque de temps, par préférence, par habitude ou par contrainte, un expert fait parfois des choix, impactant ses décisions, qu'il est intéressant de limiter.

Le système d'aide à la décision prend donc en compte l'ensemble des paramètres écosystémiques pour améliorer la précision et la fiabilité des expertises. Trois raisons essentielles ont motivé l'orientation *microscopique* de la méthode *multi-agents* choisie :

- la présence d'un très grand nombre d'acteurs hétérogènes – c.-à-d., plusieurs milliers de larves d'espèces différentes peuvent être présentes sur un même corps – ;
- l'existence d'interactions individuelles à l'origine de phénomènes émergents – p. ex., l'effet des masses de larves – ;
- une tentative d'approche *macroscopique* s'est révélée décevante par le passé [239].

Cette section s'inspire des travaux de thèse de Gildas Morvan [194, *chap. 6*] et des travaux de master 2 d'Alexandre Veremme [270]. Après une présentation du modèle de cadavre utilisé, les principaux agents d'une simulation, acteurs de la décomposition, sont introduits : les femelles gravides – modélisées par des *Agents-Mouche* – et les larves de diptères – modélisées par des *Agents-Larve*.

5.3.1 Modélisation du cadavre

Le cadavre peut être vu comme un environnement nutritif avec lequel les acteurs de la décomposition interagissent. Pour considérer l'inertie thermique du corps, celui-ci est modélisé à l'aide d'un réseau d'automates cellulaires à deux dimensions¹⁶³. Le corps est divisé en cellules de $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ – voir fig. 5.7 –, chacune caractérisée par plusieurs paramètres, dont la *température* et la *masse*. A chaque instant de la simulation, une cellule voit son paramètre *température* évoluer en respectant les lois thermiques de conduction et de convection [272]. Ainsi, elle évolue en toute autonomie en percevant les températures de ses voisines et en effectuant des échanges thermiques avec celles-ci. Le paramètre *masse* d'une cellule, initialisé en fonction du type de tissu modélisé, évolue principalement au gré de la consommation des *larves* qui l'occupent.

Dans le cadre de cette thèse, ce modèle thermique n'est pas précisé mais plusieurs travaux antérieurs démontrent de sa pertinence pour la modélisation du comportement thermique d'un cadavre, p. ex. : [272, 197, 48].

¹⁶³Une présentation des automates cellulaires est faite dans la sous-section 1.4.5 du chapitre 1.

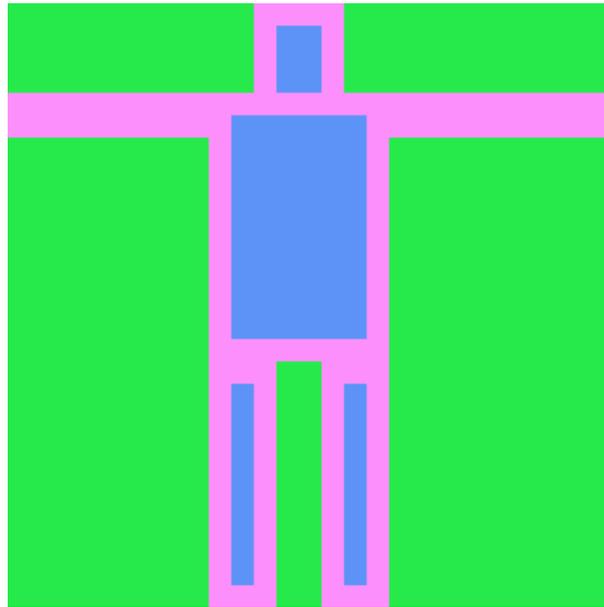


FIG. 5.7 – Structure spatiale du modèle de cadavre utilisé dans *ForenSeek*. Les cellules périphériques vertes caractérisent l'environnement immédiat du cadavre ; elles sont initialisées en fonction de la température connue de l'expert, p. ex., à partir des données issues de la station météorologique. Les cellules roses représentent les cellules de la peau et sont en contact direct avec l'environnement, avec lequel elles effectuent des échanges thermiques par convection. Les cellules bleues représentent les cellules internes du corps, p. ex., cerveau, organes et muscles. L'ensemble des paramètres d'une cellule est initialisé à partir des caractéristiques physiques de celle-ci – c.f., [272].

5.3.2 Modélisation des agents du système

5.3.2.1 Les *Agents-Mouche*

Les mouches présentes dans l'environnement du cadavre sont modélisées par des *Agents-Mouche* dont la présence est déterminée par des *modèles de population*, p. ex., [114] et [43, p. 83-103]. Une fois à proximité du cadavre, leur unique fonction est la ponte de larves sur le cadavre¹⁶⁴. Pour cela, chaque *Agent-Mouche* exécute un *modèle de ponte* déterminant la probabilité qu'il aura de pondre aux différents instants de la simulation. Ces probabilités sont définies à partir des préférences climatiques spécifiques aux différentes espèces – c.f., [194, p. 84-85].

Les *modèles de ponte* définissent également le nombre de larves pondues – p. ex., [282] précise qu'une ponte est composée de 223 ± 12 œufs. Une mouche ne pond qu'une seule fois au niveau des orifices naturels : sur la face et l'entrejambe [194, p. 85]. Une fois la ponte effectuée, l'*Agent-Mouche* disparaît de la simulation.

¹⁶⁴C.-à-d. qu'un *Agent-Mouche* de la simulation est responsable de la création d'*Agents-Larve*, qu'il place directement sur des cellules de l'automate cellulaire.

5.3.2.2 Les Agents-Larve

Les larves de diptères sont modélisées par des *Agents-Larves* commandés par l'exécution séquentielle de plusieurs modèles : un *modèle d'évolution* et un *modèle comportemental* – c.f., [196]. A chaque pas de temps, un *Agent-Larve* évolue en déterminant sa vitesse de déplacement, sa probabilité de survie, sa chaleur émise et son taux de développement. Le calcul du taux de développement est effectué au moyen de l'équation 5.4. Puis, lorsque son évolution est effective, l'*Agent-Larve* interagit avec ses congénères et le cadavre grâce au *modèle de comportement* schématisé par la figure 5.8.

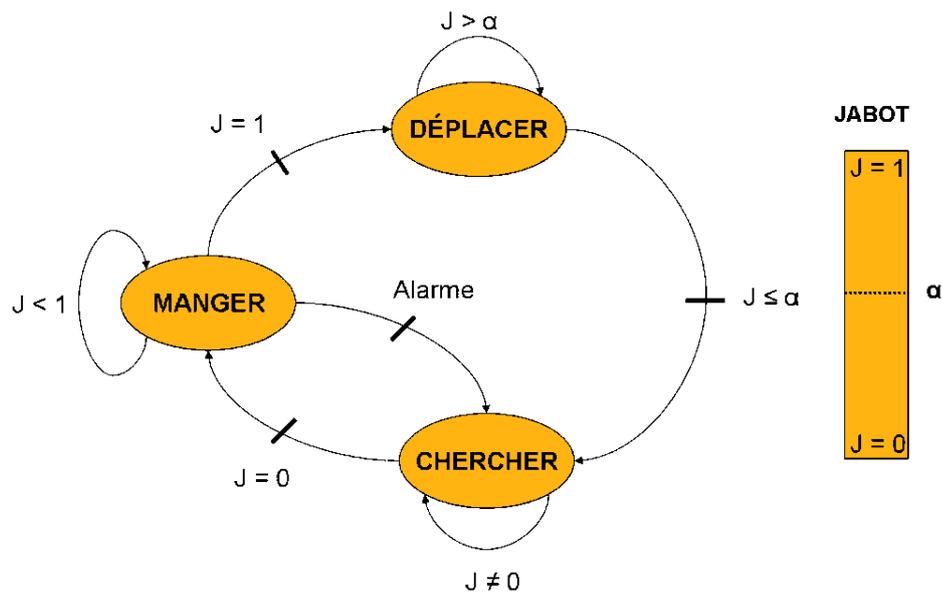


FIG. 5.8 – Cycle comportemental des Agents-Larve. La variable J représente la valeur de satiété de l'individu – c.-à-d., remplissage de l'estomac – et le paramètre α est un seuil déterminé empiriquement. Schéma de [43, p. 212].

5.3.3 Multiplicité et initialisation des modèles multi-agents

A partir des informations précédentes, un *cœur*¹⁶⁵ prédictif de la dégradation d'un cadavre par les diptères nécrophages a été proposé et validé, c.f., [47, 46, 196, 43, 45]. Ce cœur présente des comportements différents selon les modèles biologiques qui l'initialisent : il existe donc autant de modèles de décomposition que de modèles biologiques disponibles.

Actuellement, la variété des modèles de décomposition du projet ForenSeek se restreint à la variété des modèles de développement des larves de diptères – c.f., sous-section 5.2.2.

Soit P , le nombre d'espèces d'insectes prélevées sur le cadavre au moment de sa découverte. Comme cela a déjà été montré à la page 127, le nombre théorique de modèles

¹⁶⁵Le terme *méta-modèle* multi-agents de décomposition d'un cadavre peut être utilisé.

de développement d'une espèce p , $\forall p \in [1, P]$, peut s'élever à : $Choix_p = (2^D - 1) \times M$; pour D séries de données et M modèles de régression.

Pour P espèces à simuler, il est donc théoriquement possible d'initialiser le cœur par S combinaisons différentes :

$$S = \prod_{p \in [1, P]} Choix_p. \quad (5.7)$$

Le cœur multi-agents initialisé à partir d'un ensemble de modèles biologiques est noté x_s , $\forall s \in [1, S]$. Un modèle multi-agents x_s est construit par l'association de modèles de développement des différentes espèces.

A ce niveau de la présentation, la structure présentée dans le chapitre 3 est alors retrouvée : il existe S modèles prédictifs de décomposition d'un cadavre, notés x_s , qu'il s'agit d'étalonner. Plus précisément, l'objectif annoncé de ForenSeek est d'étalonner le paramètre temps de chacun des modèles afin qu'ils reproduisent les observations de l'expert au moment de la découverte.

5.4 ForenSeek : objectifs, architecture et implémentation

Outre les visées théoriques des travaux présentés dans la partie II, les objectifs applicatifs initiaux du projet ForenSeek étaient de proposer un logiciel portable et léger disposant d'une interface graphique ergonomique et accessible des experts entomologistes. Les briques logicielles assemblées aboutissent à une version du logiciel ForenSeek – toujours en cours d'évaluation – apportant une aide pour répondre à la question suivante :

« A partir des prélèvements, quels sont les instants des pontes supportés par les modèles entomologiques x_s ? »¹⁶⁶

A partir de cette première question et des avis des différents modèles entomologiques, le logiciel tente enfin de répondre à la question :

« A partir des dates de ponte, quelles sont les heures possibles de la mort ? »

Dans cette avant-dernière section, accompagnée des annexes – c.f., pages 149–158 –, certaines précisions sur le logiciel ForenSeek sont apportées. Une présentation du projet est disponible à l'adresse <http://www.forensseek.org>.

¹⁶⁶Cette question est un cas particulier de la question posée à la page 89 : “Quels sont les meilleurs jeux de paramètres, supportés par l'ensemble des modèles x_s , expliquant les observations réelles ω_{obs} ?” où les jeux de paramètres remplacent les instants et où les observations remplacent les prélèvements.

5.4.1 Architecture et implémentation

5.4.1.1 Architecture et librairies

L'application ForenSeek utilise un ensemble de bibliothèques¹⁶⁷ Java sous licence libre¹⁶⁸ :

- *HSQLDB*¹⁶⁹ comme système de gestion de base de données pour disposer d'une base de données portable et légère ;
- *JPA* et *Hibernate*¹⁷⁰ comme couche de persistance pour manipuler aisément les données ;
- *MadKit* et *TurtleKit*¹⁷¹ pour la simulation ;
- *Swing*¹⁷² pour les interfaces graphiques ;
- *JFreeChart*¹⁷³ pour l'affichage des graphiques de résultats.

D'autres librairies Java propres à ForenSeek et spécifiques à certains processus présentés dans le chapitre 3, ont également été développées :

- une API relative aux processus de *Sélection* et de *Mise à jour* développée par G. Morvan et présentée dans [195] et [194, chap. 7] – c.f., p. 78 – ;
- *BeliefFunctionsAPI*, une bibliothèque pour la manipulation des fonctions de croyance.

Les principaux diagrammes de classes du SEAD sont présentés dans l'annexe A.

5.4.1.2 Interfaces graphiques

Afin que le SEAD soit utilisable par les experts entomologistes, des interfaces graphiques ont été conçues. Une succession d'écrans retrace ainsi le cycle de formalisation d'une expertise jusqu'à l'affichage des résultats :

1. définition de l'IPM maximum ;
2. précisions sur les températures de l'environnement ;
3. détails des caractéristiques du cadavre ;
4. définition de l'entomofaune ;
5. précisions sur les modèles entomologiques à utiliser ;
6. informations relatives aux prélèvements effectués ;
7. affichage en temps réel de l'évolution des simulations ;

¹⁶⁷En informatique, une bibliothèque, ou *API*, est un ensemble de fonctions, procédures et classes développé par un tiers, mis à disposition et utilisable lors d'un appel dans le programme principal.

¹⁶⁸Même si certaines spécificités existent, une telle licence peut permettre, sous couvert du respect de quelques contraintes, la copie, la diffusion ou la modification des codes et algorithmes utilisés. Pour plus de détails, lire par exemple [26].

¹⁶⁹C.f., <http://hsqldb.org>.

¹⁷⁰C.f., <http://www.hibernate.org>.

¹⁷¹C.f., sous-section 1.4.4.4 de chapitre 1.

¹⁷²C.f., <http://download.oracle.com/javase/6/docs/technotes/guides/swing>.

¹⁷³C.f., <http://www.jfree.org/jfreechart>.

8. présentation des résultats finaux.

Cette Interface Homme-Machine (IHM), élaborée en partenariat avec l'IML de Lille, et son expert entomologiste D. Charabidze, est présentée dans l'annexe B.

5.4.2 Agentification généralisée

Evoqué dans le chapitre 4 au sujet des *Agents-Validation* et *Agents-Paramètre*, le principe de l'agentification¹⁷⁴ est généralisé à l'ensemble des processus du SEAD : du processus de *Sélection* au processus de *Manipulation_{finale}* – c.f., fig. 3.7, p. 88. Pour simplifier, un unique *Agent-Expertise* se charge de l'ensemble de ces processus. Il effectue alors les étalonnages des modèles $x_s, \forall s \in [1, S]$. Ces étalonnages peuvent avoir lieu en parallèle, à l'aide de messages échangés avec des *Agents-Launcher* responsables de simulation – c.f., fig. 5.9. L'*Agent-Expertise* interroge successivement des *Agents-Launcher* à propos de la validité d'un modèle x_s initialisé au pas de temps $\omega_n \in \Omega$.

Lorsqu'un modèle est étalonné, l'*Agent-Expertise* effectue l'étape de *Manipulation_s* définie p. 109. Lorsque tous les processus de *Manipulation_s* sont clos, il effectue la *Manipulation_{finale}*, définie p. 136.

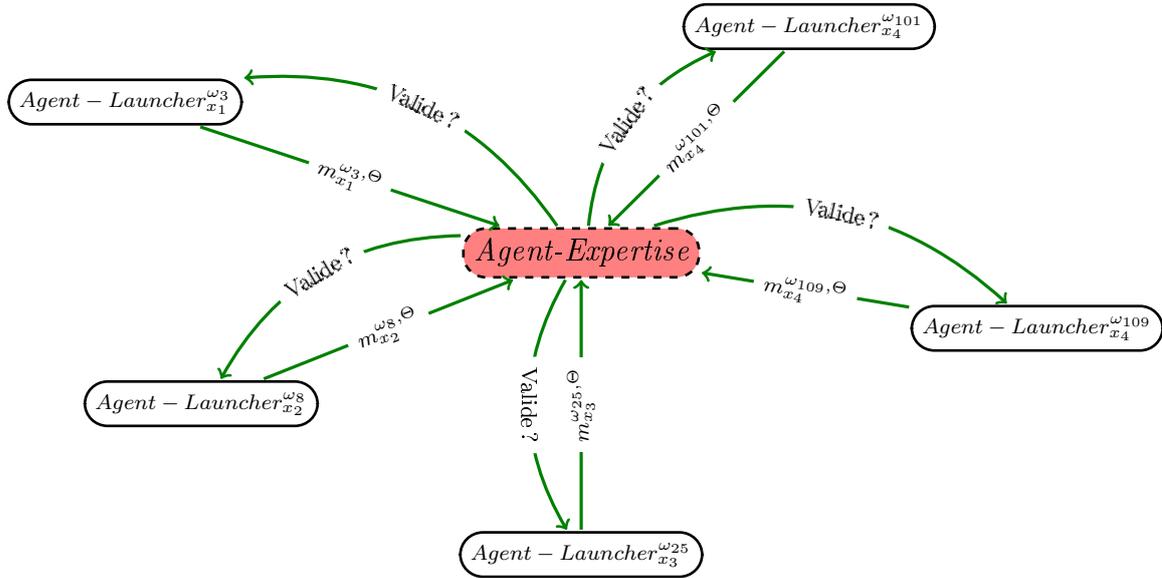


FIG. 5.9 – Exemple de messages échangés entre l'*Agent-Expertise* et des *Agents-Launcher*. Dans cette figure, quatre modèles sont en cours d'étalonnage. Les fonctions de masse de croyance retournées par les *Agents-Launcher* sont obtenues par l'équation 4.10, p. 108.

Deux types d'agents cohabitent donc dans le SEAD : les agents *réactifs* acteurs de la dégradation d'un corps et les agents plus *cognitifs*, acteurs du processus d'aide à la décision.

¹⁷⁴C.f., note de bas de page 131, p. 91.

5.4.3 Validation d'une simulation multi-agents

Les simulations sont validées à l'aide de l'architecture présentée dans le chapitre 4 et dans laquelle les *Agents-Larve* sont sondés par des *Agents-Paramètre*¹⁷⁵ du processus de *Validation*. Pour le moment, seules des simulations horaires sont possibles¹⁷⁶ et le processus de *Validation* ne dépend que d'un unique paramètre : le *taux de développement*.

Un prélèvement est caractérisé par une espèce p , $\forall p \in [1, P]$, et un taux de développement maximal à atteindre, noté a_p^{max} , observé sur l'insecte au moment de la découverte – c.f., remarque 5 et figure 5.3. Chaque prélèvement est ainsi agentifié en un *Agent-Paramètre*.

L'architecture pyramidale représentée sur la figure 4.1, p.99, est alors retrouvée :

1. une simulation est dirigée par un *Agent-Launcher* au fait des prélèvements effectués par l'expert ;
2. ces observations sont transférées à l'*Agent-Validation* qui crée autant d'*Agents-Paramètre* que de prélèvements ;
3. toutes les 12 heures¹⁷⁷, chaque *Agent-Paramètre* demande à 10% des insectes de son espèce leur croyance en leur taux de développement ;
4. les *Agents-Larve* répondent au maximum sous 12 heures ;
5. les réponses sont manipulées par les *Agents-Paramètre* suivant le cycle présenté dans le chapitre 4 et en fonction du taux maximal a_p^{max} observé par l'expert. Ils renvoient leur croyance en la validité de leur paramètre à l'*Agent-Validation* ;
6. l'*Agent-Validation* combine les réponses de ses *Agents-Paramètre* ;
7. ce cycle se répète ainsi toutes les 12 heures jusqu'à la fin de la simulation ou jusqu'à ce que l'invalidité soit constatée ;
8. lorsque la simulation n'est plus valide ou lorsque celle-ci est terminée, l'*Agent-Launcher* informe l'*Agent-Expertise* de son état.

Pour obtenir un compromis entre *diminution de la complexité algorithmique* et *précision* des validations, les intervalles de sondages ont été empiriquement définis à 12 heures. Cette durée permet un contrôle biquotidien des taux de développement des insectes d'une simulation. Le pourcentage de 10%, qui permet d'obtenir une représentativité suffisante des insectes, est actuellement défini empiriquement.

¹⁷⁵C.f., sous-section 4.2.3, p. 101, pour un rappel du fonctionnement de cet agent.

¹⁷⁶Des simulations journalières sont facilement envisageables, notamment pour l'utilisation d'autres modèles de développement, p. ex., se basant sur le modèle des ADD – relire note de bas de page n° 157.

¹⁷⁷C.-à-d., tous les 12 pas de temps de simulation.

5.4.4 Processus de *Manipulation*_{finale} au sein de ForenSeek

Lorsque, pour tous les modèles x_s , l'étalonnage et le processus de *Manipulation*_s – c.f., section 4.3, p. 109 – ont été effectués, l'*Agent-Expertise* dispose de S fonctions de croyance $m_{x_s}^\Omega$ – obtenues de l'équation 4.13 – exprimées sur l'ensemble $\Omega = \{\omega_1, \dots, \omega_n, \dots, \omega_N\}$. Dans ForenSeek, cet ensemble Ω correspond à l'ensemble des heures possibles des pontes.

Une fonction de masse de croyance $m_{x_s}^\Omega$ représente alors la croyance en les meilleurs instants de ponte supportée par le modèle x_s . Pour obtenir cette même croyance supportée par l'ensemble des modèles entomologiques, l'*Agent-Expertise* effectue une combinaison conjonctive prudente finale définie par :

$$m^\Omega = \bigotimes_{s \in [1, S]} m_{x_s}^\Omega. \quad (5.8)$$

Pour cette dernière combinaison, l'opérateur prudent – défini p. 56 – aura été préféré en raison de l'absence évidente de distinctivité des modèles entomologiques, basés sur des modèles de régression communs ou issues des mêmes séries de données biologiques. Pour déterminer et afficher les instants des pontes, une transformation pignistique est possible.

5.5 Résultats

La validation d'un système d'aide à la décision dédié à une telle application est une étape difficile. De nombreuses contraintes d'ordre éthique et législatif sont en effet un frein à la mise en place d'expériences en conditions contrôlées¹⁷⁸. Quant aux expertises entomologiques réalisées dans le cadre d'enquêtes judiciaires, les heures exactes des pontes ne sont jamais connues et l'unique connaissance disponible est la conclusion formulée par les experts¹⁷⁹. De plus, faute d'une standardisation des protocoles de prélèvements, de nombreuses expertises se basent sur des informations imparfaites et/ou incomplètes. Le nombre d'expertises adaptées permettant de vérifier le bon fonctionnement du SEAD est donc limité.

Une première phase de validation a donc été effectuée à partir de quatre expertises sélectionnées par un expert entomologiste de l'IML de Lille, Damien Charabidze. Ces expertises ont été choisies pour leur représentativité, leur complexité limitée ainsi que pour la fiabilité accordée aux décisions de l'expert. Les décisions fournies par le SEAD sont confrontées aux conclusions des rapports d'expertise.

Pour que l'expert puisse valider précisément les résultats fournis par le SEAD, les probabilités des dates de ponte sont présentées par espèce. La réponse à la seconde question "quelles sont les heures possibles de la mort ?" est obtenue à partir d'une dernière opération d'extension vide – c.f., eq. 2.28 – permettant un changement de cadre de discernement¹⁸⁰. Dans l'application, un deuxième écran affiche ainsi la probabilité pignistique des heures possibles de la mort. Pour des raisons de clarté, cet écran – visible dans l'annexe B, p. 164 – n'est pas utilisé dans les résultats suivants. Pour répondre à cette seconde question, deux décisions sont proposées à l'utilisateur : une première jugée *prudente* – correspondant à la date des dernières pontes sur le cadavre – et une autre dite *engagée* – correspondant à la date des premières pontes sur le corps.

Par souci de confidentialité, certaines informations ne peuvent être présentées dans ce rapport. Les résultats suivants se limitent donc aux informations biologiques essentielles.

¹⁷⁸P. ex., l'observation de la décomposition d'un cadavre n'est possible que sur un terrain adapté et après l'obtention de nombreuses autorisations.

¹⁷⁹Dans certains cas, des témoignages ou des aveux peuvent confirmer les conclusions de l'expert mais, ces informations sont rarement à la disposition des laboratoires d'analyses entomologiques.

¹⁸⁰Cette dernière opération n'est pas détaillée dans ce rapport.

5.5.1 Expertise a

Caractéristiques :

- Date de disparition de la personne : 16/06/2008
- Date de découverte du cadavre : 29/06/2008
- Température de l'environnement : 25°C (fixe)
- Espèces prélevées : *Lucilia sericata*, *Protophormia terraenovae*, *Phormia regina*

Décisions de l'expert :

Dates des premières pontes estimées :

- *Lucilia sericata* : le 19/06/2008 (1 modèle ADD)
- *Protophormia terraenovae* : le 20/06/2008 (1 modèle ADD)
- *Phormia regina* : le 24/06/2008 (1 modèle ADD)

Dates du décès : « Les conditions climatiques étant favorables durant l'été à l'activité des insectes, il est probable que le décès ait précédé de peu les premières pontes (le 19/06/2008). »

Décisions du système

Dates des premières pontes estimées – c.f., fig. 5.10 – :

- *Lucilia sericata* : le 18/06/2008 entre 13h00 et 18h00 (2 modèles ADH)
- *Protophormia terraenovae* : le 21/06/2008 vers 19h00 (2 modèles ADH)
- *Phormia regina* : le 24/06/2008 vers 08h00 (2 modèle ADH)

Remarque 6. Soit 8 modèles testés $x_s, \forall s \in [1, 8]$, c.f., eq. 5.7.

Dates du décès :

- décision engagée : mort avant le 18/06/2008 à 13h00
- décision prudente : mort avant le 24/06/2008 vers 08h00

Commentaires

Les décisions fournies par le SEAD sont très proches des conclusions de l'expert. Les différences d'un jour constatées pour les dates de ponte de *Protophormia terraenovae* et *Lucilia sericata* sont dues aux modèles de régression utilisés par le SEAD qui tendent respectivement à sous-estimer et sur-estimer la vitesse de développement par rapport aux modèles de l'expert. Le moment des pontes en est donc d'autant reculé ou avancé. Au vu des informations disponibles, les dates fournies par le SEAD sont jugées très satisfaisantes pour l'expert.

5.5.2 Expertise b

Caractéristiques :

- Date de disparition de la personne : 10/02/2007
- Date de découverte du cadavre : 27/02/2007
- Température de l'environnement : 20°C (fixe)
- Espèces prélevées : *Caliphora vicina*

Décisions de l'expert :

Dates de pontes estimées :

- *Caliphora vicina* : 19/02/2007 (1 modèle ADD)

Dates du décès : « L'analyse des insectes prélevés sur le corps indique que la victime est morte au plus tard le 19 février. »

Décisions du système

Dates des premières pontes estimées – c.f., fig. 5.11 – :

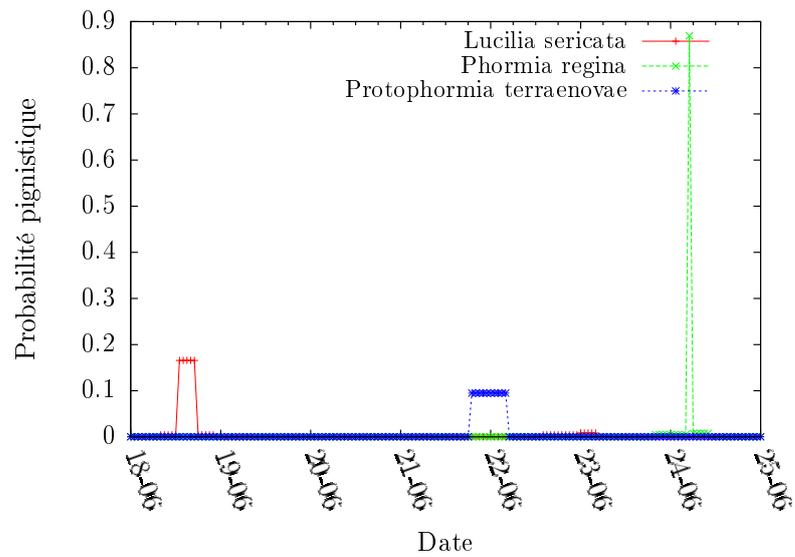
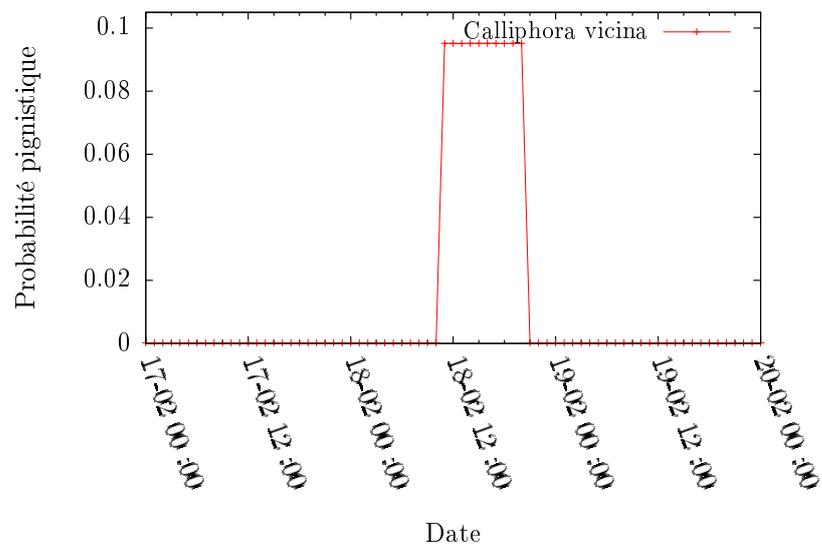
- *Caliphora vicina* : le 18/02/2007 entre 11h00 et 20h00 (3 modèles ADH + Stinner)

Dates du décès :

- décision engagée : mort avant le 18/02/2007 à 11h00
- décision prudente : mort avant le 18/02/2007 à 20h00

Commentaires

Les deux conclusions sont jugées similaires par l'expert. On explique la différence de quelques heures par l'utilisation d'un modèle en ADH entraînant une précision accrue par rapport au modèle des ADD utilisé par l'expert. Les décisions du SEAD peuvent être jugées plus fiables en raison du nombre plus important de modèles utilisés.

FIG. 5.10 – *Expertise a* : probabilités pignistiques des heures de pontes estimées.FIG. 5.11 – *Expertise b* : probabilité pignistique des heures de pontes estimées.

5.5.3 Expertise c

Caractéristiques :

- Date de disparition de la personne : 28/05/2010 à 00 :00
- Date de découverte du cadavre : 07/06/2010 à 15 :00
- Températures de l’environnement : variables (fournies par la station météorologique la plus proche)
- Espèces prélevées : *Lucilia sericata*, *Caliphora vicina*, *Phormia regina*, *Caliphora vomitoria*

Décisions de l’expert

Dates des premières pontes estimées – c.f., fig. 5.12 – :

- *Lucilia sericata* : le 31/05/2010 (1 modèle ADH)
- *Caliphora vicina* : le 28/05/2010 (1 modèle ADH)
- *Phormia regina* : le 29/05/2010 (1 modèle ADH)
- *Caliphora vomitoria* : le 29/05/2010 (1 modèle ADH)

Dates du décès : « Premières pontes autour du 28/05/2010 et 29/05/2010. Il est probable que les premières pontes aient suivi de peu la mort de l’individu. »

Décisions du système

Dates des premières pontes estimées :

- *Lucilia sericata* : entre le 30/05/2010 à 23h00 et le 31/05/2010 à 04h00 (2 modèles ADH + Stinner)
- *Caliphora vicina* : le 28/05/2010 entre 16h00 et 18h00 (2 modèles ADH + Stinner)
- *Phormia regina* : le 30/05/2010 entre 12h00 et 22h00 (2 modèles ADH + Stinner)
- *Caliphora vomitoria* : le 28/05/2010 entre 04h00 et 14h00 (2 modèles ADH + Stinner)

Dates du décès :

- décision engagée : mort avant le 28/05/2010 à 04h00
- décision prudente : mort avant le 31/05/2010 à 04h00

Commentaires

Les décisions du SEAD concordent avec celles de l’expert. Cependant, il est important de noter que des dysfonctionnements semblent exister au niveau des modèles de ponte : les mouches, respectant habituellement un cycle nyctéméral, ne devraient pas pondre la nuit [194, p. 76]. Des travaux d’amélioration de ce modèle sont en cours.

5.5.4 Expertise d

Caractéristiques

- Date de disparition de la personne : 17/02/2007
- Date de découverte du cadavre : 26/03/2007
- Températures de l'environnement : variables (fournies par la station météorologique la plus proche)
- Espèces prélevées : *Caliphora vicina*, *Caliphora vomitoria*

Décisions de l'expert

Dates des premières pontes estimées – c.f., fig. 5.13 – :

- *Caliphora vicina* : le 10/03/2007
- *Caliphora vomitoria* : le 04/03/2007

Dates du décès : « Les pontes ont eu lieu au plus tard le 10 mars 2007 et plus probablement entre le 4 mars et le 10 mars 2007. Le corps se trouvant en extérieur et le climat étant favorable à l'activité des insectes, il est probable que la mort a précédé de peu les premières pontes (quelques heures). »

Décisions du système

Dates des premières pontes estimées :

- *Caliphora vicina* : le 11/03/2007 à 06h00 (2 modèles ADH)
- *Caliphora vomitoria* : entre le 02/03/2007 à 23h00 et le 03/03/2007 à 03h00 (2 modèles ADH)

Dates du décès :

- décision engagée : mort avant le 02/03/2007 à 23h00
- décision prudente : mort avant le 11/03/2007 à 06h00

Commentaires

Les décisions de l'expert et du système sont très proches. L'écart est, comme pour l'expertise *a*, du à une sous-estimation de ForenSeek de la vitesse de développement des larves de *Caliphora vomitoria*. Il est fort possible que l'utilisation et la combinaison d'autres modèles entomologiques fassent converger les dates du système et celles de l'expert.

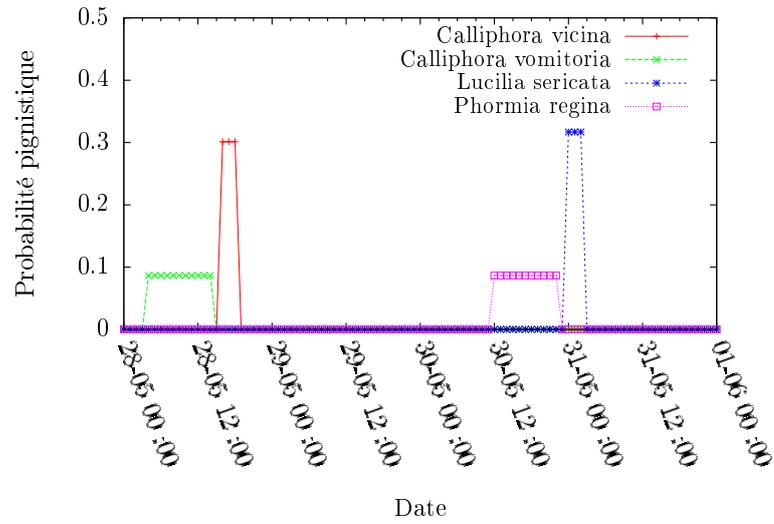


FIG. 5.12 – *Expertise c* : probabilités pignistiques des heures de pontes estimées.

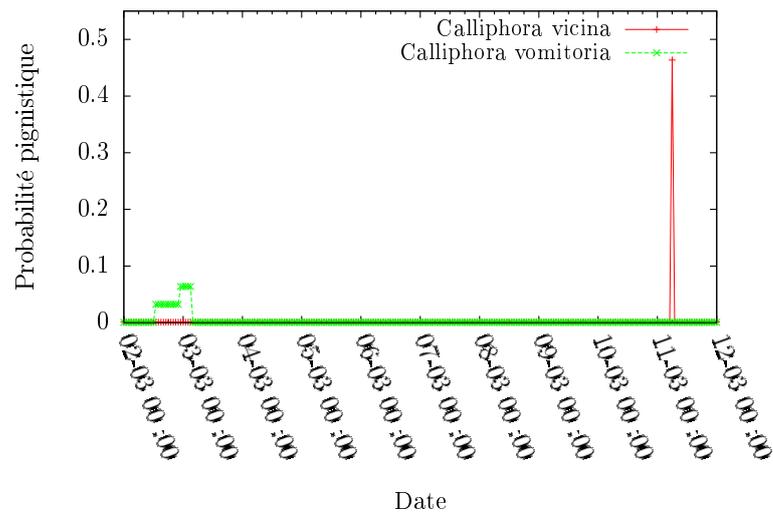


FIG. 5.13 – *Expertise d* : probabilités pignistiques des heures de pontes estimées.

5.6 Perspectives et conclusions de l'application

Les premiers résultats du projet ForenSeek, présentés à partir de cas réels, sont jugés prometteurs par l'expert du domaine. Même si dans certains cas, quelques heures séparent les conclusions de l'expert et les décisions du système, ces différences sont négligeables au vu de la fiabilité du SEAD. Ce dernier semble donc bien accomplir son rôle de *conseil* pour aider l'expert entomologiste dans sa décision¹⁸¹. L'application profite ainsi de la puissance de calcul des ordinateurs pour simuler l'ensemble de l'écosystème *environnement-cadavre-entomofaune* et tester plusieurs modèles entomologiques.

En dépit des bons résultats, deux catégories de remarques peuvent être formulées. Bien que les données biologiques soient nombreuses dans la littérature, certaines briques des modèles prédictifs doivent encore être étudiées et vérifiées ; c.f., p. ex., les modèles de population, de ponte et de variabilité. Dans le cadre de l'application en entomologie, l'absence d'informations connues *a posteriori*, pouvant servir au processus de *Rétroaction* – c.f., p. 89 – peut apparaître gênante pour le calcul des facteurs de fiabilité des différents modèles. Cette problématique apparaît lorsque les modèles sont totalement conflictuels. De plus, les quatre expertises testées ont été choisies pour leur complexité *limitée* : l'effet des masses de larves et l'inertie thermique du cadavre n'impactent significativement pas le développement des diptères. La validation du SEAD doit donc se poursuivre avec des expertises plus complexes, pour lesquelles l'approche *manuelle* habituelle mène à des incohérences pouvant être expliquées par des phénomènes thermiques émergents.

D'un point de vue théorique, les résultats obtenus semblent confirmer l'originalité et la qualité de l'architecture proposée. L'apport de la théorie des fonctions de croyance pour l'étude de problèmes complexes et, plus spécifiquement, pour la validation de simulations orientées agents, est avéré. Une limitation principale apparaît cependant lorsque la cardinalité du cadre de discernement devient trop importante. Dans ce cas, les opérations de combinaison deviennent trop gourmandes en complexité algorithmique. Dans ForenSeek, pour obtenir des résultats dans des délais raisonnables, lorsque les pas de temps sont de l'ordre de l'heure, le cadre de discernement – c.-à-d., l'intervalle *post mortem* maximum – doit être inférieur ou égal à 5 semaines environ. Cette contrainte calculatoire limite également l'utilisation du nombre de modèles par espèce à 2 ou 3, selon les cas.

Pour remédier à ce problème, des procédés de diminution des temps de calcul doivent être développés. Par exemple, il est envisagé une utilisation de méthodes récursives de raffinement/grossissement pour parcourir intelligemment le cadre de discernement. Ce principe récursif pourra être couplé à une utilisation alternative de modèles aux précisions différentes – p. ex., jour, heure. Enfin, dans la littérature, des solutions d'optimisation ont été proposées pour limiter le nombre d'éléments focaux des fonctions de masse de croyance – p. ex., [76] – ou pour effectuer une optimisation algorithmique des combinaisons – p. ex., [288, p. 32]. A l'avenir, il semble par conséquent primordial de s'intéresser à la réduction de la complexité algorithmique.

¹⁸¹Et non, bien sûr, prendre la décision en son nom.

Conclusions et perspectives générales

Synthèse La perception, la compréhension et l'analyse absolues d'un système complexe sont impossibles. Dans l'Histoire, des courants de pensées ont tenté de réduire et décomposer la complexité en éléments simples, dépourvus d'interaction. Pourtant, face à un problème complexe, des solutions complexes doivent être envisagées. Lors de cette étude, après avoir retracé l'évolution historique de la pensée occidentale, la *pensée complexe* s'est imposée comme une alternative nécessaire au traitement et à l'analyse de la complexité, universelle et permanente – c.f., chap. 1. L'origine de ces travaux vient des idées présentées dans le premier chapitre. Ils aboutissent, dans la partie II, à une architecture de Système Evidentiel d'Aide à la Décision (SEAD) – c.f., chap. 3. Un tel système met en interaction deux outils complémentaires : les simulations orientées agents et la théorie des fonctions de croyance. Le premier est adapté à la simulation de systèmes complexes et le second, approprié à la représentation et la manipulation des informations imparfaites.

Le chapitre 3 décompose le SEAD en une succession – cyclique – de processus primitifs, acteurs du processus global de la décision. Les objectifs principaux sont d'étalonner plusieurs modèles d'un système réel pour déterminer les jeux de paramètres susceptibles d'expliquer au mieux une observation réelle. Deux principes sont à retenir : l'*agentification* et l'*évidentialisation* des processus de décision. Chacun d'eux vise à répondre à une question intermédiaire et construit progressivement ses croyances dans le cadre de la théorie des fonctions de croyance. Le chapitre 4 détaille un des processus centraux du SEAD : le processus de *Validation*. Au sein d'une architecture pyramidale, des agents collaborent à la validation d'une simulation. Les informations véhiculées sont modélisées sous la forme de fonctions de masse de croyance. Plusieurs opérations de la théorie des fonctions de croyance sont utilisées et permettent d'aboutir à une fonction de masse exprimant la validité de la simulation.

L'architecture théorique du SEAD est mise en application pour le développement d'un outil d'aide à la décision destiné aux experts en entomologie médico-légale – c.f., partie III. Les premiers résultats de l'application ForenSeek, à partir de véritables expertises judiciaires, ont été présentés. L'application, toujours en cours de validation, est jugée très prometteuse. Son développement se poursuit et la finalisation d'une première version d'évaluation est imminente.

Autour du SEAD Concernant l'application ForenSeek, un protocole de validation du SEAD, à partir d'expertises réelles plus complexes, plus nombreuses et pour lesquelles la vérité est disponible, doit être mis en place. De nouveaux travaux de recherche sont sur le point d'être amorcés pour le développement des méthodes, algorithmes et interfaces graphiques relatifs au processus de *Rétroaction* – c.f., p. 89. Ces travaux sont une des pierres angulaires de l'amélioration générale du SEAD.

La validation de simulations orientées agents est une problématique récurrente à laquelle sont confrontés nombre de modélisateurs. L'architecture présentée effectue la validation des SOA à partir des propriétés des agents et des groupes d'agents. Les travaux futurs devront aborder la prise en compte des propriétés émergentes.

Pour ce faire, des perspectives intéressantes se trouvent sans doute dans la considération de méta-informations modélisées sous la forme d'une *logique de description* et s'inspirant de langages d'ontologies évidentielles : p. ex. *BeliefOWL* [99]. Les objectifs souhaités seraient de fournir au SEAD les moyens de *s'auto-analyser* et de *rétroagir sur lui-même de lui-même* grâce à une description élaborée et évolutive de son état. Les finalités de l'utilisation d'une logique de description au sein du SEAD pourraient être de limiter l'utilisation des SOA et d'anticiper, en fonction de nouvelles observations et de connaissances déjà disponibles, les futurs résultats des simulations et des étalonnages.

Autour des fonctions de croyance Même si la flexibilité et la richesse de la théorie des fonctions de croyance, pour représenter et manipuler des informations imparfaites, apparaissent évidentes, elles engendrent malheureusement un coût important : la complexité algorithmique [206, 288] – argument d'ailleurs souvent avancé « pour discréditer la théorie » [173, p. 46]. Plus le nombre d'éléments focaux est important – pouvant atteindre $2^{|\Omega|}$ –, plus le coût computationnel devient conséquent, c.-à-d., plus les opérations sur les fonctions de masse sont consommatrices en temps de calcul et en mémoire. Bien qu'il soit possible de contraindre à *l'origine* cette complexité, p. ex., lors de l'estimation des fonctions de masse en limitant le nombre d'éléments focaux, la fusion de plusieurs fonctions de masse entraîne inévitablement une augmentation du nombre d'éléments focaux. Pour y remédier, deux catégories de *solutions* sont envisageables :

1. celles basées sur la limitation ou la réduction du nombre d'éléments focaux, p. ex., [76] ;
2. celles basées sur une optimisation algorithmique, p. ex., fondées sur la transformée de Möbius rapide¹⁸² ou des méthodes de Monte-Carlo [288, p. 32].

De tels procédés devront à terme, être mis en place lors de l'utilisation de la théorie dans le cadre de systèmes complexes.

La sous-section 2.3.3 du chapitre 2 met l'accent sur des opérateurs de combinaison idempotents, basés sur des normes triangulaires. Ces propositions ouvrent la voie au dé-

¹⁸²La transformée de Möbius rapide est à la théorie des fonctions de croyance ce qu'est la transformée de Fourier rapide au traitement du signal [249, p. 8].

veloppement de nouveaux opérateurs de combinaison et, comme rappelé dans [72, *conclusion*], permettent d’envisager l’émergence de nouvelles familles de combinaison, p. ex. adaptatives, aussi riches que celles proposées par la théorie des possibilités. De plus, il semble important de remarquer les travaux originaux de [57, 58], proposant une généralisation algorithmique des opérateurs de combinaison¹⁸³.

Enfin, ce manuscrit ne traite que de la *ramification discrète* des fonctions de croyance. Une proportion croissante des travaux et publications actuels aborde les fonctions de croyance en continu, dont les fondations ont été apportées par [257, 251]. En cette année 2010, la *ramification continue* de la théorie ne peut être négligée pour l’étude de tout système de fusion, qu’il soit plus ou moins complexe. Les exemples récents sont abondants, p. ex., [140, 75, 88].

Les travaux entre biologistes et informaticiens/automaticiens se poursuivent au sein du *Pôle de Compétences Recherche en Ingénierie et Sciences du Vivant* – c.f., avant-propos, p. 115 – et, plus généralement au travers de groupes de discussions initiés entre différents laboratoires franco-belges¹⁸⁴. Les recherches en entomologie médico-légale et l’application ForenSeek ne sont donc que les prémisses de collaborations bio-informatiques laissant présager de belles perspectives. La thématique générale des systèmes d’aide à la décision appliqués aux systèmes complexes reste porteuse et présente un avenir brillant. Les ambitions et objectifs futurs seront de mettre en œuvre l’architecture et ses extensions dans d’autres domaines applicatifs – p. ex. pour la logistique et le transport – et de continuer à profiter des richesses de ces échanges interdisciplinaires.

¹⁸³Une implémentation de ces travaux est disponible à l’adresse <http://refereefunction.fredericdambreville.com>.

¹⁸⁴C.-à-d., le laboratoire d’entomologie médico-légale de l’Institut de Médecine Légale de Lille, l’unité d’écologie sociale de l’Université Libre de Bruxelles, l’unité d’entomologie de la Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, l’Université de Louvain et le laboratoire environnement et santé de la Faculté Libre des Sciences et Technologies de Lille. Ces collaborations traitent des comportements agrégatifs des insectes pré-sociaux et tentent de dégager des invariants à la base de ces systèmes agrégatifs en utilisant la modélisation informatique et les outils de traitement et de manipulation des informations incertaines.

Annexes

Annexe A

Implémentation du projet ForenSeek : les principaux diagrammes de classes

Dans cette annexe sont présentés, sous forme de diagrammes de classes, les principaux packages et classes du projet ForenSeek. Par souci de clarté et de confort – plusieurs dizaines de milliers de lignes de code composent en effet le projet –, toutes les méthodes et relations ne figurent pas dans les diagrammes suivants.

A.1 Package *forenseek*

A.1.1 Sous-packages

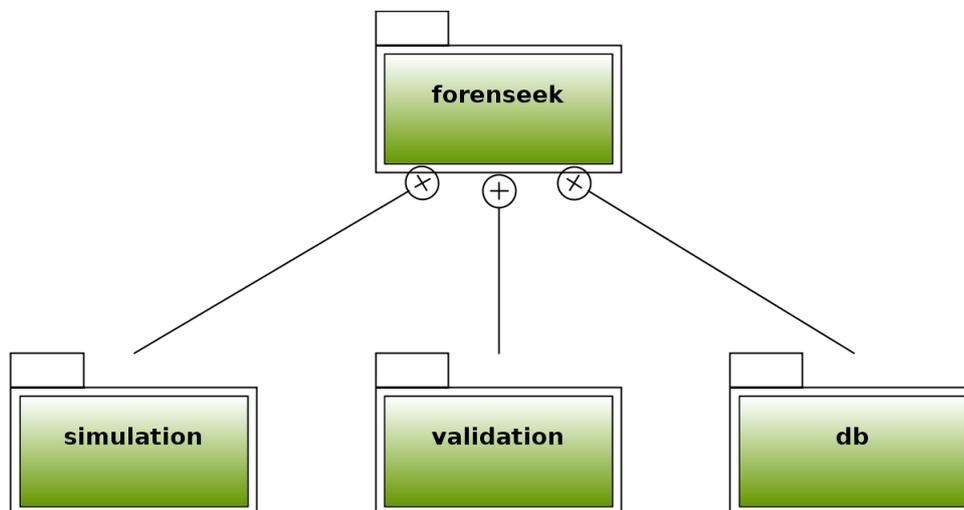


FIG. A.1 – Le package *forenseek* correspond à la racine du projet ForenSeek et est constitué des trois sous-packages correspondant aux trois fonctions principales du logiciel : gestion de la base de données – package *db* –, gestion des simulations et validation des simulations. Ces trois sous-packages sont détaillés dans les pages suivantes.

A.1.2 Classes principales

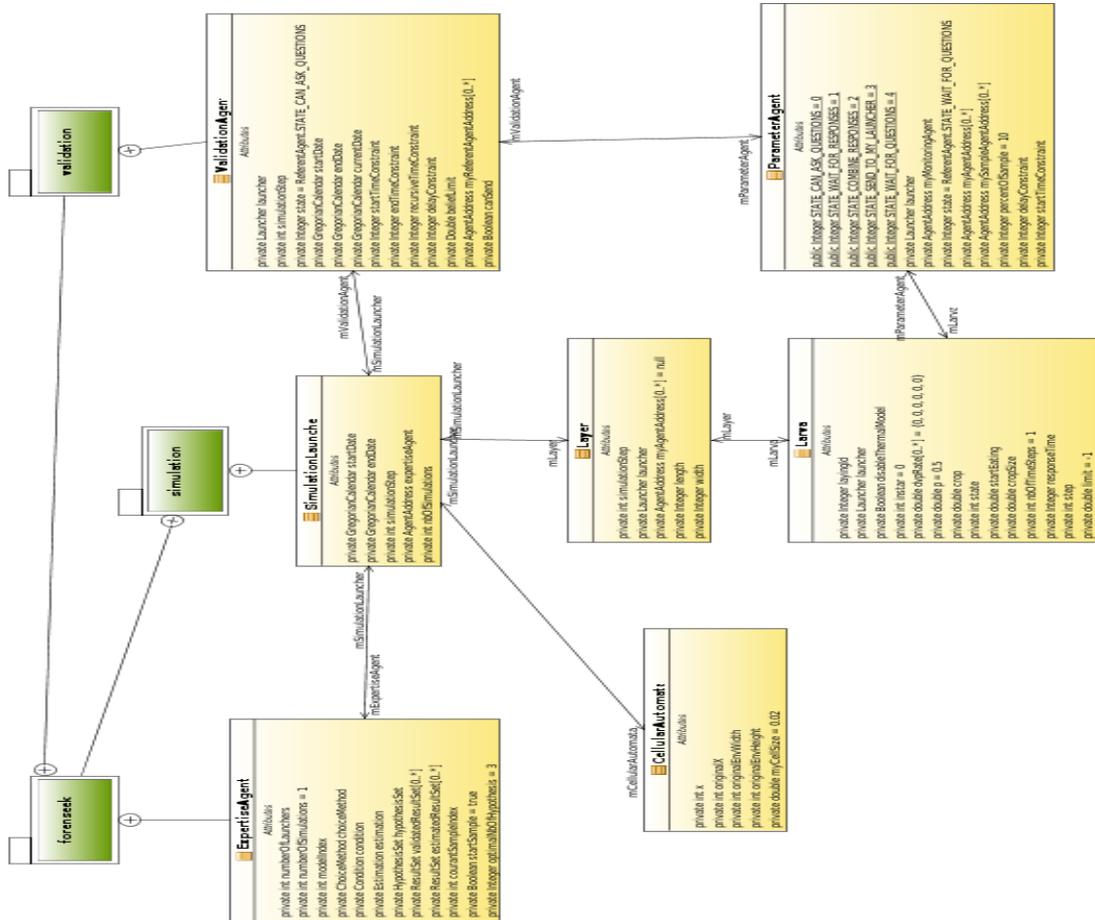


FIG. A.2 – Toutes les classes de ce diagramme correspondent à des agents – c.-à-d. qu’elles étendent des classes de MadKit/TurtleKit. L’*ExpertiseAgent* est l’agent le plus élevé du système : il gère l’ensemble des processus de calibration des différents modèles ainsi que les résultats des expertises. Un *SimulationLauncher* correspond à un modèle de décomposition particulier. Dès qu’il est lancé par un *ExpertiseAgent*, il lance les agents modélisant le cadavre – classe *CellularAutomata* – et modélisant les mouches gravides – classe *Layer*. Les agents *Layer* exécutent les agents larves – classe *Larva*. Le launcher lance également l’agent responsable de la validation – classe *ValidationAgent* – qui exécutent les *ParameterAgents*. Ces derniers sondent les agents de la simulation.

A.2 Package *db*

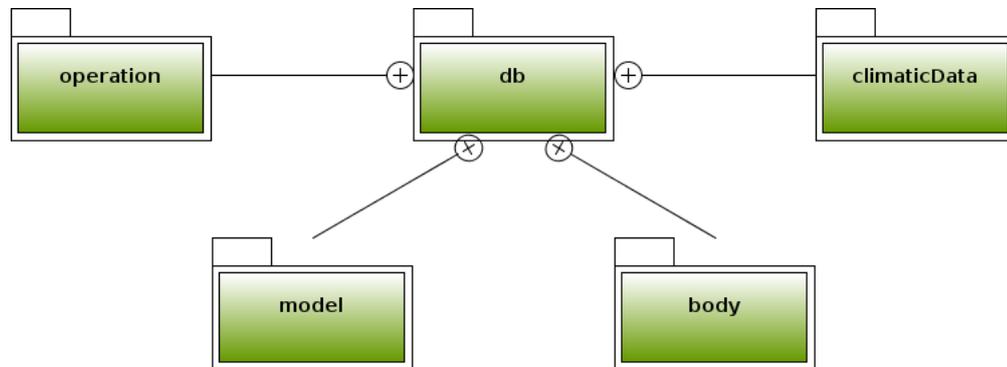


FIG. A.3 – Ce package correspond à l'ensemble des classes relatives à la base de données. L'ensemble des données biologiques y sont gérées – et implicitement stockées puisque toutes ces classes sont persistantes grâce à JPA et Hibernate. Chaque nouvelle expertise est également enregistrée via ce package. Le sous-package *operation* regroupe les classes relatives aux expertises entomologiques. Le package *model* regroupe les classes liées aux modèles biologiques. Le package *body* intègre l'ensemble des classes relatives au cadavre et à l'automate cellulaire. Le package *climaticData* regroupe l'ensemble des classes permettant la manipulation des données climatiques. Ces sous-packages sont détaillés ci-dessous.

A.2.1 Package operation

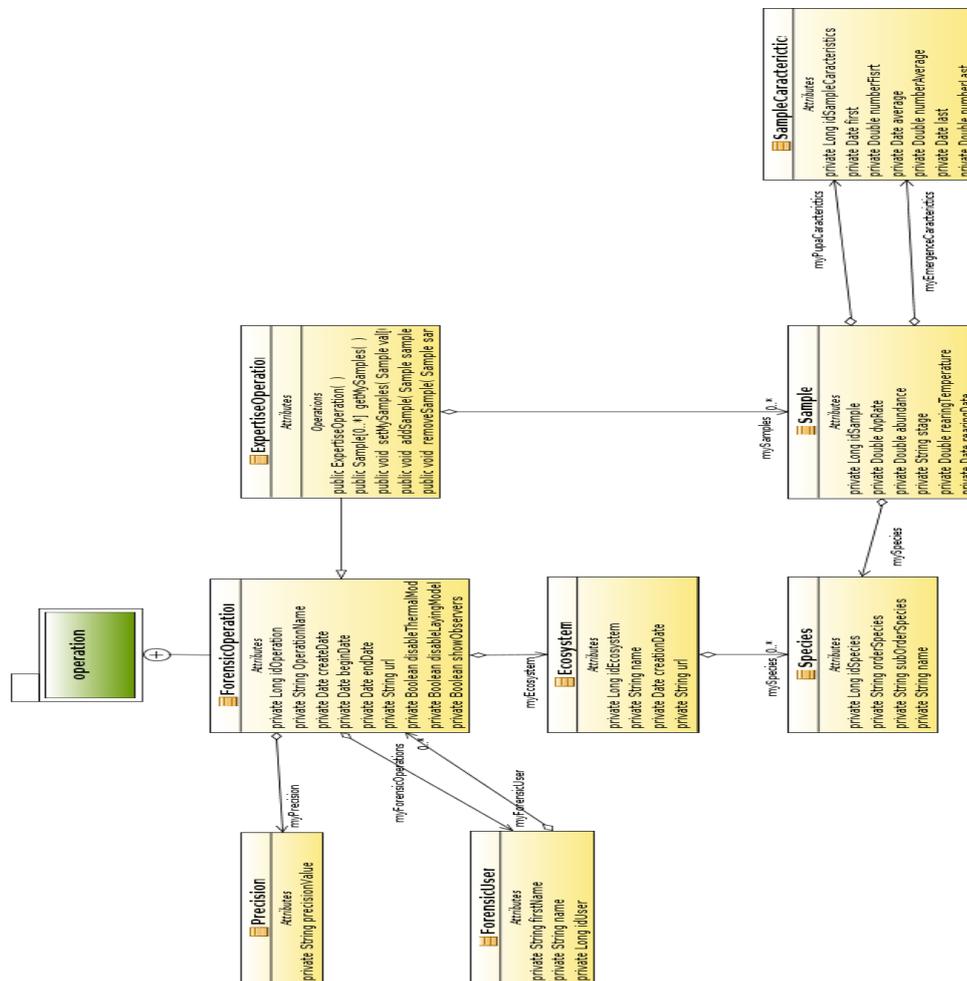


FIG. A.4 – La classe *ExpertiseOperation* caractérise une expertise entomologique. Elle est constituée d'un *Ecosystem* composé d'espèces – classe *Species*. Les classes *Sample* et *SampleCharacteristics* modélisent les prélèvements effectués par l'expert. La possibilité a été laissée dans ForenSeek de restreindre les accès en fonction de l'identifiant utilisateur – classe *ForensicUser*.

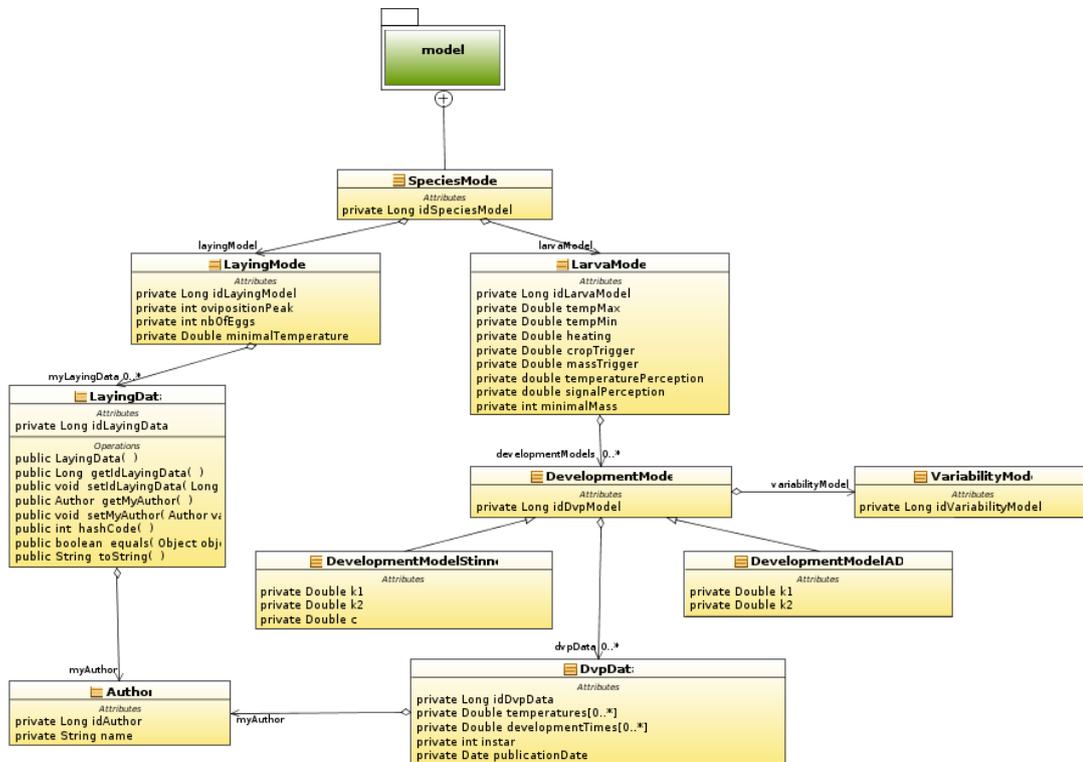
A.2.2 Package *model*

FIG. A.5 – Le package *model* est un package central dans ForenSeek. Chaque *Species-Model* représente un modèle particulier de décomposition d'un cadavre utilisé par un *SimulationLauncher*. C'est dans ce package que sont gérés les modèles de développement : classes *DevelopmentModel*, *DevelopmentModelStinner*, *DevelopmentModelADH* – pour les modèles de régression – et *DvpData* – pour les séries de données biologiques, c.f., p. 121.

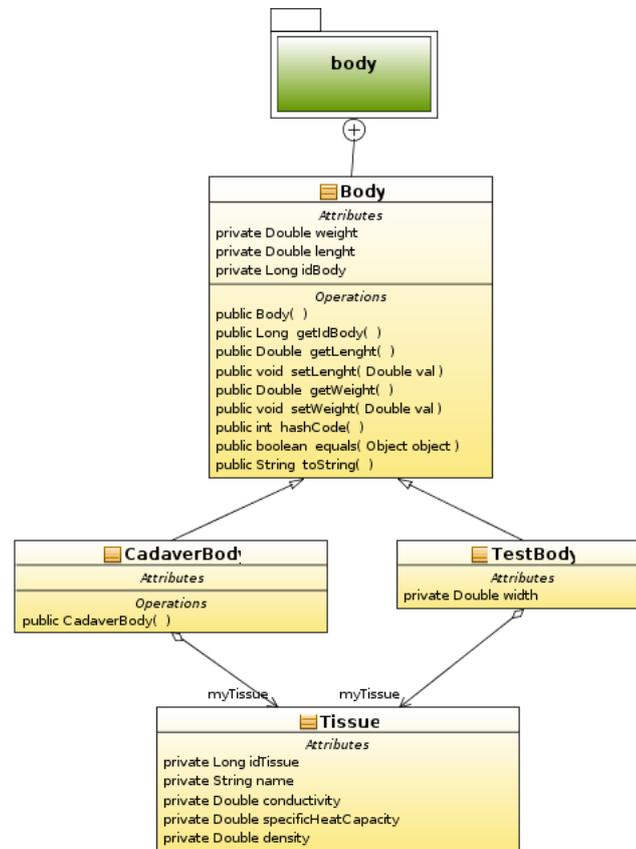
A.2.3 Package *body*

FIG. A.6 – C'est dans ce package que sont situées les classes relatives à l'automate cellulaire modélisant le cadavre.

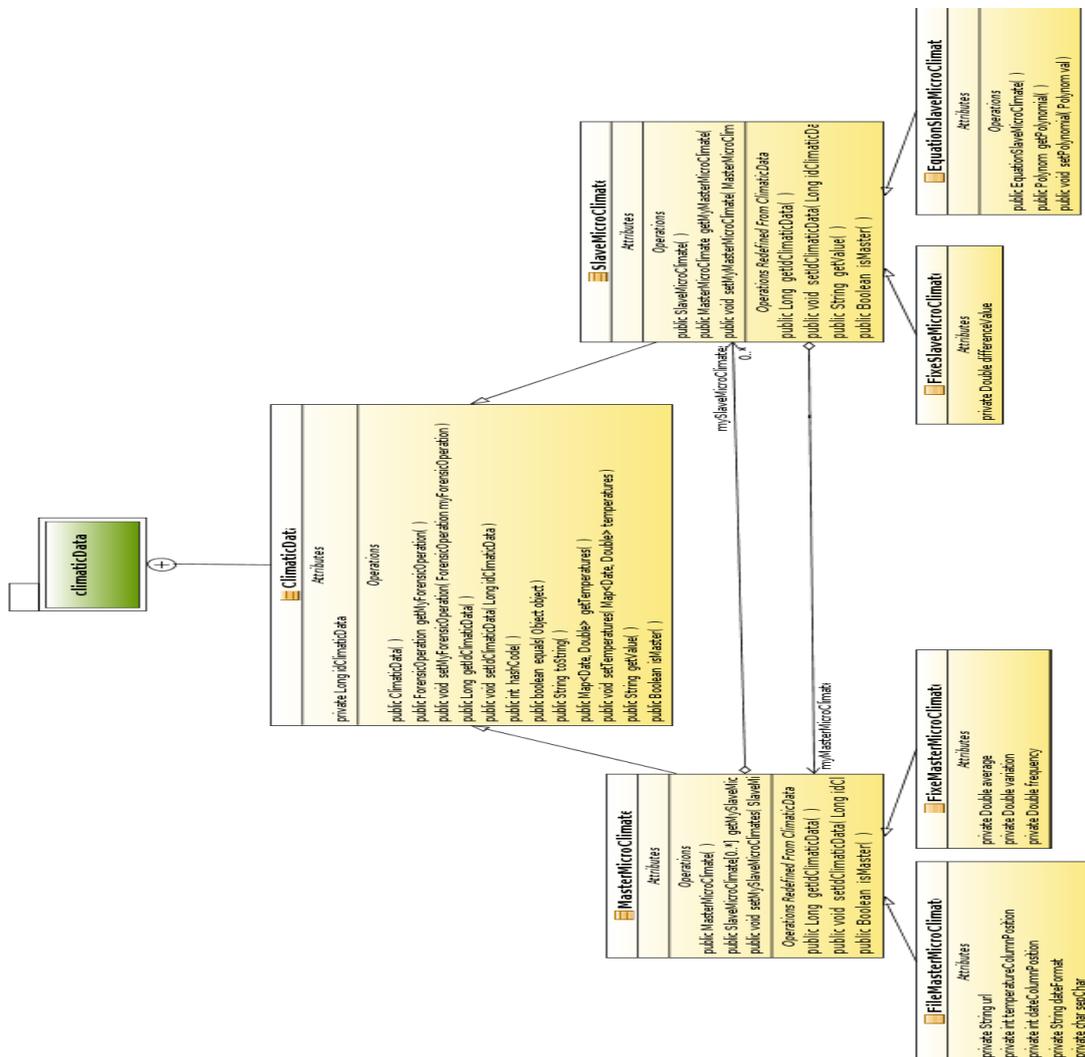
A.2.4 Package *climaticData*

FIG. A.7 – Pour prendre en compte les différents micro-climats, un ensemble de classes permettent d'importer des fichiers de températures fournis par Météo France – classe *FileMasterMicroClimate* ou d'exécuter des expertises à température fixe – classe *FixedMasterMicroClimate*.

A.2.5 Package validation

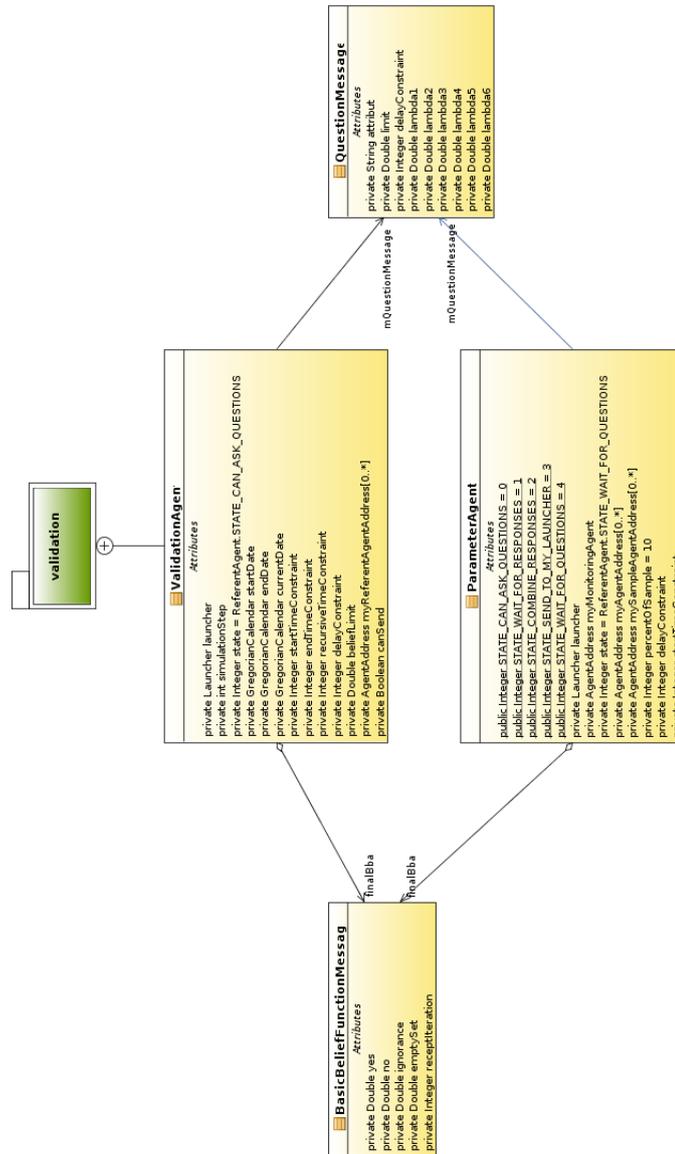


FIG. A.8 – Les quatre classes principales issues de l'implémentation des travaux présentés dans le chapitre 4.

Annexe B

Interfaces graphiques : aperçus des principaux écrans

Des interfaces graphiques basées sur l'*API Swing* ont été développées. Elles facilitent la saisie des informations des experts entomologistes ainsi que la visualisation des résultats et décisions du système. Les écrans sont présentés dans leur ordre logique d'apparition.



FIG. B.1 – Écran d'accueil : choix possible entre une utilisation en mode *expertise* ou en mode *simulation* – ce dernier mode, où les processus d'étalonnage sont désactivés, peut être utile à la visualisation d'une unique simulation.



FIG. B.2 – Ecran permettant de choisir entre une expertise précédemment enregistrée en base ou la création d'une nouvelle expertise.

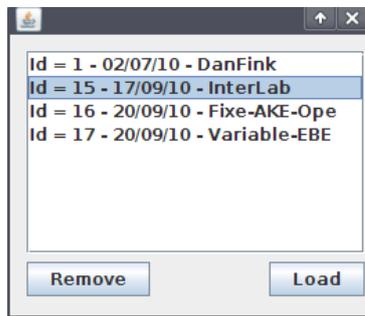


FIG. B.3 – Ecran de sélection affichant la liste des expertises présentes en base de données.

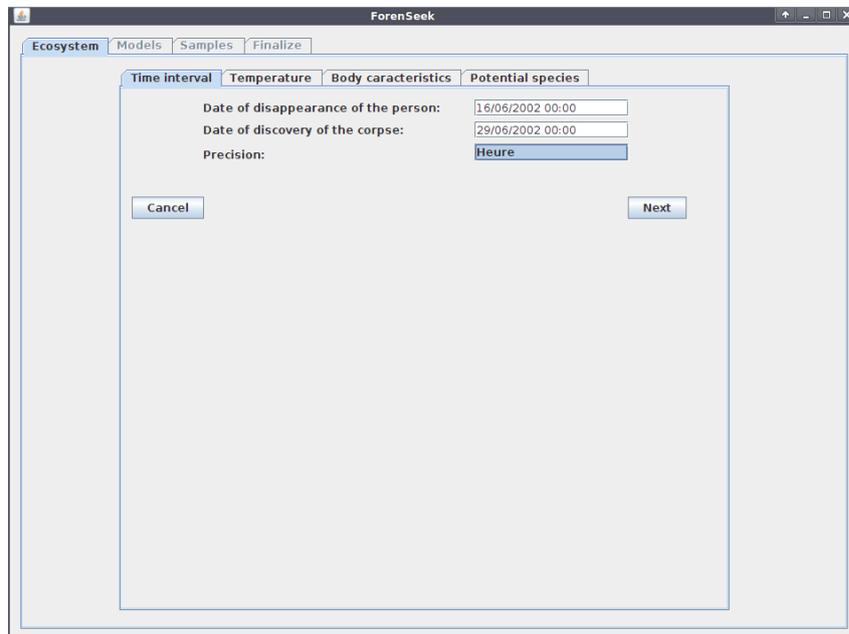


FIG. B.4 – Définition de l'intervalle *post mortem* maximum.

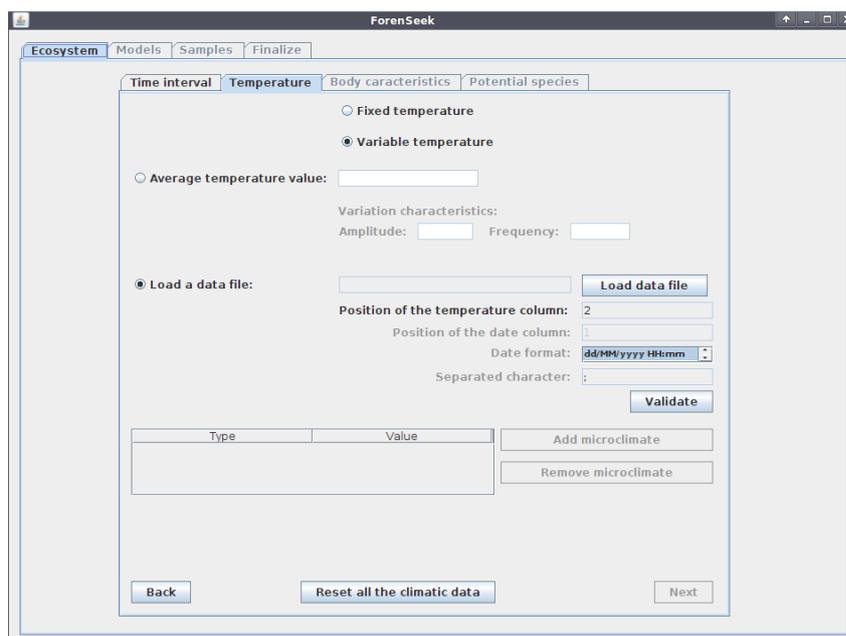


FIG. B.5 – Saisie des températures ambiantes. Possibilité de définir une température fixe ou de charger un fichier de températures.

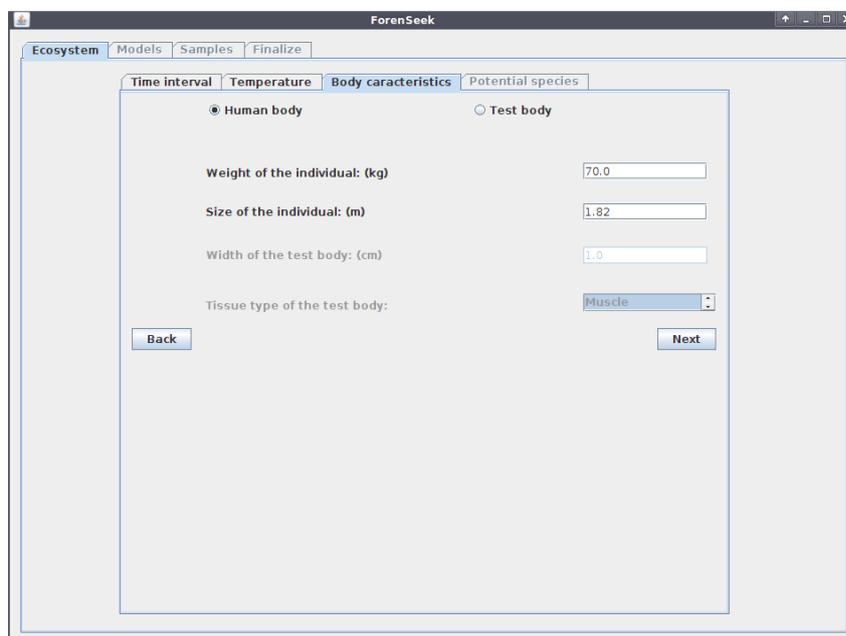


FIG. B.6 – Spécifications des caractéristiques physiques du cadavre – importantes pour l'automate cellulaire de température.

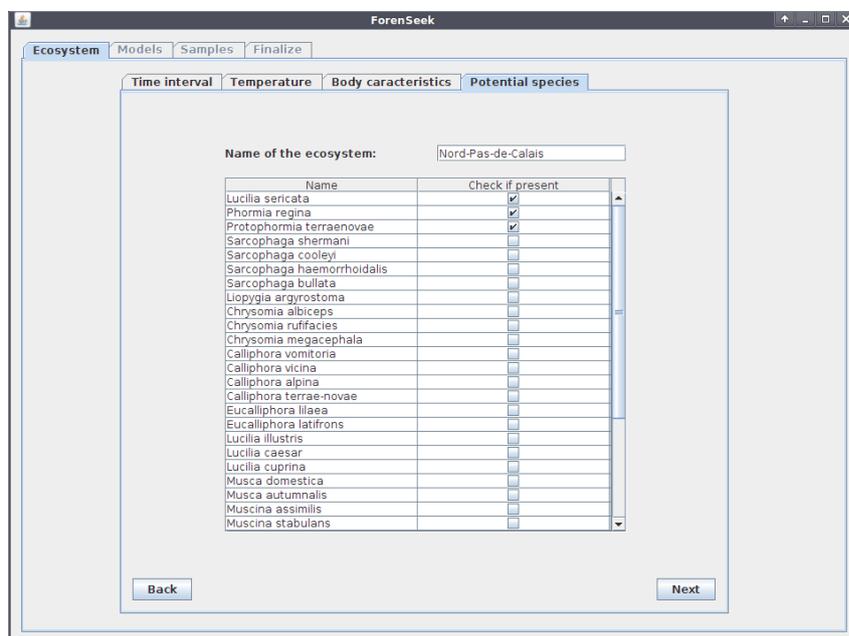


FIG. B.7 – Association des espèces d'insectes habituellement présentes dans l'écosystème.

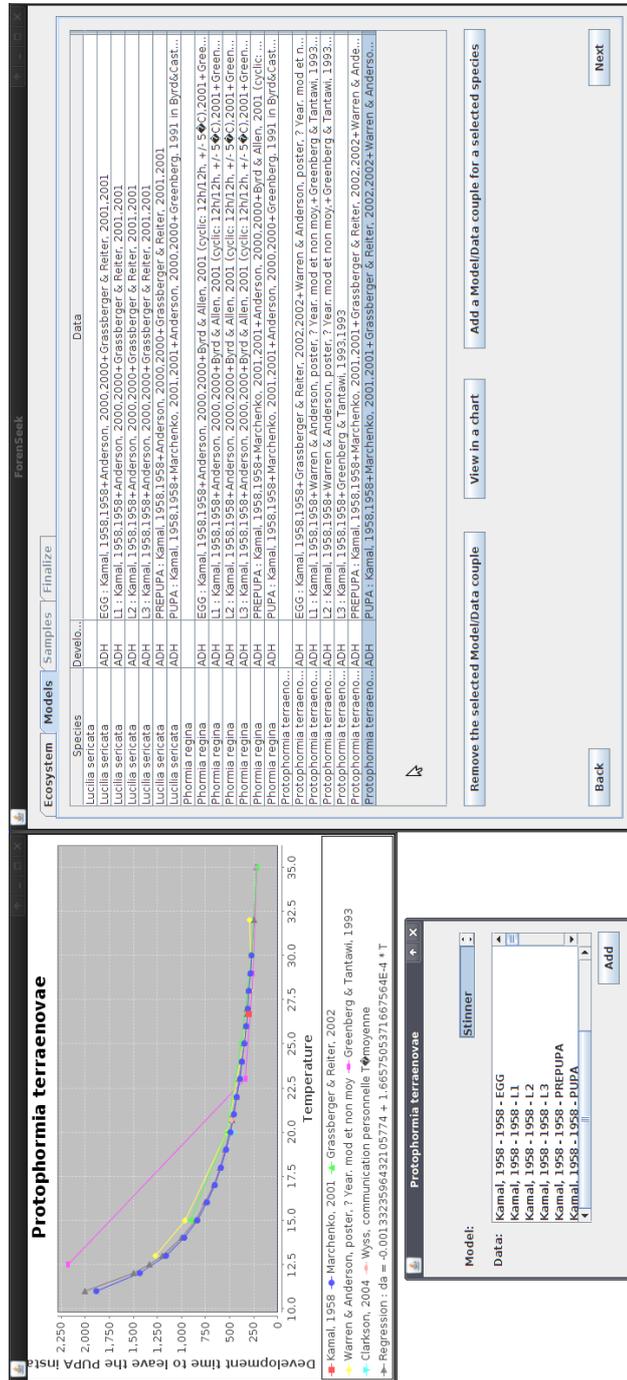


FIG. B.8 – Définition des modèles biologiques à tester pour chacune des espèces prélevées sur le corps. En haut à gauche : visualisation des séries de données utilisées et de leur régression. En bas à droite : ajout d'un nouveau modèle pour l'espèce sélectionnée.

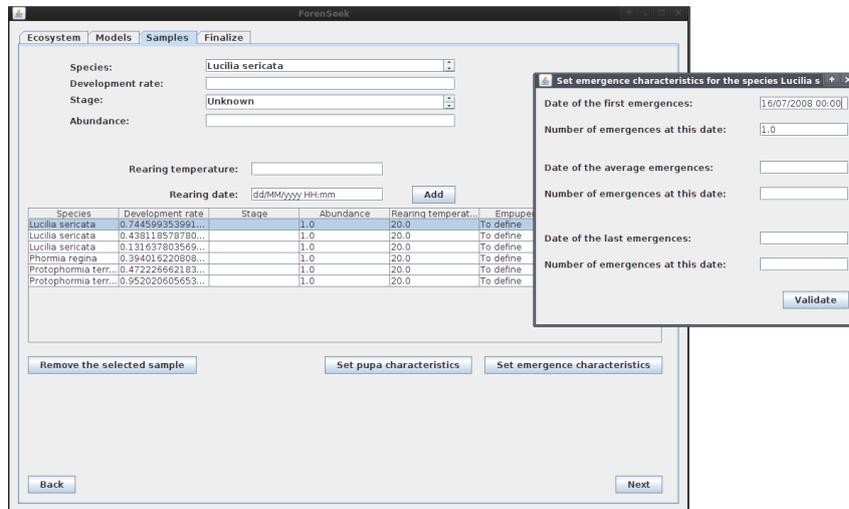


FIG. B.9 – Enregistrements des prélèvements effectués : saisies de l'espèce, de la date et de la température d'élevage ainsi que de la date d'émergence. Ici, cinq insectes prélevés sur le cadavre ont émergé et ont été analysés par l'expert.

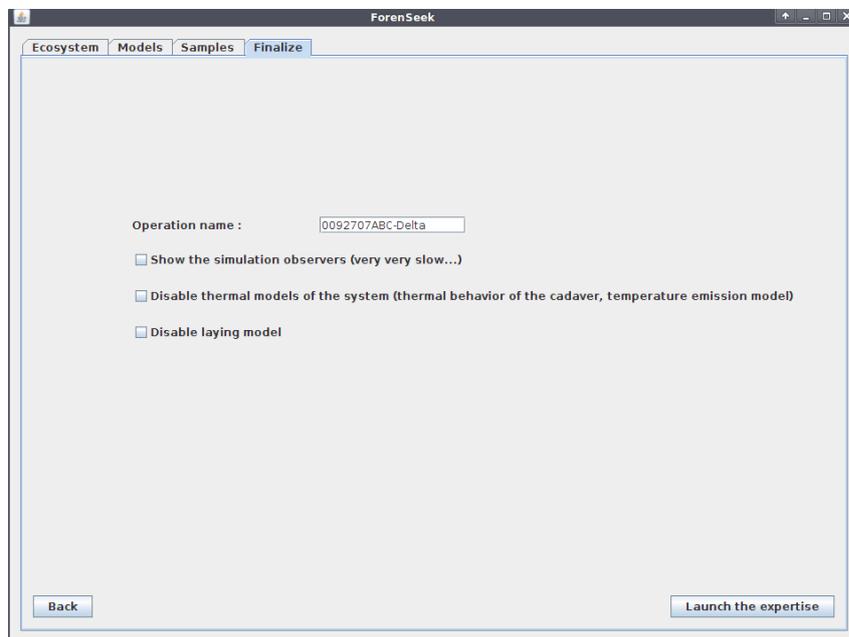


FIG. B.10 – Ecran de finalisation, précision d'un nom ou d'une référence pour l'expertise courante.

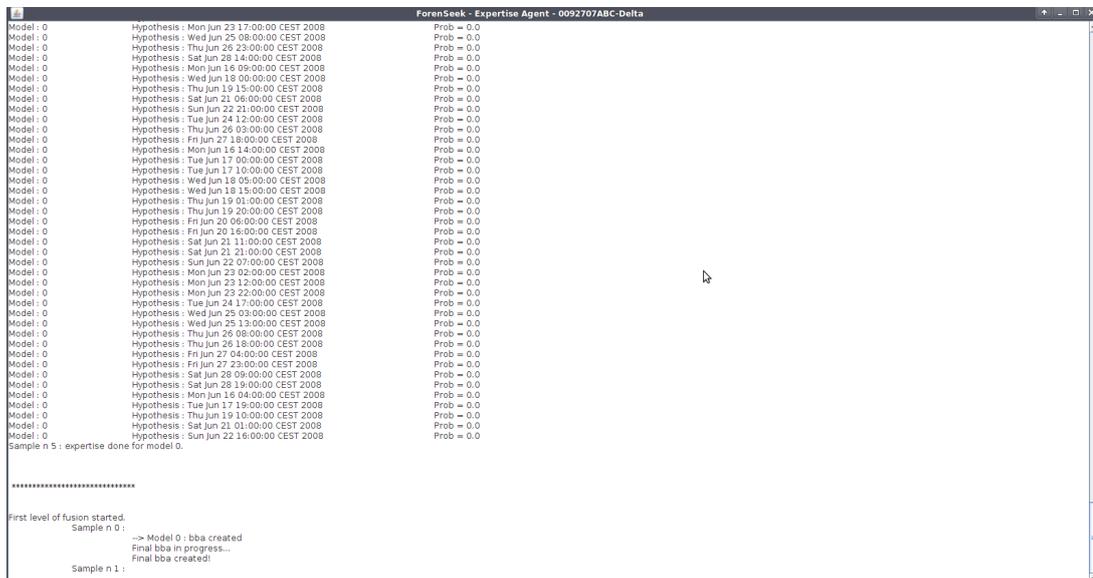


FIG. B.11 – Ecran dynamique affiché durant les étalonnages des modèles biologiques. Il affiche un compte-rendu en temps réel des étalonnages en cours.

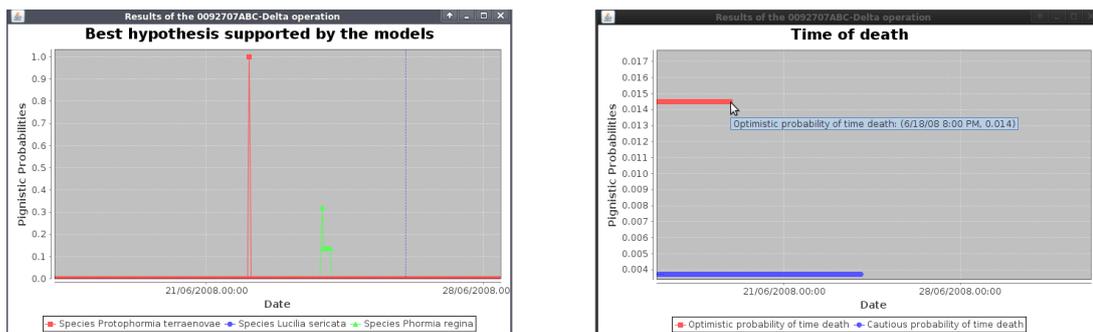


FIG. B.12 – Affichages des résultats à l'aide de l'API *JFreeChart* : l'écran de gauche apporte une réponse à la question "quand les pontes ont-elles eu lieu?" en affichant les probabilités des pontes pour les différentes espèces. L'écran de droite répond à la question "quel est l'intervalle post mortem minimum?". Dans cet exemple fictif, il semble que la personne était déjà morte le 18/06/2008 à 08h00.

Bibliographie

- [1] Peter ABELARD et Victor COUSIN : *Ouvrages inédits d'Abélard pour servir l'histoire de la philosophie scolastique en France*. Imprimerie Royale édition, 1836.
- [2] (Emile Chartier) ALAIN : *Idées. Introduction à la philosophie. Platon, Descartes, Hegel, Comte*. Paul Hartmann édition, 1939.
- [3] Atocha ALISEDA-LLERA : *Seeking Explanations : Abduction in Logic, Philosophy of Science and Artificial Intelligence*. Thèse de doctorat, Université d'Amsterdam, 1997.
- [4] J. AMENDT, C.P. CAMPOBASSO, E. GAUDRY, C. REITER, H.N. LEBLANC et M. JR HALL : Best practice in forensic entomology – standards and guidelines. *International Journal of Legal Medicine*, 121(2):90–104, 2007.
- [5] J. AMENDT, R. ZEHNER et F. RECKEL : The nocturnal oviposition behaviour of blowflies (diptera : Calliphoridae) in central europe and its forensic implications. *Forensic science international*, 175(1):61–64, 2008.
- [6] Alain APPRIOU : Probabilités et incertitude en fusion de données multisenseurs. *Revue scientifique et technique de la défense*, 11(1):27–40, 1991.
- [7] Alain APPRIOU : Multisensor signal processing in the framework of the theory of evidence. *In Application of Mathematical Signal Processing Techniques to Mission Systems*, pages (5–1)(5–31). Research and Technology Organization (Lecture Series 216), nov 1999.
- [8] F. ARDHUIN, E. ROGERS, A.V. BABANIN, J.F. FILIPOT, R. MAGNE, A. ROLAND, A. VAN DER WESTHUYSEN, P. QUEFFEULOUN, J.M. LEFEVRE, L. AOUF *et al.* : Semi-empirical dissipation source functions for ocean waves : Part I, definition, calibration and validation. *Journal of Physical Oceanography*, 40(9):1917–1941, 2010.
- [9] Pascal ARDILLY : *Les techniques de sondage*. Technip, 2ème édition, 2006.
- [10] ARISTOTE : *La Politique*. Bibl. Textes Philo., Vrin édition, 1995.
- [11] ARISTOTE : *Ethique à Eudème*. Bibl. Textes Philo., Vrin édition, 1997.
- [12] ARISTOTE : *Ethique de Nicomaque*. Flammarion édition, 2004.
- [13] ARISTOTE : *La métaphysique*. Flammarion édition, 2008.
- [14] Antoine ARNAULD, Pierre NICOLE et Charles JOURDAIN : *La logique ou l'art de penser*. Gallimard, 1992.
- [15] Henri ATLAN : *L'organisation biologique de la théorie de l'information*. Broché, Ré-édition de l'édition de 1972, 2006.

-
- [16] André AYOUN et Philippe SMETS : Data association in multi-target detection using the transferable belief model. *International Journal of Intelligent Systems*, 16:1167–1182, 2001.
- [17] N. A. BAAS : Emergence, hierarchies and hyperstructures. *Artificial Life III*, pages 515–537, 1994.
- [18] Gaston BACHELARD : *Le nouvel esprit scientifique*. PUF, Ré-édition de l'édition de 1934, 2003.
- [19] Jerry BANKS : *Handbook of simulation : principles, methodology, advances, applications, and practice*. Wiley-Interscience, 1998.
- [20] Jerry BANKS, John CARSON, Barry L. NELSON et David NICOL : *Discrete-Event System Simulation*. Prentice Hall, 5ème édition, aug 2009.
- [21] Cédric BAUDRIT : *Représentation et propagation de connaissances imprécises et incertaines : application à l'évaluation des risques liés aux sites et aux sols pollués*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse III - Paul Sabatier, oct 2005.
- [22] F. BELLIFEMINE, A. POGGI et G. RIMASSA : Jade, a fipa-compliant agent framework. In *4th International Conference on Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology*, volume 99, pages 97–108, 1999.
- [23] Amel BEN YAGHLANE, Thierry DENÈUX et Khaled MELLOULI : Constructing belief functions from qualitative expert opinions. In *the 2nd IEEE International conference on information and communication technologies (ICCTA'06)*, apr 2006.
- [24] Amel BEN YAGHLANE, Thierry DENÈUX et Khaled MELLOULI : *Elicitation of expert opinions for constructing belief functions*, pages 75–84. in uncertainty and intelligent information systems. World Scientific, 2008.
- [25] Amel BEN YAGHLANE, Philippe SMETS et Khaled MELLOULI : Independence concepts for belief functions. *Technologies for Constructing Intelligent Systems : Tools*, page 45, 2002.
- [26] Hubert BITAN : *Droit des créations immatérielles*. Editions Lamy, 2010.
- [27] Isabelle BLOCH : Incertitude, imprécision et additivité en fusion de données : point de vue historique. *Traitement du Signal*, 13(4), 1996.
- [28] Isabelle BLOCH : Some aspects of Dempster-Shafer evidence theory for classification of multi-modality medical images taking partial volume effect into account. *Pattern Recognition Letters*, 17(8):905–919, 1996.
- [29] Isabelle BLOCH : Fusion d'informations numériques : panorama méthodologique. In *Journées Nationales de la Recherche en Robotique 2005 (JNRR'05)*, Session : vision et perception, pages 79–88, oct 2005.
- [30] Isabelle BLOCH : Defining belief functions using mathematical morphology – application to image fusion under imprecision. *International Journal of Intelligent Systems*, 48:437–465, 2007.
- [31] Isabelle BLOCH et Henri MAITRE : Fusion en traitement d'images : spécificités et approches numériques. *Revue Techniques de l'Ingénieur*, TE5230:1–23, 2002.

-
- [32] Eric BONABEAU, Guy THERAULAZ, Jean-Louis DENEUBOURG, Nigel R. FRANKS, Olivier RAFELSBERGER, Jean-Louis JOLY et Stéphane BLANCO : A model for the emergence of pillars, walls and royal chambers in termite nests. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Serie B Biological Sciences*(353):1561–1576, 1998.
- [33] Etienne BONNOT DE CONDILLAC et Laurence L. BONGIE : *Les monades*. Jérôme Millon édition, 1994.
- [34] Pierre BORNE, Mohamed BENREJEB et Joseph HAGGÈGE : *Les réseaux de neurones : présentation et application*, volume 15 des méthodes et techniques de l'ingénieur. Ophrys édition, 2007.
- [35] Hélène BOUCHILLOUX : La méthode démonstrative comme résidu de l'art de persuader. *Revue des sciences Humaines*, (244):117–137, 1996.
- [36] Laurent BRETON : *Granulab : un système d'aide à la découverte scientifique pour la physique des milieux granulaires*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, jan 2002.
- [37] Léon BRUNSCHVICG : *Descartes et Pascal, lecteurs de Montaigne*. De la Baconnière, Neuchâtel édition, 1942.
- [38] Léon BRUNSCHVICG : *Ecrits philosophiques - Tome I - L'Humanisme de l'Occident - Descartes, Spinoza, Pascal*. Presses Universitaires de France édition, 1951.
- [39] Michael BURGAN : *Hiroshima : Birth of the nuclear age*. Marshall Cavendish édition, 2009.
- [40] Scott CAMAZINE, Jean-Louis DENEUBOURG, Nigel R. FRANKS, James SNEYD, Guy THERAULA et Eric BONABEAU : *Self-organization in biological systems*. Princeton University Press, 2003.
- [41] X. CAUBIT, M. THOBY-BRISSON, N. VOITURON, P. FILIPPI, M. BEVENGUT, H. FARRALLI, S. ZANELLA, G. FORTIN, G. HILAIRE et L. FASANO : Teashirt 3 regulates development of neurons involved in both respiratory rhythm and airflow control. *Journal of Neuroscience*, 30(28):9465, 2010.
- [42] Alexis CHAMPION : *Mécanisme de coordination multi-agents fondé sur des jeux : Application à la simulation comportementale de trafic routier en situation de carrefour*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Haut-Cambrésis, 2003.
- [43] Damien CHARABIDZE : *Etude de la biologie des insectes nécrophages et application à l'expertise en entomologie médico-légale*. Thèse de doctorat, Université de Lille II - Discipline : biologie, 2008.
- [44] Damien CHARABIDZE : *Entomologie médico-légale : recherche et expertises*. Editions Universitaires Européennes, 2010.
- [45] Damien CHARABIDZE, Benoit BOUREL, Valéry HEDOUIN et Didier GOSSET : Repellent effect of some household products on fly attraction to cadavers. *Forensic science international*, 189(1-3):28–33, 2009.
- [46] Damien CHARABIDZE, Gildas MORVAN, Benoit BOUREL, Daniel JOLLY, Valéry HEDOUIN et Didier GOSSET : Modélisation of maggot activity on carrion. *In*

- Proceedings of the 4th Meeting of the European Association for Forensic Entomology, Bari, Italia, 2007.*
- [47] Damien CHARABIDZE, Gildas MORVAN, Daniel DUPONT, Didier GOSSET et Benoit BOUREL : Foreseek : un programme de simulation du développement des insectes nécrophages dédié à l'entomologie médico-légale. *Annales de la société entomologique Française*, 44(3):385–392, 2008.
- [48] Damien CHARABIDZE, Alexandre VEREMME, Gildas MORVAN, Valéry HEDOUIN et Didier GOSSET : Modélisation de la température rectale post-mortem en environnement thermique variable. *La Revue de Médecine Légale*, 1(2):61–65, 2010.
- [49] Barry R. COBB et Prakash P. SHENOY : A comparison of methods for transforming belief function models to probability models. *Symbolic and quantitative approaches to reasoning with uncertainty*, pages 255–266, 2003.
- [50] Barry R. COBB et Prakash P. SHENOY : On transforming belief function models to probability models. *University of Kansas School of Business Working Paper*, (293), 2003.
- [51] Barry R. COBB et Prakash P. SHENOY : On the plausibility transformation method for translating belief function models to probability models. *International Journal of Approximate Reasoning*, 41(3):314–330, 2006.
- [52] Auguste COMTE et Florence KHODOSS : *Cours de philosophie positive*. Ré-édition numérique de l'édition de 1982, 2008.
- [53] John Horton CONWAY : The game of life. *Scientific american*, 223:120–123, 1970.
- [54] Inés COUSO et Serafín MORAL : Independence concepts in evidence theory. *International Journal of Approximate Reasoning*, 51(7):748–758, 2010.
- [55] Marcel CRABBÉ : The formal theory of syllogisms. *The Review of Modern Logic*, 9(1-2):29–52, 2003.
- [56] Antonion DAMASIO : *L'erreur de Descartes : La raison des émotions*. Odile Jacob édition, 2010.
- [57] Frédéric DAMBREVILLE : *Definition of evidence fusion rules based on referee functions (Chap. 6)*, volume 3 de *Applications and Advances on DSMT for Information Fusion (Collected Works)*, chapitre 6. Smarandache F. & Dezert J., american research press édition, 2009.
- [58] Frédéric DAMBREVILLE : Generic implementation of fusion rules based on referee function. *In the first workshop on the theory of belief functions*, apr 2010.
- [59] Charles DARWIN : *De l'Origine des Espèces*. Bibliobazaar édition, 2009.
- [60] Honoré DE BALZAC : *Physiologie du mariage; ou, Méditations de philosophie éclectique sur le bonheur et le malheur conjugal*. Bibliobazaar édition, 2009.
- [61] Lambertus Marie DE RIJK : *La philosophie au Moyen-Age*. Brill édition, 1985.
- [62] Joël DE ROSNAY : *Le macrocosme : vers une vision globale*. Seuil édition, 1975.
- [63] Agnès DE SOUZA : *Médecine et Santé : au-delà du conformisme - Une nouvelle alliance*, volume 106. Charles Léopold Mayer édition, jan 1997.

-
- [64] Aimé DEFIX : *Éléments de métrologie générale et de métrologie légale*. Technip, 2ème édition, 1985.
- [65] Morris. H. DEGROOT : *Optimal statistical decisions*. Wiley-IEEE, Ré-édition de l'édition de 1970, 2004.
- [66] Arthur P. DEMPSTER : Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *38(2):325–339*, 1967.
- [67] Arthur P. DEMPSTER : Upper and lower probability inferences for families of hypotheses with monotone density ratios. *The Annals of Mathematical Statistics*, 40(3):953–969, 1969.
- [68] Arthur P. DEMPSTER : Statistical inference from a Dempster-Shafer perspective : what has changed over 50 years ? *In the first workshop on the theory of belief functions*. ENSIETA, apr 2010.
- [69] Jean-Louis DENEUBOURG : Application de l'ordre par fluctuations à la description de certaines étapes de la construction du nid chez les termites. *Insectes Sociaux*, 24(2):117–130, 1977.
- [70] Thierry DENÈUX : A K-Nearest Neighbour Classification Rule Based on Dempster-Shafer Theory. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 25(5):804–813, 1995.
- [71] Thierry DENÈUX : Analysis of evidence-theoretic decision rules for pattern classification. *Pattern Recognition*, 30(7):1095–1107, 1997.
- [72] Thierry DENÈUX : The cautious rule of combination for belief functions and some extensions. *In the 9th International Conference on Information Fusion*, 2006.
- [73] Thierry DENÈUX : Constructing belief functions from sample data using multinomial confidence regions. *International Journal of Approximate Reasoning*, 42(3):228–252, 2006.
- [74] Thierry DENÈUX : Conjunctive and disjunctive combination of belief functions induced by nondistinct bodies of evidence. *Artificial Intelligence*, 172(2-3):234–264, 2008.
- [75] Thierry DENÈUX : Extending stochastic ordering to belief functions on the real line. *Information Sciences*, 179(9):1362–1376, 2009.
- [76] Thierry DENÈUX et Amel BEN YAGHLANE : Approximating the combination of belief functions using the fast möbius transform in a coarsened frame. *International Journal of Approximate Reasoning*, 31(1-2):77–101, 2002.
- [77] Thierry DENÈUX et Philippe SMETS : Classification using belief functions : relationship between case-based and model-based approaches. *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics - part B : cybernetics*, 36(6):1395, 2006.
- [78] Renaud DENUIT : *L'articulation entre ontologie et centralisme politique d'Héraclite à Aristote : le cercle accompli*, volume 2. Harmattan édition, 2003.
- [79] François DÉPELTEAU : *La démarche d'une recherche en sciences humaines*. De Boeck Université édition, 2000.
- [80] René DESCARTES : *Correspondances avec Arnauld et Morus*. Vrin édition, 2000.

-
- [81] René DESCARTES : *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison, et chercher la vérité dans les sciences*. Librio, Ré-édition de l'édition de 1637, 2004.
- [82] René DESCARTES et Alphonse AULARD : *Discours de la méthode*. Bibliothèque Cant. et Univ. de Lausanne édition, 1861.
- [83] René DESCARTES et Guy DURANDIN : *Les principes de la philosophie*. Vrin édition, 1989.
- [84] René DESCARTES et Paul LANDORMY : *Discours de la méthode : pour bien conduire sa raison, et chercher la vérité dans les sciences*. P. Delaplane édition, 1899.
- [85] Sébastien DESTERCKE : *Représentation et combinaison d'informations incertaines : nouveaux résultats avec applications aux études de sûreté nucléaires*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse III - Paul Sabatier, oct 2008.
- [86] Sébastien DESTERCKE : Independence concepts in evidence theory : some results about epistemic irrelevance and imprecise belief functions. *In the first workshop on the theory of belief functions*, apr 2010.
- [87] Jean DEZERT et Florentin SMARANDACHE : An introduction to DSMT. Rapport technique, Laboratoire de recherche aérospatiale français ONERA / Département de mathématiques et de sciences de l'Université du Nouveau Mexico, 2009.
- [88] Pierre-Emmanuel DORÉ, Arnaud MARTIN et Ali KHENCHAF : Constructing of least committed basic belief density linked to a multimodal probability density. *In COGNitive systems with Interactive Sensors (COGIS)*, nov 2009.
- [89] Johann DRÉO, Alain PÉROWSKI, Patrick SIARRY et Eric TAILLARD : *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*. Eyrolles, algorithmes édition, 2003.
- [90] Alexis DROGOUL : *De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes - Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents*. Thèse de doctorat, Université Paris VI, nov 1993.
- [91] Alexis DROGOUL : Introduction aux systèmes multi-agents - séminaire du laboratoire d'ingénierie des systèmes d'informations (LISI), feb 2001.
- [92] Didier DUBOIS et Henri PRADE : A set-theoretic view of belief functions - logical operations and approximation by fuzzy sets. *International Journal of General Systems*, 12(2):193–226, 1986.
- [93] Didier DUBOIS et Henri PRADE : The principle of minimum specificity as a basis for evidential reasoning. *Uncertainty in knowledge-based systems*, pages 75–84, 1987.
- [94] Didier DUBOIS et Henri PRADE : Representation and combination of uncertainty with belief functions and possibility measures. *Computational Intelligence*, 4(3):244–264, 1988.
- [95] Daniel DURAND : *La systémique*, volume Que sais-je? Presses Universitaires de France - PUF, 2010.
- [96] Jérôme Olivier DURAND-LOSE : *Automates cellulaires, automates à partitions et tas de sable*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 1996.
- [97] Joshua M. EPSTEIN : Why model? *Journal of artificial societies and social simulation*, 11(4):12, oct 2008.

-
- [98] Lee D. ERMAN et Victor R. LESSER : The HEARSAY-II speech understanding system : Integrating knowledge to resolve uncertainty. *Computing Surveys*, 12:213–253, 1980.
- [99] Amira ESSAID et Boutheina BEN YAGHLANE : BeliefOWL : An Evidential Representation in OWL Ontology. In *URSW*, pages 77–80, 2009.
- [100] G. FAGIOLO, A. MONETA et P. WINDRUM : A critical guide to empirical validation of agent-based models in economics : Methodologies, procedures, and open problems. *Computational economics*, 30(3):195–226, 2007.
- [101] Francis FAUX et Franck LUTHON : Etude de différentes règles de fusion d'information couleur appliquées à la détection d'un visage en temps réel. In *Rencontres sur la Logique Floue et ses Applications (LFA '07)*, Nîmes, France, nov 2007.
- [102] Jacques FERBER : Coopération réactive et émergence. *Intellectica*, 19:19–52, 1994.
- [103] Jacques FERBER : *Les systèmes multi-agents - Vers une intelligence collective*. InterEditions, numérique édition, 1995.
- [104] Jacques FERBER et Olivier GUTKNECHT : A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems. In *Third International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS'98)*, pages 128–135. IEEE Computer Society, 1998.
- [105] Jacques FERBER, Olivier GUTKNECHT et Fabien MICHEL : From agents to organizations : an organizational view for multi-agent systems. *Agent-Oriented Software Engineering IV*, 2935/2003:443–459, 2004.
- [106] Scott FERSON et Lev R. GINZBURG : Different methods are needed to propagate ignorance and variability. *Reliability Engineering and System Safety*, 54(2):133–144, nov 1996.
- [107] Scott FERSON, Vladik KREINOVICH, Lev GINZBURG, Davis S. MYERS et Kari SENTZ : Constructing probability boxes and Dempster-Shafer structures. Rapport technique, Sandia National Laboratories, California, jan 2003.
- [108] Anne FOLLET : *Mise en évidence du rôle des insectes (Dipterae) dans le transport de Cryptosporidium parvum*. Thèse de doctorat, Université de Lille II - Discipline : parasitologie, 2005.
- [109] Robin FORTIN : *Comprendre la complexité : introduction à la méthode d'Edgar Morin*. Presses Université Laval, 2ème édition, 2005.
- [110] Marco V. GARCIA QUINTELA : Protagoras et le panthéon de Thourioi. *Revue de l'histoire des religions*, 219(2):131–139, 2002.
- [111] Les GASSER : Mace : High-level distributed objects in a flexible testbed for distributed AI research. *SIGPLAN Notices*, 24(4):108–110, 1989.
- [112] S GLENNAN : Modeling mechanisms. *Studies in the History and Philosophy of the Biological and Biomedical Sciences*, 2(36):375–388, 2005.
- [113] M. GOSSELIN, J. KARAPETIAN, Y. BRAET, L. BOURGUIGNON et F. HUBRECHT : Forensic entomology : beyond simple temperature measurements. In *the 4th meeting of the European Association for Forensic Entomology (EAFE)*, 2006.

-
- [114] D. GOULSON, L.C. DERWENT, M.L.E. HANLEY, D.W. DUNN et S.R. ABOLINS : Predicting calyptrate fly populations from the weather, and probable consequences of climate change. *Journal of Applied Ecology*, 42:795–804, 2005.
- [115] Michel GRABISCH, Jean luc MARICHAL et Marc ROUBENS : Equivalent representations of set functions. *Mathematics of Operations Research*, 25:157–178, 2000.
- [116] Marcel GRANET : *La pensée chinoise*. Albin Michel, numérique édition, 2004.
- [117] M. GRASSBERGER et C. REITER : Effect of temperature on *Lucilia sericata* (Diptera : Calliphoridae) development with special reference to the isomegalen-and isomorphen-diagram. *Forensic Science International*, 120(1-2):32–36, 2001.
- [118] B. GREENBERG : Flies as forensic indicators. *Journal Medical Entomology*, 28:565–577, 1991.
- [119] Thierry GROUSSARD : *Java 6 - Les fondamentaux du langage Java*. Ressources informatiques. ENI édition, 2009.
- [120] Dominique GRUYER : *Etude du traitement de données imparfaites pour le suivi multi-objets : Application aux situations routières*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, France, 1999.
- [121] Olivier GUTKNECHT : *Proposition d'un modèle organisationnel générique de systèmes multi-agents - Examen de ses conséquences formelles, implémentatoires et méthodologiques* -. Thèse de doctorat, Université des Sciences et technologies du Languedoc - Montpellier II, sep 2001.
- [122] Olivier GUTKNECHT et Jacques FERBER : MadKit : a generic multi-agent platform. *In Proceedings of the fourth international conference on Autonomous agents*, pages 78–79, 2000.
- [123] Olivier GUTKNECHT, Jacques FERBER et Fabien MICHEL : MadKit : une architecture de plate-forme multi-agent générique. Rapport technique, Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier, Université Montpellier II, may 2000.
- [124] Herbert H. KNECHT : *La logique chez Leibniz - Essai sur le rationalisme baroque*. L'Age d'Homme édition, 1981.
- [125] J. HALLOY, G. SEMPO, G. CAPRARI, C. RIVault, M. ASADPOUR, F. TÂCHE, I. SAID, V. DURIER, S. CANONGE, J. M. AMÉ, C. DETRAIN, N. CORRELL, A. MARTINOLI, F. MONDADA, R. SIEGWART et J.-L. DENEUBOURG : Social integration of robots into groups of cockroaches to control self-organized choices. *Science*, 318:1155–1158, nov 2007.
- [126] Zakia HAMMAL, Alice CAPLIER et Michèle ROMBAUT : A fusion process based on belief theory for classification of facial basic emotions. *In the 8th International Conference on Information Fusion (ISIF 2005)*, jul 2005.
- [127] Clauss HENSSGE : Death time estimation in case work - the rectal temperature time of death nomogram. *Forensic Science International*, 38:209–236, 1988.
- [128] Clauss HENSSGE : Rectal temperature time of death nomogram : dependance of corrective factor on the body weight under stronger thermic insulation conditions. *Forensic Science International*, 54:51–66, 1992.

-
- [129] Jean-Claude HEUDIN : *Les créatures artificielles : des automates aux mondes virtuels*. Odile Jacob, Sciences édition, 2007.
- [130] John H. HOLLAND : *Emergence : from chaos to order*. Addison-Wesley édition, 1998.
- [131] Nick HOWDEN, Ralph RÖNNQUIST, Andrew HODGSON et Andrew LUCAS : Jack intelligent agents - summary of an agent infrastructure. *In 5th International Conference on Autonomous Agents*, 2001.
- [132] M. G. HUBBARD : *Saint-Simon : sa vie, ses travaux*. Guillaumin et Cie édition, 1857.
- [133] Daniel IAGOLNITZER, Lydie KOCH-MIRAMONT et Vincent RIVASSEAU : *La science et la guerre : la responsabilité des scientifiques*. L'Harmattan édition, 2006.
- [134] Andrew ILACHINSKI : *Cellular automata : a discrete universe*. World Scientific, Version réimprimée, 2001.
- [135] Pierre INFELTA et Michael GRAETZEL : *Thermodynamique : principes et applications*. Universal-Publishers, 2006.
- [136] Paul JANET : *Essai sur la dialectique de Platon*. Joubert, 1848.
- [137] Anne-Laure JOUSSELME, Dominic GRENIER et Éloi BOSSÉ : A new distance between two bodies of evidence. *Information Fusion*, 2(2):91–101, 2001.
- [138] Anne-Laure JOUSSELME et Patrick MAUPIN : On some properties of distances in evidence theory. *In the 1st workshop on belief functions (paper 137)*, apr 2010.
- [139] Kresimir JURASOVIC, Mario KUSEK et Gordan JEZIC : Multi-agent service deployment in telecommunication networks. *Agent and multi-agent systems : technologies and applications*, pages 560–569, 2009.
- [140] Abdelaziz KALLEL et Sylvie Le HÉGARAT-MASCLE : Combination of partially non-distinct beliefs : The cautious-adaptive rule. *International Journal of Approximate Reasoning*, 50(7):1000–1021, 2009. Special Section on Graphical Models and Information Retrieval.
- [141] A.S. KAMAL : Comparative study of thirteen species of sarcosaprophagous Calliphoridae and Sarcophagidae (Diptera) I. Bionomics. *Annals of the Entomological Society of America*, 51(3):261–271, 1958.
- [142] G.A. KAMINKA, D.V. PYNADATH et M. TAMBE : Monitoring teams by overhearing : A multi-agent plan-recognition approach. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 17(1):83–135, 2002.
- [143] G. KANESHRAJAH et B. TURNER : Calliphora vicina larvae grow at different rates on different body tissues. *International journal of legal medicine*, 118(4):242–244, 2004.
- [144] Hadeli KARUNA, Paul VALCKENAERS, Bart SAINT-GERMAIN, Paul VERSTRAETE, Constantin Bala ZAMFIRESCU et Hendrik Van BRUSSEL : Emergent forecasting using a stigmergy approach in manufacturing coordination and control. *Engineering Self-Organising Systems (ESOS)*, 3464:210–226, 2005.

-
- [145] Robert KENNES : Computational aspects of the möbius transformation of graphs. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 22:201–223, 1992.
- [146] George J. KLIR et Mark J. WIERMAN : *Uncertainty-based information : elements of generalized information theory*. Springer Verlag, 1999.
- [147] Arthur KOESTLER : *The ghost in the machine*. Penguin, 1990.
- [148] J. KOHLAS et P.A. MONNEY : *A mathematical theory of hints : an approach to the Dempster-Shafer theory of evidence*. Springer, 1995.
- [149] Koen KOK : Multi-agent coordination in the electricity grid, from concept towards market introduction. In *9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, pages 1681–1688, may 2010.
- [150] Mieczyslaw M. KOKAR, Jerzy A. TOMASIK et Jerzy WEYMAN : Formalizing classes of information fusion systems. *Information Fusion*, 5(3):189–202, sep 2004.
- [151] Hicham LAANYA, Arnaud MARTIN, Ali KHENCHAF et Driss ABOUTAJDINE : Extraction de connaissances à partir de données pour la classification des images sonar. *Revue Traitement du signal*, 25(1):55–74, 2008.
- [152] Agnès LAGACHE : Notes sur les bases conceptuelles de la science. *Revue internationale de Systémique*, 9(2), 1995.
- [153] Agnès LAGACHE : Analogies dynamiques : éléments de communications sensibles. In *I.R.E.M.A.*, Séminaire de recherche : sensorialités et addictions, dec 2000.
- [154] Christopher G. LANGTON : Self-reproduction in cellular automata. *Physica D : nonlinear phenomena*, 10(1-2):135–144, jan 1984.
- [155] Jean-Louis LE MOIGNE : *La modélisation des systèmes complexes*. Dunod édition, 1999.
- [156] Jean-Louis LE MOIGNE : Pourquoi je suis un constructiviste non repentant. *Revue du MAUSS*, 17:197–223, 2001.
- [157] Jean-Louis LE MOIGNE : La complexité de la formation appelle-t-elle des stratégies d’alternance ?, jun 2003.
- [158] Jean-Louis LE MOIGNE : *La théorie du système général - Théorie de la modélisation*. Les Classiques du Réseau Intelligence de la Complexité, cinquième édition, 2006.
- [159] Jean-Louis LE MOIGNE : *Les épistémologies constructivistes*. Presses Universitaires de France - PUF, Ré-édition de l’édition de 1995, 2007.
- [160] Jean-Louis LE MOIGNE : L’interaction réciproque du comprendre et du faire. In *La démocratie à l’épreuve de l’exclusion. Quelle est l’actualité de la pensée politique de Joseph Wresinski ?*, Atelier H1 : Récréer des liens sociaux par l’initiative citoyenne. Colloque International ATD Quart Monde, AFSP, CEVIPOF, Centre d’Histoire de Sciences Po, dec 2008.
- [161] D. LECOURT : Science et vérité. *Chirurgie de la main*, 24(2):61–63, apr 2005.
- [162] Eric LEFÈVRE : *Fusion adaptée d’informations conflictuelles dans le cadre de la théorie de l’évidence*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Rouen, France, nov 2001.

-
- [163] Michel LEJEUNE : *Statistique : la théorie et ses applications*. Springer, 2004.
- [164] Sophie LEPREUX : Réflexions en vue d'une meilleure prise en compte des experts et utilisateurs dans le développement de SIAD : apports des patrons et de la composition d'IHM. *Revue d'Interaction Homme-Machine (RIHM)*, 8(1):61–90, 2007.
- [165] Victor R. LESSER et Daniel D. CORKILL : The distributed vehicle monitoring testbed : a tool for investigating distributed problem-solving networks. *AI Magazine*, 4(3):15–33, 1983.
- [166] Christophe LETT, Claude ROY, Anne LEVASSEUR, Carl D. VAN DER LINGEN et Christian MULLON : Simulation and quantification of enrichment and retention processes in the southern benguela upwelling ecosystem. *Fisheries Oceanography*, 15(5):363–372, 2006.
- [167] Robert K. LINDSAY, Bruce G. BUCHANAN, E. A. FEIGENBAUM et Joshua LEDERBERG : Dendral : a case study of the first expert system for scientific hypothesis formation. *Artificial Intelligence*, 62(2):209–261, 1993.
- [168] Jean-François MALHERBE : Médecine, souffrance et philosophie. *Revue Médicale Suisse*, 4:18–20, nov 2008.
- [169] G. MALL et W. EISENMENGER : Estimation of time since death by heat-flow Finite-Element model. Part I : method, model, calibration and validation. *Legal Medicine*, 7(1):1–14, 2005.
- [170] G. MALL et W. EISENMENGER : Estimation of time since death by heat-flow Finite-Element model part II : application to non-standard cooling conditions and preliminary results in practical casework. *Legal Medicine*, 7(2):69–80, 2005.
- [171] M.I. MARCHENKO : Medicolegal relevance of cadaver entomofauna for the determination of the time of death. *Forensic science international*, 120(1):89–109, 2001.
- [172] Arnaud MARTIN : Fusion d'information haut niveau application à la classification d'images sonar. In *Atelier : Fouille de Données Complexes, effectué au sein de la conférence Extraction et Gestion de données Complexes (EGC2005)*, jan 2005.
- [173] Arnaud MARTIN : Modélisation et gestion du conflit dans la théorie des fonctions de croyance. In *Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR)*, Université de Bretagne Occidentale, nov 2009.
- [174] Arnaud MARTIN et Christophe OSSWALD : Understanding the large family of Dempster-Shafer theory's fusion operators - a decision-based measure. In *the 9th International Conference on Information Fusion*, jul 2006.
- [175] Marie-Hélène MASSON : Apports de la théorie des fonctions de croyance à l'analyse de données imprécises. In *Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR)*, dec 2005.
- [176] Pierre MÉGNIN : *La faune des cadavres : application de l'entomologie à la médecine légale*. G. Masson, 1894.
- [177] David MERCIER : *Fusion d'informations pour la reconnaissance automatique d'adresses postales dans le cadre de la théorie des fonctions de croyance*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, France, dec 2006.

-
- [178] David MERCIER : Extending the contextual discounting of a belief function thanks to its canonical disjunctive decomposition. *In the first workshop on the theory of belief functions*, apr 2010.
- [179] David MERCIER, Geneviève CRON, Thierry DENÈUX et Marie-Hélène MASSON : Fusion of multi-level decision systems using the transferable belief model. *In Proceedings of the 8th International Conference on Information Fusion (FUSION 2005)*, 2005.
- [180] David MERCIER, Geneviève CRON, Thierry DENÈUX et Marie-Hélène MASSON : Decision fusion for postal address recognition using belief functions. *Expert Systems with Applications*, 36(3):5643–5653, apr 2009.
- [181] David MERCIER, Thierry DENÈUX et Marie-Hélène MASSON : General correction mechanisms for weakening or reinforcing belief functions. *In Proceedings of the 9th International Conference on Information Fusion, FUSION*, pages 1–7, 2006.
- [182] David MERCIER, Thierry DENÈUX et Marie-Hélène MASSON : A parameterized family of belief functions correction mechanisms. *In Proceedings of the 12th conference of Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based System (IPMU'2008)*, pages 22–27, 2008.
- [183] David MERCIER, Benjamin QUOST et Thierry DENÈUX : Refined modeling of sensor reliability in the belief function framework using contextual discounting. *Information Fusion*, 9(2):246–258, 2008.
- [184] Fabien MICHEL : Introduction to TurtleKit : a platform for building Logo based multi-agent simulations with MadKit. Rapport technique, Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier, Université Montpellier II, jun 2002.
- [185] Fabien MICHEL, Grégory BEURIER et Jacques FERBER : The TurtleKit Simulation Platform : Application to Complex Systems. *In First International Conference on Signal-Image Technology and Internet-Based Systems (Workshop Sessions)*, nov 2005.
- [186] Nada MILISAVLJEVIC et Isabelle BLOCH : A two-level approach for modeling and fusion of humanitarian mine detection sensors within the belief function framework. *In Applied Stochastic Models and Data Analysis (ASMDA '2001)*, pages 743–748, jun 2001.
- [187] Jacques MONOD : *Le Hasard et la Nécessité*. Seuil édition, 1973.
- [188] Sabine MONTAGNE : Formation des cours de bourse : les acteurs, leurs logiques, leurs interactions. *La revue de l'IRES*, 29:29–52, 1999.
- [189] Edgar MORIN : *La Méthode - 1. La Nature de la nature - 2. La Vie de la vie - 3. La Connaissance de la connaissance. - 4. Les idées - 5. L'Humanité de l'humanité - 6. Ethique*. Seuil édition, 1977-2004.
- [190] Edgar MORIN : Pour une réforme de la pensée. *Entretiens Nathan*, 1996.
- [191] Edgar MORIN : *Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du futur*. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, Seuil édition, 1999.

-
- [192] Edgar MORIN : *Introduction à la pensée complexe*. Ré-édition de l'édition de 1990, 2005.
- [193] Edgar MORIN : Pourquoi enseigner la compréhension humaine ? *Synergies Espagne*, 1:25–31, 2008.
- [194] Gildas MORVAN : *Approche multi-agents d'un système d'aide à la décision en environnement dynamique et incertain - Application à l'entomologie médico-légale*. Thèse de doctorat, Université d'Artois - Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois, nov 2009.
- [195] Gildas MORVAN, Daniel DUPONT et Philippe KUBIAK : A simulation-based model of abduction. *In ESM'2008*, pages 183–187, 2008.
- [196] Gildas MORVAN, Daniel JOLLY et Damien CHARABIDZE : Thermoregulation in *P. Terraenovae* aggregations, an agent-based approach. *In Proceedings of the ESM'2008, Le Havre, France*, pages 417–422, oct 2008.
- [197] Gildas MORVAN, Alexandre VEREMME, Damien CHARABIDZE, Benoit BOUREL et Didier GOSSET : Modélisation de l'évolution post mortem de la température corporelle lorsque la température de l'environnement varie. Communication à la société française de médecine légale, mar 2009.
- [198] Gildas MORVAN, Alexandre VEREMME et Daniel DUPONT : IRM4MLS : the influence reaction model for multi-level simulation. *In the 11th International workshop on Multi-Agent-Based Simulation (MABS) hosted at the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, 2010.
- [199] Gildas MORVAN, Alexandre VEREMME, Daniel DUPONT et Daniel JOLLY : Démonstration : étude du coût de l'observation de simulations orientées agent. *In Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA 2009)*, Lyon, France, oct 2009.
- [200] Gildas MORVAN, Alexandre VEREMME, Daniel DUPONT et Daniel JOLLY : Modélisation et conception multi-niveaux de systèmes complexes : stratégie d'agentification des organisations. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 43:381–406, 2009.
- [201] Isabelle MOURRAL : *Vocation, enseignement : l'éducation n'est pas un métier ordinaire*. Nouvelles Editions Latines, 1985.
- [202] Aloyse Raymond NDIAYE : *La philosophie d'Antoine Arnauld*. Bibliothèque d'histoire de la philosophie. Vrin édition, 1991.
- [203] John Von NEUMANN et Jean-Paul AUFFRAND : *Théorie générale et logique des automates*. Champ Vallon, Ré-édition de l'édition de 1948, 1996.
- [204] Muaz NIAZI, Amir HUSSAIN et Mario KOLBERG : Verification and validation of agent based simulation using VOMAS approach. *In Proceedings of the Third Workshop on Multi-Agent Systems and Simulation (MASS09)*, 2009.
- [205] Alain NIFLE et Roger REYNAUD : Un argument pour le choix entre décision pi-gnistique et maximum de plausibilité en théorie de l'évidence. *In 16th colloque sur le traitement du signal et des images*. GRETSI, Groupe d'Etudes du Traitement du Signal et des Images, 1997.

-
- [206] Pekka ORPONEN : Dempster's rule of combination is #p-complete. *Artificial Intelligence*, 44(1-2):245–253, 1990.
- [207] Sami. PAAVOLA : Abduction as a logic and methodology of discovery : The importance of strategies. *Foundations of Science*, 9(3):267–283, 2004.
- [208] D.C. PARKER, S.M. MANSON, M.A. JANSSEN, M.J. HOFFMANN et P. DEADMAN : Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change : a review. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(2):314–337, 2003.
- [209] Blaise PASCAL : *Pensées*. LGF Livre de Poche, Ré-édition de l'édition de 1670, 2000.
- [210] C.S. PEIRCE, C. HARTSHORNE et P. WEISS : *Collected papers of Charles Sanders Peirce*. Belknap Pr, 1935.
- [211] Michelle PEROT : Note sur le positivisme ouvrier. *Romantisme*, 8(21-22):201–204, 1978.
- [212] Christiane PEYRON-BONJAN : Essai de lecture épistémologique des sciences de l'éducation. *Les Cahiers de l'année 1996*, 3:101–122, 1996.
- [213] Jean PIAGET : *Le structuralisme*. Presses Universitaires de France - PUF, 1996.
- [214] Alexis PIERRON et Charles Marie ZEVORT : *De la Métaphysique d'Aristote - Livre I*, volume 1. Ebrard, 1840.
- [215] PLATON et Emile CHAMBRY : *La République : livre I à X*, volume 215. Gallimard, 9ème édition, 1992.
- [216] Karl POPPER, Jacques MONOD, Nicole THYSSEN-RUTTEN et Philippe DEVAUX : *La logique de la découverte scientifique*. Payot - Bibliothèque scientifique, Ré-édition de l'édition de 1934, 2007.
- [217] Hassan QUDRAT-ULLAH : Structural validation of system dynamics and agent-based simulation models. *In 19th European Conference on Modelling and Simulation, Riga, Latvia*, 2005.
- [218] Emmanuel RAMASSO, Michèle ROMBAUT et Denis PELLERIN : Modèle des croyances transférables : Représentation des connaissances, fusion d'informations, décision. Rapport technique, GIPSA-lab, département image et signal, Grenoble, 2007.
- [219] W. RAND, D.G. BROWN, S.E. PAGE, R. RIOLO, L.E. FERNANDEZ, M. ZELLNER *et al.* : Statistical validation of spatial patterns in agent-based models. *In Proceedings of Agent Based Simulation*, volume 4, 2003.
- [220] J. RÉGNIÈRE : A method of describing and using variability in development rates for the simulation of insect phenology. *Canadian entomologist*, 116(10):1367–1376, 1984.
- [221] Jean-François REVEL : *Histoire de la philosophie occidentale*. Agora, pocket édition, 2007.
- [222] C.S. RICHARDS : *Effects of temperature on the development, behaviour and geography of blowflies in a forensic context*. Thèse de doctorat, Rhodes University, 2007.

-
- [223] Galina L. ROGOVA et Vincent NIMIER : Reliability in information fusion : Literature survey. *In Proceedings of the Seventh International Conference on Information Fusion*, pages 1158–1165, 2004.
- [224] André ROSS : Les Paradoxes de Zénon. *Bulletin de l'Association Mathématique du Québec (AMQ)*, XLI(4):46–53, dec 2001.
- [225] Mohamed SAID EL HMAM, Hassane ABOUAISSA, Daniel JOLLY et Amar BENASSER : Simulation hybride de flux de trafic basée sur les systèmes multi-agents. *In 6ème Conférence Francophone de Modélisation et de Simulation - MOSIM*, apr 2006.
- [226] Henri SAINT-SIMON : *Introduction aux travaux scientifiques du dix-neuvième siècle*. J.L. Scherff édition, 1808.
- [227] Henri SAINT-SIMON : *Doctrine de Saint-Simon*. 3ème édition, 1829.
- [228] Emile SAISSET : *Le scepticisme : Ænésidème - Pascal - Kant : étude pour servir à l'histoire critique du scepticisme ancien et moderne*. Didier, 2ème édition, 1865.
- [229] Leonard J. SAVAGE : *The foundations of statistics*. Courier Dover Publications, 2ème édition, 1972.
- [230] H. SCHOLTEN, RH VAN WAVEREN, S. GROOT, FC VAN GEER, JHM WOSTEN, RD KOEZE et JJ NOORT : Improving the quality of model-based decision support : Good modelling practice in water management. *In Proceedings of symposium S2 held during the sixth IAHS Scientific Assembly*, volume 7, pages 223–230, 2001.
- [231] Johan SCHUBERT : On nonspecific evidence. *International Journal of Intelligent Systems*, 8:711, 1993.
- [232] Kari SENTZ et Scott FERSON : Combination of Evidence in Dempster-Shafer Theory, Sandia National Laboratories. Rapport technique SAND2002-0835, Systems Science and Industrial Engineering Department of Binghamton University, Binghamton, 2002.
- [233] Glenn SHAFER : *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press, 1976.
- [234] Glenn SHAFER : Non-additive probabilities in the work of Bernoulli and Lambert. *Archive for History of Exact Sciences*, 19:309–370, 1978.
- [235] C.E. SHANNON : A mathematical theory of communication. *The Bell Systems Technical Journal*, 27(3):379–423,623–656, 1948.
- [236] Robert E. SHANNON : Introduction to the art and science of simulation. *In Winter Simulation Conference*, pages 7–14, 1998.
- [237] Gaële SIMON, Dominique FOURNIER et Bruno MERMET : Vers un algorithme multi-agents de clustering dynamique. *In Journées Francophones "Extraction et Gestion des Connaissances" (EGC07)*, Atelier Flux de Données, jan 2007.
- [238] Olivier SIMONIN et Jacques FERBER : Un modèle multi-agent de résolution collective de problèmes situés multi-échelles. *In Journées Francophones sur les Systèmes multi-agents*, pages 317–330, 2003.

-
- [239] D. SLONE, S. GRUNER et J. ALLEN : Assesing error in PMI prediction using a forensic entomological computer model. *US Department of Justice final report*, 37, 2005.
- [240] Philippe SMETS : *Un modèle mathématico-statistique simulant le processus du diagnostique médical*. Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, 1978.
- [241] Philippe SMETS : Medical diagnosis : fuzzy sets and degrees of belief. *Fuzzy Sets and systems*, 5(3):259–266, 1981.
- [242] Philippe SMETS : The combination of evidence in the transferable belief model. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(5):447–458, 1990.
- [243] Philippe SMETS : The concept of distinct evidence. *In IPMU*, volume 92, pages 789–794, 1992.
- [244] Philippe SMETS : Belief functions : The disjunctive rule of combination and the generalized bayesian theorem. *International Journal of Approximate Reasoning*, 9(1):1–35, 1993.
- [245] Philippe SMETS : The canonical decomposition of a weighted belief. *In International Joint Conference on Artificial Intelligence*, volume 14, pages 1896–1901, 1995.
- [246] Philippe SMETS : The normative representation of quantified beliefs by belief functions. *Artificial Intelligence*, 92(1-2):229–242, 1997.
- [247] Philippe SMETS : Probability, possibility, belief : Which and where ? *Handbook of Defeasible Reasoning and Uncertainty Management Systems*, 1 : Quantified Representation of Uncertainty & Imprecision:1–24, 1998.
- [248] Philippe SMETS : The transferable belief model for quantified belief representation. *Handbook of Defeasible Reasoning and Uncertainty Management Systems : Quantified Representation of Uncertainty and Imprecision*, 1:267–301, 1998.
- [249] Philippe SMETS : The application of the matrix calculus to belief functions. *International Journal of Approximate Reasoning*, 31(1-2):1–30, 2002.
- [250] Philippe SMETS : Decision making in a context where uncertainty is represented by belief functions. *Belief functions in business decisions*, Physica-Verlag:17–61, 2002.
- [251] Philippe SMETS : Belief functions on real numbers. *International journal of approximate reasoning*, 40(3):181–223, 2005.
- [252] Philippe SMETS : Decision making in the TBM : the necessity of the pignistic transformation. *International Journal of Approximate Reasoning*, 38(2):133–147, 2005.
- [253] Philippe SMETS : Analyzing the combination of conflicting belief functions. *Information Fusion*, 8(4):387–412, 2007.
- [254] Philippe SMETS et Robert KENNES : The transferable belief model. *Artificial Intelligence*, 66(2):191–234, 1995.
- [255] D. SORNETTE, A.B. DAVIS, K. IDE, K.R. VIXIE, V. PISARENKO et J.R. KAMM : Algorithm for model validation : Theory and applications. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(16):6562, 2007.

-
- [256] R.E. STINNER, A.P. GUTIERREZ et G.D. BUTLER JR : An algorithm for temperature-dependent growth rate simulation. *The canadian Entomologist*, 106: 519–524, 1974.
- [257] Thomas M. STRAT : Continuous belief functions for evidential reasoning. *In the proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*, 1984.
- [258] Katia SYCARA, Massimo PAOLUCCI, Martin Van VELSEN et Joseph GIAMPAPA : The RETSINA MAS Infrastructure. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 7(1-2):29–48, jul 2003.
- [259] Paul TANNERY : *Pour l'histoire de la science hellène, de Thalès à Empédocle*. Gauthier-Villars, 1930.
- [260] A.M. TARONE et D.R. FORAN : Components of developmental plasticity in a Michigan population of *Lucilia sericata* (Diptera : Calliphoridae). *Journal of medical entomology*, 43(5):1023–1033, 2006.
- [261] P.M. TEILLET, D.N.H. HORLER et N.T. O'NEILL : Calibration, validation, and quality assurance in remote sensing : A new paradigm. *Canadian journal of remote sensing*, 23(4):401–414, 1997.
- [262] Guillaume THEYSSIER : *Automates cellulaires : un modèle de complexités*. Thèse de doctorat, Université de Savoie, 2005.
- [263] Jean-Pierre TREUIL, Alexis DROGOUL et Jean-Daniel ZUCKER : *Modélisation et simulation à base d'agents*. Exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques. Dunod, 2008.
- [264] K. UEDA, T. KITO et T. TAKENAKA : Modelling of value creation based on emergent synthesis. *Manufacturing Journal*, 57:473–476, 2008.
- [265] Paul VALÉRY : *Mauvaises pensées et autres*. Gallimard, 16ème édition, 1942.
- [266] Paul VALÉRY : *Cahiers 1894-1914*. Gallimard édition, 1987.
- [267] Paul VALÉRY : *Introduction à la méthode de Léonard de Vinci*. Ré-édition de l'édition de 1895, 2010.
- [268] Robert VALLÉE : Précurseurs et premières figures de la cybernétique et de la systémique en europe. *In 6ème Congrès Européen de Science des Systèmes*, sep 2005.
- [269] Patrick VANNOORENBERGHE et Thierry DENEUX : Likelihood-based vs distance-based evidential classifiers. *In Proceedings of FUZZ-IEEE*, pages 320–323, 2001.
- [270] Alexandre VEREMME : Modélisation de la température d'un corps par automates cellulaires. Mémoire de D.E.A., Université d'Artois - Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois, 2007.
- [271] Alexandre VEREMME, Daniel DUPONT, Éric LEFEVRE et David MERCIER : Belief assignment on compound hypotheses within the framework of the transferable belief model. *In the 12th International Conference on Information Fusion (FUSION 2009)*, jul 2009.
- [272] Alexandre VEREMME, Daniel DUPONT, Gildas MORVAN, Daniel JOLLY et Damien CHARABIDZE : Modélisation de la température d'un corps par automates cellulaires. *In 7ème Conférence de Modélisation et de Simulation (MOSIM'08)*, volume 1, pages 500–507, 2008.

-
- [273] Alexandre VEREMME, Eric LEFÈVRE, Gildas MORVAN, Daniel DUPONT et Daniel JOLLY : Evidential calibration process of multi-agent based system : an application to forensic entomology. *Expert Systems with Applications*, 2010 (soumis).
- [274] Alexandre VEREMME, Eric LEFÈVRE, Gildas MORVAN et Daniel JOLLY : Application of the belief function theory to validate multi-agent based simulations. *In the 1st workshop on belief functions (paper 123)*, apr 2010.
- [275] Giambattista VICO et Alain PONS : *La méthode des études de notre temps (1708)*. Version numérique proposée par le Réseau Intelligence de la Complexité MCX-APC. Numérique édition, 1981.
- [276] Jean-Philippe VIDAL : *Assistance au calage de modèles numériques en hydraulique fluviale*. Thèse de doctorat, Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [277] Pierre VIGNAIS et Paulette VIGNAIS : *Science expérimentale et connaissance du vivant : la méthode et les concepts*. Collection Grenoble Sciences, 2006.
- [278] Ludwig VON BERTALANFFY : An outline of general system theory. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 1(2):134–165, aug 1950.
- [279] Ludwig VON BERTALANFFY : *Théorie générale des systèmes : physique, biologie, psychologie, sociologie, philosophie*. Dunod édition, 1973.
- [280] Heinz VON FOERSTER : *Observing systems (with an introduction by P. J. VARELA)*. Intersystems publications édition, 1981.
- [281] Friedrich August VON HAYEK : *La route de la servitude*. Presses Universitaires de France - PUF, Ré-édition de l'édition de 1944, 2005.
- [282] R. WALL : The reproductive output of the blowfly, *Lucilia sericata*. *Journal of insect physiology*, 9:743–750, 1993.
- [283] Alexandre WEBER : *Modélisation et gestion de flux par systèmes multi-agents*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2007.
- [284] Bernard WEISS : Food additives and hyperactivity. *Environmental Health Perspectives*, 116(6):240–241, jun 2008.
- [285] Drew WESTEN et Catherine GARITTE : *Psychologie : Pensée, cerveau et culture*. Ouvertures psychologiques. De Boeck Université, 2000.
- [286] Danny WEYNS, H. Van Dyke PARUNAK et Fabien MICHEL : *Environments for multi-agent systems : first international workshop*, volume 3374 de *Revised selected papers of E4MAS 2004, New York, NY, July 19, 2004*. Springer, 2005.
- [287] D.E. WILKINS, T.J. LEE et P. BERRY : Interactive execution monitoring of agent teams. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 18(1):217–261, 2003.
- [288] Nic WILSON : Algorithms for Dempster-Shafer theory. *Handbook of Defeasible Reasoning and Uncertainty Management Systems, Algorithms for Uncertainty and Defeasible Reasoning*, 5:421–476, 2000.
- [289] P. WINDRUM, G. FAGIOLO et A. MONETA : Empirical validation of agent-based models : Alternatives and prospects. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 10(2):8, 2007.

-
- [290] J. WOOLDRIDGE, L. SCRASE et R. WALL : Flight activity of the blowflies, *Calliphora vomitoria* and *Lucilia sericata*, in the dark. *Forensic science international*, 172(2-3):94–97, 2007.
- [291] Claude WYSS : Durées de développement de *Lucilia sericata* en fonction de la température ambiante, Publication personnelle.
- [292] X. XIANG, R. KENNEDY, G. MADEY et S. CABANISS : Verification and validation of agent-based scientific simulation models. In *Proceedings of the 2005 Agent-Directed Simulation Symposium, April*, pages 47–55, 2005.
- [293] Lei XU, Adam KRZYZAK et Ching Y. SUEN : Methods of combining multiple classifiers and their applications to handwriting recognition. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 22(3):418–435, 1992.
- [294] Zoulficar YOUNES, Fahed ABDALLAH et Thierry DENŒUX : An evidence-theoretic k-nearest neighbor rule for multi-label classification. In *the international conference Scalable Uncertainty Management (SUM'2009)*, pages 297–308. Springer, sep 2009.
- [295] Lotfi Asker ZADEH et Elijah POLAK : *System theory*. Inter-university electronics series, 1969.
- [296] Pascale ZARATÉ : *Des Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision aux Systèmes Coopératifs d'Aide à la Décision : Contributions conceptuelles et fonctionnelles*. Thèse de doctorat, IRIT - Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [297] Edouard ZELLER et Emile BOUTROUX : *Philosophie des Grecs considérée dans son développement historique*. Imprimerie K. Lahure, 1882.
- [298] E. ZERVAS, A. MPIMPOUDIS, C. ANAGNOSTOPOULOS, O. SEKKAS et S. HADJIEFTHYMIADES : Multisensor data fusion for fire detection. *Information Fusion*, Available online, dec 2009.
- [299] Hongwei ZHU et Otman BASIR : Extended discounting scheme for evidential reasoning as applied to ms lesion detection. In *Proceedings of the 7th International Conference on Information Fusion, FUSION*, pages 280–287, 2004.

Références de l'auteur

Remarque 7. *Les références suivantes sont présentées de façon chronologique.*

- [300] Gildas MORVAN, Alexandre VEREMME, David MERCIER et Eric LEFÈVRE : Application du modèle de croyances transférables dans le cadre d'expertises en entomologie médico-légale. *In Workshop Fouille de données complexes dans un processus d'extraction de connaissances*, 5ème journée d'Extraction et Gestion de Connaissances (EGC), pages 49–60, jan 2008.
- [301] Gildas MORVAN, Daniel JOLLY, Alexandre VEREMME, Daniel DUPONT et Damien CHARABIDZE : Vers une méthode de modélisation multi-niveaux. *In 7ème Conférence de Modélisation et de Simulation (MOSIM'08)*, volume 1, pages 167–174, mar 2008.
- [302] Alexandre VEREMME, Daniel DUPONT, Gildas MORVAN, Daniel JOLLY et Damien CHARABIDZE : Modélisation de la température d'un corps par automates cellulaires. *In 7ème Conférence de Modélisation et de Simulation (MOSIM'08)*, volume 1, pages 500–507, mar 2008.
- [303] Alexandre VEREMME, Eric LEFÈVRE et Daniel JOLLY : Estimation de fonctions de masse de croyance, utilisation et confrontation dans le cadre d'expertises en entomologie médico-légale. *In Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications (LFA)*, pages 242–249, oct 2008.
- [304] Gildas MORVAN, Alexandre VEREMME, Daniel DUPONT et Daniel JOLLY : Modélisation et conception multi-niveaux de systèmes complexes : stratégie d'agentification des organisations. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 43:381–406, 2009.
- [305] Gildas MORVAN, Alexandre VEREMME, Damien CHARABIDZE, Benoît BOUREL et Didier GOSSET : Modélisation de l'évolution post mortem de la température corporelle lorsque la température de l'environnement varie. Communication à la société française de médecine légale, mar 2009.
- [306] Alexandre VEREMME, Daniel DUPONT, Éric LEFEVRE et David MERCIER : Belief assignment on compound hypotheses within the framework of the transferable belief model. *In the 12th International Conference on Information Fusion (FUSION 2009)*, jul 2009.
- [307] Gildas MORVAN, Alexandre VEREMME, Daniel DUPONT et Daniel JOLLY : Démonstration : étude du coût de l'observation de simulations orientées agent. *In Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA 2009)*, Lyon, France, oct 2009.

-
- [308] Damien CHARABIDZE, Alexandre VEREMME, Gildas MORVAN, Valéry HEDOUIN et Didier GOSSET : Modélisation de la température rectale post-mortem en environnement thermique variable. *La Revue de Médecine Légale*, 1(2):61–65, 2010.
- [309] Alexandre VEREMME, Eric LEFÈVRE, Gildas MORVAN et Daniel JOLLY : Application of the belief function theory to validate multi-agent based simulations. *In the 1st workshop on belief functions (paper 123)*, apr 2010.
- [310] Gildas MORVAN, Alexandre VEREMME et Daniel DUPONT : IRM4MLS : the influence reaction model for multi-level simulation. *In the 11th International workshop on Multi-Agent-Based Simulation (MABS) hosted at the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, may 2010.
- [311] Alexandre VEREMME, Eric LEFÈVRE, Gildas MORVAN, Daniel DUPONT et Daniel JOLLY : Evidential calibration process of multi-agent based system : an application to forensic entomology. *Expert Systems with Applications*, 2010 (soumis).
- [312] Gildas MORVAN, Alexandre VEREMME et Daniel DUPONT : IRM4MLS : the influence reaction model for multi-level simulation. *Lecture Notes in Artificial Intelligence (post-proceedings of the MABS2010 workshop)*, 2010 (accepté).