N° d'ordre : 2007telb0053

THÈSE

présentée devant

L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS DE BRETAGNE

en habilitation conjointe avec L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE SUD

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ENST BRETAGNE

Mention « SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION »

par

Frédéric CADIER

Équipe d'accueil : Département Logique des Usages, Sciences Sociales et Sciences de l'Information de l'ENST Bretagne

---

MODÈLES COGNITIFS POUR LES SYSTÈMES D'AIDE À LA DÉCISION COLLECTIVE

Application à la Patrouille Maritime

À soutenir le 30 novembre 2007 devant la commission d'examen :

Pr. Raymond BISDORFF – Université du Luxembourg	Président/Rapporteur
Pr. Alain MILLE – Université Claude Bernard Lyon 1	Rapporteur
Pr. Gilles COPPIN – ENST Bretagne	Directeur
Philippe LENCA – ENST Bretagne Christine CHAUVIN – Université de Bretagne Sud	Examinateurs
Gabriel MARCHALOT – THALES Systèmes Aéroportés	Ingénieur

Remerciements

Mes premiers remerciements vont aux personnes dont les actions et réactions liées à ce travail ont été essentielles à son aboutissement : Gilles Coppin qui, grâce à sa grande capacité de synthèse et d'abstraction, est une source intarissable d'idées, toujours prêt à rebondir aux propositions (scientifiques...) qui lui sont faites, et dont les critiques sont toujours riches d'enseignements ; Philippe Lenca dont la ténacité et la rigueur scientifiques m'ont été d'une grande aide lors de nos séances de travail et de rédaction ; et Gabriel Marchalot dont le regard et les apports non académiques ont permis de nombreuses remises en question, sans lesquelles l'applicabilité de ce travail eu été difficile.

Je remercie également les autres membres de mon jury : Raymond Bisdorff pour son suivi régulier de mon travail, à de diverses occasions, pour ses appréciations franches et toujours bienveillantes, pour l'accueil qu'il m'a fait lors de mon séjour à Luxembourg, et pour me laisser penser que les « grands » ne sont pas inaccessibles ; Alain Mille dont le regard expert sur mon domaine de recherche a été essentiel à sa validation scientifique ; et Christine Chauvin qui a accepté de juger mes balbutiements en psychologie cognitive, et dont l'appréciation a conforté ce travail.

Je remercie ensuite les personnes dont l'action a été parfois moins directe, mais néanmoins cruciale : François Legras pour sa participation active et critique concernant la théorie de l'activité ; Sébastien Bigaret pour son inégalable capacité d'écoute, ses remarques et sa relecture... patiente.

Je tiens également à remercier tous les membres du département LUSSI, qui m'ont accueilli et accepté comme l'un des leurs, et pour qui la vie au travail ne se réduit pas aux activités (même intenses) d'enseignement et de recherche...

Je remercie également tous mes amis (Les Gros® et les brestois) grâce à qui la vie est riche et douce.

Enfin, je remercie mon épouse Oriane pour sa simple présence dans ma vie, et pour nos enfants, évidemment les plus beaux du monde...

Je vous aime.

Table des matières

Introduction **13**
Objectif 14
Approche 14
Plan du mémoire 16

I Décision experte et travail en équipe **19**

1 La décision experte **21**
1.1 Cognition et décision 21
1.1.1 Traitement de l'information 22
1.1.2 Typicité et schéma 24
1.1.3 La prise de décision 27
1.2 De l'expertise 29
1.2.1 Types de décideurs 29
1.2.2 Niveau d'expertise 30
1.2.3 Métacognition 32
1.3 Modèles de prise de décision 33
1.3.1 La prise de décision « écologique » 33
1.3.2 Représentation mentale de la situation 38
1.3.3 Stratégies élémentaires et structures de dominance . 39

2 Travail en équipe **45**
2.1 Équipe de décideurs 45
2.1.1 Qu'est-ce qu'un groupe ? Une équipe ? 46
2.1.2 Caractéristiques des équipes de décideurs 47
2.1.3 Caractéristiques de la décision distribuée 48
2.2 Modèles de décision en équipe 50
2.2.1 Métaphore « Team-Mind » 50
2.2.2 Advanced Team Decision Making (ATDM) 52
2.2.3 L'incident du *Vincennes* - Vue des individus 54
2.3 Phénomènes de groupe 55
2.3.1 La pensée de groupe 55

2.3.2 Phénomènes de groupe 56
2.3.3 L'incident du *Vincennes* - Vue de l'équipe 56

II Approche anthropocentrée pour les systèmes d'aide aux décideurs 59

3 Systèmes d'aide à la décision et aux décideurs 61
3.1 Taxonomie des systèmes d'aide 62
3.2 Approches « classiques » 63
3.3 Approche anthropocentrée de l'aide aux décideurs 65
3.3.1 Design anthropocentré 66
3.3.2 Théorie de l'activité 68
3.3.3 Vers un instrument d'aide aux décideurs 72

4 Modèles cognitifs pour l'aide aux décideurs 75
4.1 Choix, constat et proposition 75
4.1.1 Dynamiques de la décision distribuée 76
4.1.2 Choix et constat 77
4.1.3 Activation des règles de décision par ecphorie distinctive 78
4.2 Modèle de décision par ecphorie distinctive 82
4.2.1 Espace de représentation 82
4.2.2 Formalisation du processus d'activation par ecphorie distinctive 85
4.2.3 HBM et ecphorie distinctive 87
4.3 Modèle d'interaction 90
4.3.1 Modèle relationnel 91
4.3.2 Natures des influences 92
4.3.3 Formalisation des influences d'interaction 94

III Patrouille maritime : simulations de décisions distribuées et résultats 97

5 La patrouille maritime 99
5.1 Généralités 99
5.1.1 Les missions 100
5.1.2 Contexte des missions militaires 102
5.1.3 Les équipages 103
5.2 Tâche de décision distribuée 105
5.2.1 Nature des données 105
5.2.2 Processus de décision distribuée 106
5.2.3 Retour sur la théorie de l'activité 108

6 Simulation et résultats **111**
6.1 Un premier système d'aide à l'identification de piste 111
6.1.1 Approche de l'étude SMA2 112
6.1.2 Bénéfices 115
6.1.3 Critique 115
6.2 Environnement de simulation de dynamiques inter-décideurs 116
6.2.1 Objectif et ambitions 117
6.2.2 Architecture générique du simulateur 117
6.2.3 Application à la patrouille maritime 118
6.3 Résultats 125
6.3.1 Tests unitaires et performance 125
6.3.2 Polarisation et basculement 127
6.3.3 Consensus extrême 129

IV Spécifications système et perspectives **133**

7 Spécifications du système d'aide aux décideurs **135**
7.1 L'incident du Vincennes - Vue du système 135
7.2 Spécification d'un système d'aide aux décideurs 137
7.2.1 Observation et représentation 138
7.2.2 Raisonnement abductif 139
7.2.3 Aide aux décideurs 139
7.3 Méthodologie de conception 142
7.3.1 Apprentissage des modèles de décision 145
7.3.2 Structuration des stratégies... 146
7.3.3 Adaptation aux comportements individuels 148
7.3.4 Exploration de l'espace de décision 148

8 Bilan et perspectives **151**
8.1 Bilan 151
8.2 Perspectives 153
8.2.1 Prototype et intégration à AMASCOS 153
8.2.2 Faire coopérer différents modèles de décision 153
8.2.3 Pouvons-nous faire quelque chose pour les novices ? 154

Annexes et références **159**

A L'incident du *Vincennes* **159**
A.1 Événements antérieurs 159
A.2 Le vol de l'Airbus 161
A.3 Ce que l'on apprit plus tard 163

B Le simulateur **165**
B.1 Architecture 165
B.1.1 Classe Agent 167
B.1.2 Classe System 168
B.1.3 Classe Environment 169
B.1.4 Classe Controller 170
B.2 Pattern observer 170
B.3 Implémentation en patrouille maritime 172
B.3.1 Environnement 173
B.3.2 Système 173
B.3.3 TACCO 173
B.3.4 Opérateur capteur 175
B.3.5 Processus de réception et traitement des messages . . 178

Références **181**

Table des figures

1.1 Vue systémique de la cognition humaine 23
1.2 Hiérarchie de Rasmussen 31
1.3 Modèle « Recognition Primed Decision » 35
1.4 Modèle « Recognition/Metacognition » 37
1.5 Heuristique de la Base Mobile 43

2.1 Métaphore « Team-Mind » 50
2.2 Modèle « Advanced Team Decision Making » 52

3.1 Boucle de conception du « Cognitive Engineering » (tiré de (Coppin, 1999)) 67
3.2 La relation sujet-objet en théorie de l'activité 69
3.3 Aspects sociologiques en théorie de l'activité 70
3.4 Concept d'instrument en théorie de l'activité 70

4.1 Exemple d'activation par ecphorie : la représentation mentale active complètement la règle de décision R_4, et entraîne la décision associée, c.-à-d. la catégorie C_2. 80
4.2 Élimination « distinctive » des alternatives 81
4.3 Un réseau de confiance 92

5.1 Les missions de la patrouille maritime 100
5.2 Les missions militaires de la patrouille maritime 102

6.1 Processus de décision de SMA2 (tiré de Skrzyniarz (2003)). . 113
6.2 Notre réseau de confiance 126
6.3 Simulations sans et avec interactions : *effet de polarisation*. . . 127
6.4 Acteurs « MHC1 », « FFG2 » et « PBF2 » 129
6.5 Simulations sans et avec interactions : *consensus extrême*. . . . 130
6.6 Acteurs « TM1 », « FFG5 » et « PBF1 » 131

B.1 Exemple d'interactions des classes Agent, System et Environment 166
B.2 Diagramme UML de la classe Agent 167

B.3 Diagramme UML de la classe System 168
B.4 Diagramme UML de la classe Environment 169
B.5 Diagramme UML de la classe Environment 170
B.6 Diagramme UML du simulateur 171
B.7 Diagramme UML de l'interface IObservable 172
B.8 Diagramme de flux — TACCO 174
B.9 Diagramme de flux - opérateur capteur 176

Liste des tableaux

5.1 Niveaux de classification OTAN 105

6.1 Attributs associés aux capteurs 119
6.2 Valeurs d'attributs et confusions possibles 121
6.3 Règles de décision et identifications associées de l'agent PPI 122
6.4 Règles de décision et identifications associées de l'agent ISAR 123
6.5 Règles de décision et identifications associées de l'agent FLIR 124
6.6 Description de la piste « PBF2 » 128
6.7 Description de la piste « PBF1 » 130

7.1 Spécifications de la fonction F1 : *Observation et représentation* 143
7.2 Spécifications de la fonction F2 : *Raisonnement abductif* 143
7.3 Spécifications de la fonction F3 : *Aide aux décideurs* 144

Introduction

> « Monsieur, le contact 4474 inconnu est présumé ennemi, dit Jo, l'opérateur de situation tactique au capitaine Rogers.
> – Il n'y a aucun vol commercial sur cet horaire, monsieur, informa Bill, l'opérateur en charge de l'IAE, le système d'identification ami ou ennemi.
> – Nouvel identifiant, monsieur, 4474 devient 4431, dit Jo.
> – Je détecte un P-3 de surveillance sur zone, monsieur, dit Mick, l'opérateur de détection radar.
> – Faites une sommation, ordonna le capitaine Rogers. Dites-lui de ne pas s'approcher ou nous tirerons !
> – Sans réponse, monsieur, dit l'opérateur radio. Je ré-essaye...
> – J'ai un IAE en mode II, monsieur, informa Bill, signifiant que le contact était un avion militaire étranger.
> – Il me semble que c'est un mode III, dit un autre opérateur, laissant entendre qu'ils avaient à faire avec un avion civil.
> – Nous sommes menacés, monsieur, je propose un tir défensif, dit l'officier d'action tactique.
> – Attendez, dit le capitaine qui ne souhaitait pas aggraver le conflit actuel. Qu'est-ce que 4474 est en train de faire ?
> – Le contact perd de l'altitude et accroît sa vitesse, monsieur, répondirent plusieurs opérateurs. Son cap est sur nous !
> – Ce n'est pas le comportement que j'observe, fit remarquer Jo.
> – Engagez et tirez ! » ordonna Rogers, pensant avoir identifié un chasseur ennemi en attaque.

Tel est le dialogue auquel un observateur aurait pu assister durant l'incident du *Vincennes*, le 3 juillet 1988, où ce navire de guerre de l'armée des États-Unis a abattu un vol commercial iranien de deux missiles, suite à une *erreur de décision*.

Le travail que nous proposons s'intéresse directement à ce type de situation, dans laquelle un ensemble d'individus travaillent à une même décision prenant la forme d'une tâche de catégorisation. Nous souhaitons améliorer la connaissance sur la nature des processus qui permettent à ces décideurs de coopérer durant cette tâche distribuée, et utiliser ensuite cette

connaissance pour spécifier un *système d'aide aux décideurs* qui proposera une aide pertinente par l'assistance individualisée des décideurs au sein de l'équipe.

Objectif

La grande majorité des systèmes d'aide actuels tente une formalisation prescriptive de la prise de décision, individuelle ou collective. Il s'agit par exemple de guider le décideur le long d'un raisonnement rationnel pour l'aider à obtenir une décision supposée objective et non biaisée.

Il existe pourtant des situations où ces approches ne conviennent plus. Le domaine de la prise de décision « écologique » se concentrent ainsi sur les décisions prises dans des conditions où le temps nécessaire à un raisonnement rationnel n'est pas disponible, où les informations sont incertaines et incomplètes, et où les risques et les conséquences associées à une erreur peuvent être considérables (Zsambok & Klein, 1997).

Certaines approches prescritives sont capables d'apporter une aide aux décideurs impliqués dans ces décisions. Toutefois, notre analyse de la décision distribuée nous permettra d'établir des lacunes difficiles à surmonter.

Approche

Notre approche des système d'aide est dite *anthropocentrée*, et implique que la place de l'homme dans son environnement technique soit réévaluée. Elle doit permettre de concevoir des systèmes d'aide *adaptés* aux décideurs, pour rétablir la *co*-opération homme-machine.

Pour aboutir à ce résultat, notre démarche consistera à établir un modèle de décision cognitivement réaliste des décideurs experts travaillant en équipe, et à nous appuyer sur ce modèle pour spécifier un système capable d'interpréter les actions du décideurs, et de l'aider de façon pertinente.

Pourquoi des experts ?

Nos travaux vont se concentrer sur la prise de décision experte, qui présentent deux avantages :

- les décisions « écologiques » nécessitent cette expertise : il est par exemple inconcevable de confier des missions dangereuses, où des vies humaines sont en jeu, à un pompier novice, ou à un militaire inexpérimenté ;

- les experts ont des comportements stables : à une même situation, un expert associera toujours la même décision. Cette caractéristique sera à la base de notre modèle de décision.

Pourquoi une approche cognitiviste ?

Apporter une aide adaptée aux décideurs experts nécessite de comprendre les étapes de leur processus de décision. Les sciences cognitives permettent ce travail, notamment à travers l'approche de traitement de l'information (Lindsay & Norman, 1980).

Nos travaux s'appuieront notamment sur deux modèles de décision s'inscrivant dans ce paradigme :

- le modèle *Recognition Primed Decisions* (RPD) de Klein (1989) : ce modèle est fondateur dans le domaine de la prise de décision « écologique », et propose une description de la prise de décision d'un expert centrée sur la notion d'*identification de la situation* ;
- l'*Heuristique de la Base Mobile* (HBM) de Barthélemy et Mullet (1986) : s'appuyant sur des principes cognitifs *vérifiés*, ce modèle décrit la prise de décision comme un processus de construction d'une représentation mentale *satisfaisante* de la situation, permettant l'application d'une *règle de décision*.

Nous ferons également usage d'un modèle de rappel de connaissance, l'*ecphorie synergétique*, proposé par Tulving (1983), et qui nous permettra de construire un modèle détaillé du processus d'activation d'une règle de décision.

Pourquoi des équipes ?

Ce choix paraît en effet contradictoire avec notre volonté d'étudier la cognition individuelle de la prise de décision. Néanmoins, les situations que nous étudions font fréquemment appel à un ensemble de décideurs. Ceci tient au fait que les niveaux d'expertise requis pour la prise en charge correcte de l'ensemble des éléments de la situation, conduisent à la haute spécialisation des experts, et, par conséquent, à leur incapacité à traiter l'ensemble du problème.

De plus, d'anciens travaux nous ayant permis de valider notre approche en contexte mono-opérateur (Lenca, 1997 ; Le Saux, 2000), le défi scientifique résidait bel et bien dans le travail d'équipe. Nous montrerons notamment que celui-ci apporte des spécificités au processus de décision, dont il

est essentiel de tenir compte pour comprendre comment un expert se prête à la coopération avec d'autres experts.

Plan du mémoire

Le mémoire est constitué de huit chapitres et de deux annexes. Les chapitres sont groupés au sein de quatre parties.

La première partie est consacrée à la présentation des éléments de sciences cognitives, et des modèles de décision individuelle et collective qui constituent la base de nos travaux. Le premier chapitre replace ainsi l'activité de prise de décision dans le champ des sciences cognitives, et montre comment décrire un jugement catégoriel par un *processus cognitif de reconnaissance*. Nous proposons ensuite différentes caractérisations de l'*expertise* des décideurs, et présentons quelques modèles de décision individuelle. Le second chapitre est consacré à la décision en *équipe*, et à la présentation de modèles de décision collective qui étudient l'équipe en tant qu'entité, plutôt que comme résultante des individus qui la composent. Enfin, une présentation psycho-sociale des phénomènes de groupe est proposée.

La deuxième partie présente notre approche anthropocentrée, et développe nos modèles de décision. Suite à une critique des systèmes d'aide à la décision « classiques », et au constat de leur inapplicabilité aux situations que nous étudions, le chapitre 3 proposera de s'appuyer sur la *théorie de l'activité* pour identifier les besoins de notre démarche. Ces besoins sont couverts dans le chapitre 4 qui développe, d'une part notre modèle de décision basé sur l'HBM, le modèle RPD et le phénomène d'*ecphorie distinctive* que nous proposons pour décrire le processus d'activation d'une règle de décision, et d'autre part notre modèle d'interaction qui permet de prendre en compte les interactions inter-décideurs dans le processus de décision.

La troisième partie présente notre cadre applicatif, la patrouille maritime, et les résultats que nous avons obtenu par des simulations de la prise de décisions dans ce domaine. Ainsi, le chapitre 5 décrit le travail des équipages de patrouille maritime et identifie la tâche centrale d'*identification de piste* comme activité de décision distribuée. Le chapitre 6 présente notre outil de simulation générique basé sur un système multi-agents, et sa mise en œuvre pour la patrouille maritime. Les résultats des simulations seront détaillés.

La quatrième partie propose finalement les *spécifications* du système d'aide aux décideurs que nos modèles de décision distribuée autorisent, et que nos simulations ont permis d'élaborer, avant de tracer le bilan et les perspectives de notre travail. Nous donnons également dans le chapitre 7

une méthodologie de conception originale et adaptée aux spécifications du système proposé.

Les deux annexes proposent respectivement le récit de l'incident du *Vincennes*, exemple que nous étudions à plusieurs reprises dans ce document, et la description technique de l'outil de simulation que nous avons créé.

Notons enfin que ces travaux ont été conjointement encadrés par l'ENST de Bretagne et THALES Airborne Systems, au sein du laboratoire ATOL [1] intégré à l'ENST, dans lequel le prototype AMASCOS [2] de système collaboratif de patrouille maritime a été déployé par THALES.

[1] Aeronautics Technico-Operational Laboratory
[2] Airborne Maritime Surveillance Cooperative System

Première partie

Décision experte et travail en équipe

Chapitre 1

La décision experte

Notre approche pour l'étude de la prise de décision chez le décideur expert s'inscrit dans une vision informatique de la psychologie cognitive qui a conduit, dès les années 80, à considérer l'humain comme un système de traitement de l'information (Lindsay & Norman, 1980).

Dans ce chapitre, nous commencerons donc par une présentation fonctionnelle des éléments du système cognitif humain qui interviennent dans la prise de décision. Nous aborderons notamment la définition d'un processus cognitif en tant qu'activité, expliciterons les structures mentales mises en œuvre dans ces activités, pour finir avec une discussion sur les processus de rappel et de reconnaissance, et du lien qu'ils entretiennent avec l'activité de décision.

Nous nous attarderons ensuite sur la notion d'expertise, et montrerons que l'approche proposée pour l'étude de la prise de décision *profite* grandement des caractéristiques particulières des décideurs experts. Nous pourrons ainsi relier l'expertise à la stabilité des stratégies de décision des experts, notamment en environnement incertain, et au recul dont ils font preuve quant à leurs propres capacités.

Enfin, nous exposerons quelques modèles de prise de décision cohérents avec notre démarche et nos hypothèses. Ces modèles constitueront des points de référence pour le reste de notre travail, tant les notions qu'ils apportent à l'étude de la prise de décision experte sont cruciales.

1.1 Cognition et décision

Par analogie avec un système informatique, le décideur peut être vu comme un *système de traitement de l'information* (Lindsay & Norman, 1980 ; N. H. Anderson, 1981 ; Reuchlin, 2000). Le système cognitif, c.-à-d. l'en-

semble des fonctions impliquées dans les activités mentales d'un individu, est alors décrit comme constitué de différents éléments en relation dans une chaîne de traitement. Cette analogie peut sembler proche du *comportementalisme* apparu dans les années 30 (notamment à la suite des travaux de Pavlov (1927) sur le conditionnement en apprentissage), mais s'en distingue nettement en « ouvrant » les boîtes noires qui constituent les étapes de traitement, cassant de ce fait la simple association stimuli–réponse. Ainsi, toujours par analogie avec l'informatique, chacun de ces éléments sera vu comme un processus ayant des entrées et des sorties qui constitueront soit les entrées du processus suivant, soit les sorties du système cognitif.

En fin de section, nous proposerons une description de la prise de décision en tant qu'activité mentale de traitement de l'information. Cette description s'appuiera sur les notions développées dans les prochains paragraphes qui décrivent succinctement, d'une part le système cognitif, et d'autre part les structures mentales impliquées dans une activité mentale de ce type.

1.1.1 Traitement de l'information

Si le système cognitif est un système de traitement de l'information, nous devrions être capable de déterminer quelles sont ses entrées, ses sorties et les processus qui l'animent. Richard (2004) propose ainsi une vision du système cognitif entouré du système sensoriel duquel il obtient des *informations* sur la situation, et les systèmes moteur et langagier auxquels il peut respectivement fournir des *décisions d'action* et des *contenus sémantiques* à produire (cf. figure 1.1). Ces systèmes « périphériques » sont volontairement placés en dehors du système cognitif, puisqu'ils ne correspondent pas, à proprement parlé, à des *activités mentales* (compréhension, raisonnement ou résolution de problèmes).

Les entrées du système cognitif sont donc des informations résultant de traitements sensoriels. En pénétrant le système cognitif, ses informations s'inscrivent dans la *mémoire de travail* dont la fonction est de contenir toutes les informations nécessaires à l'activité mentale en cours. Cette mémoire ayant pour caractéristiques principales une courte durée de rétention et une faible capacité, la *représentation mentale* de la situation ne sera constituée que d'une quantité limitée d'informations. Cette conception est issue de la notion de *rationalité limitée* proposée par Simon (1957), et par laquelle il considère les activités mentales non plus selon le point de vue de l'optimisation, mais plutôt comme le résultat d'un *processus cognitif* porté par l'individu, bénéficiant alors de toutes les richesses, mais aussi de toutes les limitations du système cognitif. Dans le cas de la prise de décision, le déci-

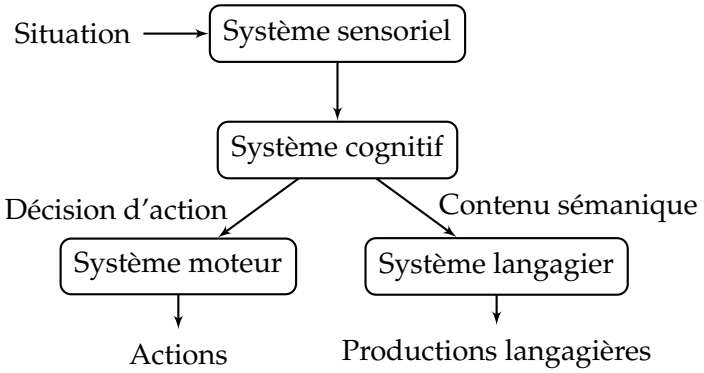

FIG. 1.1 – Vue systémique de la cognition humaine

deur ne vise ainsi qu'un niveau satisfaisant de décision, qui s'oppose à une recherche exhaustive d'une solution optimale.

Dans cette optique, les processus cognitifs sont généralement décrits sous la forme d'heuristiques, qui ne sont alors plus des biais que l'on doit contourner, mais des méthodes adaptées aux capacités individuelles. Ces processus peuvent avoir deux finalités distinctes : une finalité épistémique liée à la production d'informations (par induction ou abduction, par exemple), et une finalité pragmatique liée à la création d'un plan d'action capable de répondre à une problématique. Nous reviendrons plus tard dans cette section (cf. paragraphe 1.1.3) sur les processus cognitifs impliqués dans la prise de décision.

Les sorties du système cognitifs sont de deux types : (i) des décisions d'action (à finalité pragmatique) qui provoqueront, au sein du système moteur, une programmation et une production de gestes, (ii) un contenu sémantique (à finalité épistémique [1]) qui sera verbalisé par l'individu.

En vis-à-vis de la mémoire de travail, est présente une structure mnésique qui diffère tant par sa fonction que par ses caractéristiques, appelée *mémoire à long terme*. Sa fonction est de stocker les *connaissances*, celles-ci pouvant être de nature procédurales (connaissances sur les actions), épisodiques (connaissances sur les situations) ou conceptuelles (connaissances sur les objets). La caractéristique principale de la mémoire à long terme est la durée de rétention des informations qu'elle contient. En effet, de nombreuses études laissent penser que cette durée pourrait être infinie, ou du moins considérée comme telle devant la durée de vie de l'individu. Le pro-

[1] Certains contenus sémantiques, tels que les ordres ou les demandes, peuvent paraître être à finalité pragmatique puisque destinées à provoquer un comportement chez autrui. Néanmoins, nous considérons plutôt le point de vue selon lequel ces contenus ont pour finalité, épistémique, de produire des informations à destination de quelqu'un dont on attend un comportement (qui sera bien le résultat d'un processus à finalité pragmatique).

blème qui se pose alors est double : comment une telle quantité d'informations peut-elle s'organiser, et quels sont les processus nous permettant d'y accéder ?

Nous aborderons ces questions concernant les connaissances de nature épisodiques et conceptuelles dans le prochain paragraphe, les connaissances procédurales n'ayant que peu à voir avec les activités de prise de décision. Quant aux processus de recouvrement, ils seront décrit dans le cadre de la prise de décision au paragraphe 1.1.3.

1.1.2 Typicité et schéma

> « Notre connaissance sur les êtres et les objets est constituée par ce que nous appelons les concepts. » (Richard, 2004)

Concept et catégorie

Dans le système cognitif, un *concept* permet d'abstraire une entité physique de sa spécificité, en la décrivant à différents niveaux de généralités, c.-à-d. différentes *catégories*. Une pomme est ainsi un fruit *et* un aliment. Le concept possède donc une fonction de catégorisation des connaissances.

Dans l'étude des concepts, le problème qui apparaît alors est celui de la définition même d'une catégorie, problème intrinsèquement lié à celui de la structuration des connaissances en mémoire à long terme.

Selon l'approche structuraliste, une catégorie, ou classe, est définie par n dimensions de k valeurs, définissant les *traits* caractéristiques (un trait est une valeur sur une dimension physique) d'une catégorie, permettant de fixer simplement l'appartenance d'un objet à celle-ci (Tversky, 1977). L'organisation des connaissances issue de ce point de vue est caractérisée par (i) l'homogénéité des classes, dans lesquelles tous les exemplaires sont également représentatifs de leur classe, et (ii) la séparation des classes, qui autorise de toujours pouvoir décider de la classe d'un objet, et assure l'unicité de celle-ci.

Cette organisation peut alors naturellement prendre la forme d'un *réseau sémantique* dont les nœuds sont les concepts, et les arcs les liens entre les concepts (cf. notamment (Collins & Quillian, 1969)). À chaque nœud sont stockées les propriétés spécifiques du concept. Si le concept a des propriétés en commun avec d'autres, alors un nœud est créé à un niveau supérieur dans le réseau, pour représenter un concept plus global.

Mais, mise à mal par nombre de constructions en psychologie expérimentale, cette conception a dû laisser sa place à une nouvelle façon de

concevoir les catégories et les concepts : le prototype.

Prototype et typicité

Cordier et Dubois (1981), qui proposent une revue très complète de l'apparition de la notion de typicité [2], et Richard (2004) exposent notamment deux idées, maintenant parfaitement acceptées, concernant la notion de prototype.

La première est que les différents exemplaires d'un concept ne sont pas équivalents, certains étant plus représentatifs que d'autres. Par exemple, la pomme est plus facilement assimilée à la classe fruit que ne l'est la tomate. Ainsi, les exemplaires les plus typiques peuvent servir de *prototype* de la classe.

La deuxième idée concerne la façon de délimiter une classe, non plus par les propriétés qui la définiraient, mais par les prototypes eux-mêmes. Les prototypes sont les exemplaires qui maximisent la ressemblance intra-classe, tout en minimisant la ressemblance inter-classe.

Ces « idées » défendent le point de vue selon lequel il n'existe pas un, mais plusieurs prototypes pour une catégorie, et que l'appartenance d'un objet à une catégorie n'est alors plus définie par la vérification de certains traits caractéristiques, mais plutôt par la distance entre la représentation mentale de cet objet avec un prototype de la catégorie.

Rosch et Mervis (1975) proposent ainsi de caractériser une catégorie par des ressemblances de proche en proche, le long d'une dimension nommée *typicité*. Elles définissent alors le degré de typicité d'un exemplaire comme étant son degré de ressemblance avec les autres exemplaires de la classe.

Dans ce paradigme de typicité, les classes ne sont plus homogènes, et ne sont plus nettement séparées : ce sont des ensembles flous et un même concept peut alors appartenir à plusieurs catégories [3].

On peut néanmoins faire évoluer la notion de trait pour la rendre compatible avec une mesure de typicité. On peut par exemple tracer un parallèle entre le nombre de traits en communs entre des exemplaires et leurs degrés de typicité, c.-à-d. leurs représentativités dans la classe. Smith, Shoben, et Rips (1974) proposent ainsi un modèle dans lequel ils distinguent deux types de traits : les traits *essentiels*, ou *définitoires*, partagés par tous les

[2] En réalité, le terme employé par ces auteurs est *typicalité*, mais nous rejoignons Richard dans son utilisation du terme de typicité, plus « français » que le précédent.

[3] Notons que cette appartenance « multiple » n'a pas à tenir lieu de vérité : ce n'est pas parce que, pour certains, une tomate est autant un légume qu'un fruit, du fait de son utilisation culinaire, que cela est *la* vérité.

exemplaires d'une catégorie, et les traits *caractéristiques*, moins « courants » au sein de la catégorie, mais notamment partagés par les prototypes. Selon ce modèle, l'appartenance d'un objet à une catégorie se vérifie en deux temps : d'abord est déterminé le degré avec lequel tous les traits (définitoires et caractéristiques) sont partagés par l'objet et la catégorie, puis, si la décision ne peut être prise, ce degré d'appartenance est revu sur la seule base des traits définitoires. Ainsi, un objet ayant un caractère prototypique pour une catégorie sera plus rapidement associé, du fait de sa forte similitude avec l'ensemble des traits associés. Le degré de typicité d'un objet peut alors simplement être relié à une mesure de distance entre une représentation de l'objet et une catégorie dont on aurait pondéré les traits (cette interprétation dite en *relief* est due à Le Ny (1979)).

Malgré l'apport de la notion de typicité, une question importante reste en suspens : comment le prototype est-il construit ? est-ce un exemplaire du concept, ou une construction abstraite autour de laquelle les concepts seraient définis ? Tentons une réponse à l'aide des *schémas de connaissance*.

Les schémas de connaissance

« La notion de *schéma* a été introduite pour rendre compte du rôle [*cognitif*] joué par les connaissances dans la compréhension, la mémorisation et la production d'inférences. Les schémas sont à la fois une façon de représenter l'organisation des connaissances en mémoire et une façon d'exprimer comment ces connaissances sont utilisées pour comprendre, mémoriser, faire des inférences. » (Richard, 2004, p. 70)

Richard dégage quatre caractéristiques principales des schémas :

1. ce sont des blocs de connaissances : d'une part, un schéma constitue une unité de connaissance *insécable* et récupérée comme telle en mémoire, et d'autre part, il est autonome par rapport aux autres connaissances.
2. ce sont des objets complexes : il est constitué à partir d'autres objets cognitifs, à savoir les concepts, les actions, ou d'autres schémas plus généraux.
3. ce sont des structures abstraites : il contient des variables destinées à être remplies par des éléments spécifiques de la situation : on parle alors de l'*instanciation* du schéma.
4. ils expriment des connaissances déclaratives, c.-à-d. non liées à une utilisation particulière, comme le sont les connaissances procédurales, et un même schéma peut donc s'appliquer à plusieurs situations concrètes.

Les schémas sont donc des constructions psychologiques abstraites, construites avec et autour des prototypes, au cours de la vie de l'individu et selon ses expériences personnelles, afin d'organiser d'autres connaissances. Ils sont comparables à des morceaux de souvenirs extraits de leurs contextes, et constituent les « points d'entrée » de la mémoire à long terme. Ils permettent ainsi l'accès aux connaissances : le processus d'instanciation, par l'utilisation d'informations issues de la situation courante, permet l'activation d'un schéma, et sa récupération en mémoire de travail.

Notons alors l'apparition des notions de situation et de contexte :

La situation est constituée des éléments de l'environnement *nécessaires* à l'instanciation d'un schéma. Elle devient ainsi l'élément clé qui permet, d'une part de générer, et d'autre part d'activer, des schémas associés à la problématique courante. Nous verrons plus loin (au paragraphe 1.3.3) comment l'instanciation d'un schéma peut, de fait, se formaliser par la complétion des variables libres du schéma représenté sous forme de vecteur, à l'aide des données de la *représentation mentale* de la situation (cf. paragraphe 1.3.2).

Le contexte est quant à lui défini à travers l'ensemble des éléments de l'environnement dont la variabilité n'influe pas sur la compréhension de la problématique, mais la contraint.

1.1.3 La prise de décision

Nous allons à présent replacer les processus de prise de décision dans le cadre cognitiviste que nous venons de décrire. Pour cela, une description préalable des processus de rappel et de reconnaissance en mémoire à long terme est nécessaire.

Rappel et reconnaissance

Pour définir et décrire ces phénomènes, nous adopterons le modèle de Tulving (1983), qui propose une description de la *récupération involontaire*, c.-à-d. non contrôlée par un processus conscient, d'informations en mémoire à long terme. En voici une simplification : une phase préalable de « création d'un engramme », qui est la *trace biologique* permettant l'encodage des événements (phase d'apprentissage) ; à cet événement correspond alors une trace en MLT. La deuxième phase est la « question » : dans un contexte quelconque, généralement différent de celui d'apprentissage, le sujet doit récupérer l'information à partir d'un *indice*, par un processus que Tulving appelle l'*ecphorie synergétique*. Le terme d'ecphorie provient des travaux de Semon (1904, 1909), qui l'a introduit pour décrire les processus biologiques

par lesquels une trace mnésique « revient » à la conscience de l'individu, en réponse à un stimuli. Tandis que le terme de synergie décrit le fait que l'information re-construite à partir de l'événement encodé est en synergie avec l'indice (processus de décodage). Cet indice peut :

- être similaire à l'événement encodé : c'est le cas de la reconnaissance,
- avoir un lien avec l'événement encodé (le plus classiquement ce lien a été induit lors de la phase d'apprentissage) : c'est le cas du rappel indicé,
- être « temporel » : le sujet doit récupérer l'ensemble des informations stockées lors d'une phase identifiée comme étant « la phase d'apprentissage » : cas du rappel.

Sur cette base, décrire un processus de rappel basé sur la notion de schéma est alors possible. Citons notamment les travaux de Hintzman (1986), qui propose l'application de son modèle Minerva II à la description du processus de rappel épisodique. Dans ce modèle, Hintzman considère que la mémoire à long terme n'est pas subdivisée en une mémoire procédurale, une mémoire épisodique et une mémoire sémantique comme nous l'avons évoqué, mais qu'elle n'est constituée que d'un seul ensemble de traces mnésiques épisodiques [4]. Ce caractère épisodique n'est alors plus relié à la nature des connaissances, mais au fait que deux présentations d'un même objet provoqueront l'inscription de deux traces en mémoire, puisque l'*épisode* de présentation n'était pas le même.

Suivant le modèle Minerva II, l'ecphorie synergétique se décrit par :

1. le calcul de l'*intensité* de l'information récupérée, en fonction des *similarités* de l'indice, appelé *sonde* par Hintzman, avec les traces,
2. la construction de l'information récupérée, sous forme d'une combinaison linéaire des traces, pondérées par leurs similarités avec la sonde.

La décision : processus de reconnaissance ?

La prise de décision est classiquement subdivisée en deux tâches de natures différentes : choix d'une (ou plusieurs) alternative(s) parmi un ensemble, et jugement qui traduit une opinion (Barthélemy, 1997 ; Mullet, Barthélemy, Duponchelle, Sastre, & Neto, 1996).

[4] Nous parlons également dans ce cas de modélisation non abstractive de la mémoire (Rousset, 2000).

Dans une tâche de choix, au moins deux objets sont nécessaires, et le résultat peut être perçu soit comme une sélection, soit comme une élimination. Si le choix n'est pas forcé, des non-choix peuvent apparaître, d'autant plus si les objets ne sont pas directement comparables, c.-à-d. qu'ils ne sont pas décrits par le même ensemble d'attributs.

Dans un jugement, un seul objet est nécessaire, et une « étiquette » doit lui être apposée. Celle-ci peut être extraite soit d'une échelle ordonnée ou semi-ordonnée, soit d'une échelle catégorique, et nous parlerons alors plus volontiers de *tâche de catégorisation*.

Dans le présent travail, nous étudions la prise de décision en tant qu'activité de catégorisation. Vis-à-vis du modèle de rappel de schéma que nous évoquions précédemment, nous pouvons alors dire que l'objet à classer constitue la sonde, que les traces sont les expériences précédentes du décideur, et que l'information retrouvée sera la catégorie que cet individu attribue à l'objet. La problématique de décision devient alors, dans ce cas, une problématique de reconnaissance ou de rappel de catégorie, qui s'appuie sur l'expérience du décideur, et la représentation de la situation.

1.2 De l'expertise

Nous avons présenté dans la section précédente une approche de la prise de décision, qualifiée de *comportementalisme cognitif* où « l'observation porte non plus sur les réponses du décideur en elles-mêmes, mais sur les processus et états qui génèrent ces réponses » (Coppin, 1999), décrite par la chaîne de traitement « informations–processus de décision–réponse », et s'appuyant sur l'expertise du décideur. Avant, donc, de proposer quelques modèles de processus de décision, il est intéressant de re-situer le décideur dans son expertise.

Cette section a donc un objectif simple : caractériser un décideur expert. Nous le ferons d'abord par la description d'un *expert* en tant que décideur aux compétences particulières. Ensuite, nous proposerons de voir notre expert à travers son *niveau d'expertise*, pour finir, à l'aide de la notion de *métacognition*, par expliciter les capacités cognitives particulières dont il fait état.

1.2.1 Types de décideurs

Il est classique de distinguer quatre types de décideur : l'expert, le novice, le naïf et le professionnel (Barthélemy & Mullet, 1994 ; Shanteau, 1992).

Le *décideur expert* est familier de la tâche de décision dont il a la charge. Il a notamment, par son expérience, aiguisé les domaines de compétences utiles à cette prise de décision, et il sait trouver un sens à ce qu'un décideur non-expert trouverait amorphe (Shanteau, 1988). Il sait convaincre, et ses collègues lui reconnaissent sa grande expérience.

Le *décideur novice* ne possède, au contraire, que des connaissances théoriques, manque de mise en pratique, et se laisse facilement submerger par des informations au sein desquelles il ne sait pas faire le tri.

Le *décideur naïf*, quant à lui, ne possède même pas ces bases théoriques (ou ne les utilisent pas, par économie). Il décide préférentiellement sur la base de son intuition, de son « bon sens ». En termes informationnels, on peut noter que le décideur naïf et le décideur expert ont en commun de n'utiliser que peu d'informations, mais, tandis que celles de l'expert sont liées à des expériences antérieures similaires et pertinentes, celles du naïf n'ont que peu à voir avec la situation actuelle.

Le *décideur professionnel*, enfin, formalise plus volontiers le problème en fonction des outils qu'il compte utiliser pour le résoudre, qu'en fonction du domaine de connaissances impliqué. C'est généralement plus un expert de l'aide à la décision, que de la décision elle-même.

On peut ainsi noter quelques caractéristiques importantes du décideur expert : (i) il développe des stratégies (stockées en mémoire à long terme) d'un niveau de complexité élevé, qui traduisent l'utilisation de schémas de connaissance rendus robustes par son expérience, (ii) il exploite un minimum d'informations pour sa prise de décision, c.-à-d. pour l'instanciation de l'un de ses schémas, mais leurs pertinences sont maximales, et (iii) il conserve un grand contrôle de son processus, notamment grâce à la faible charge cognitive engendrée par l'exploitation du petit nombre d'informations utilisées (nous reviendrons plus en détail sur ce phénomène dans le prochain paragraphe).

1.2.2 Niveau d'expertise

En opposant le décideur expert au décideur novice, nous faisons clairement apparaître le rôle joué par l'expérience du décideur, dans ses stratégies. Pour décrire les performances relatives d'individus dans la réalisation d'une tâche, Rasmussen (1983) propose une description, sous forme de hiérarchie, de l'expertise d'un individu en termes de type de connaissances mises en œuvre dans une activité (cf. figure 1.2). On distingue trois niveaux :

Niveau des connaissances : ce niveau correspond à une utilisation ex-

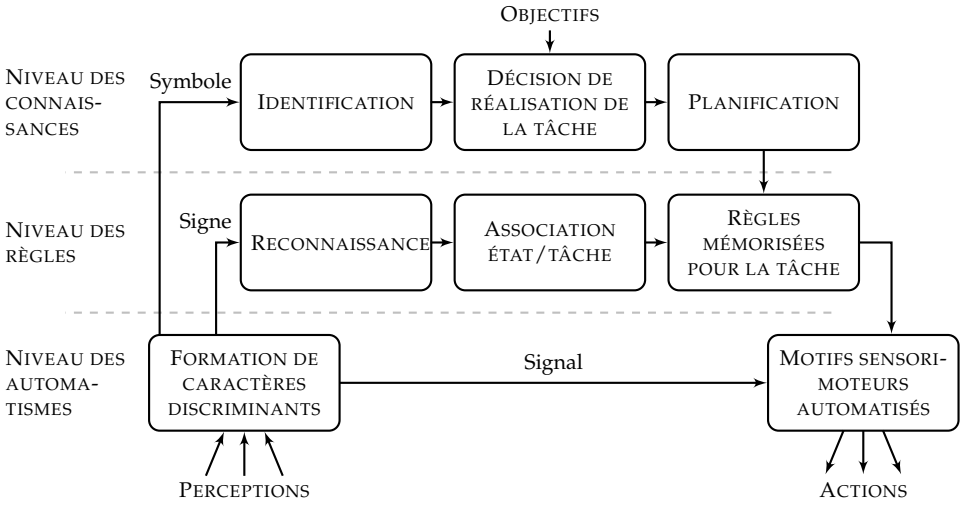

FIG. 1.2 – Hiérarchie de Rasmussen

plicite de concepts, de symboles issus de la théorie du domaine, et est généralement associé à une problématique de type résolution de problème dans laquelle le décideur ne possède aucune expérience adéquate, et doit explicitement construire une solution. Le décideur novice travaillera essentiellement à ce niveau.

Niveau des règles : ce niveau décrit l'instanciation des schémas précédemment évoqués. Dénommé *règle* par Rasmussen, le schéma est récupéré par association (les anglais parlent ici de *pattern-matching*) entre l'état reconnu du monde, que nous avons appelé la situation, et une tâche à effectuer. Il découle alors que ce niveau décrit très correctement le comportement d'un décideur expert.

Niveau des automatismes : ce niveau décrit les comportements automatisées, déclenchés par une configuration de stimuli sans qu'aucune règle ou connaissance ne soit nécessaire. Ces comportements ne se limitent pour autant pas aux réflexes sensori-moteurs : des actions accomplies très fréquemment dans une situation donnée provoqueront l'inscription en mémoire à long terme d'un type de schéma particulier appelé *script*. Selon J. R. Anderson (1997), ces scripts ont en outre la particularité de s'exécuter en « boucle ouverte » (sans contrôle cognitif, cf. le paragraphe suivant), tout en gardant la souplesse et la robustesse des schémas. Ce niveau conviendra également aux décideurs experts.

À l'aide de cette hiérarchie, nous dirons alors qu'un expert est un décideur qui a automatisé ses pratiques, au point de ne plus les activer qu'à l'aide de règles, ou d'automatismes. Néanmoins, ces pratiques expertes très

automatisées n'impliquent pas que le décideur n'en a plus le contrôle. Bien au contraire, il apparaît plutôt que ce degré d'automatisation permette à l'expert, comme nous allons le préciser dans le prochain paragraphe, de « libérer » un peu de sa charge cognitive, pour d'autres activités cognitives.

1.2.3 Métacognition

Un décideur expert peut être caractérisé par le contrôle et la connaissance qu'il possède sur ses propres processus de décision. Ces capacités cognitives particulières peuvent être décrites à travers la notion de *métacognition*.

La métacognition, telle que proposée par Flavell (1976), regroupe des connaissances et des fonctions cognitives, prenant part à la régulation et au contrôle *conscients* de l'activité (le contrôle *inconscient* n'est pas abordé ici, et serait à chercher du côté de la psychanalyse). Ce contrôle s'effectuant sur les activités mentales pendant leur exécution, nous considérerons que les fonctions métacognitives s'exécutent en parallèle (dans le même temps) des fonctions qu'elles contrôlent.

Introduite pour décrire les phénomènes d'apprentissage chez l'enfant, cette notion permet aussi de décrire les moyens par lesquels un individu peut (Richard, 2004, chap. 8&9) :

- d'une part contrôler ses processus cognitifs : planification des tâches en se fixant des objectifs, définition des ressources qui leurs seront allouées, i.e. la charge cognitive dédiée à chaque objectif, et, éventuellement, décision de l'abandon d'une tâche parce que les conditions à sa réalisation ne sont plus réunies,
- et, d'autre part d'évaluer ces mêmes processus : sélection du processus de construction de sa représentation mentale, élaboration des décisions d'action, en termes d'ordonnancement, et évaluation des résultats de ces actions.

Dans notre problématique de prise de décision experte, la métacognition intervient dans le type de connaissances utilisées (au sens de Rasmussen) et dans la stratégie de traitement de ces connaissances (similarité avec un expérience passée, résolution de problème...). Un décideur expert, parce qu'il a acquis de bonnes aptitudes métacognitives, est ainsi capable, au cours du processus de décision ou à son amont, et en fonction des conditions extérieures liées à la situation :

- de modifier le traitement des données qui lui permettent de construire sa représentation mentale par une sélection « instinctive » des données les plus pertinentes,
- de modifier ses stratégies de décision, i.e. les moyens avec lesquels il manipule les informations précédentes pour construire une décision,
- de détecter que le contexte de la prise de décision a changé, c.-à-d. que les conditions d'exécution du processus de prise de décision ne permettent plus son exécution tel que programmée initialement (cf. par exemple le paragraphe 1.3.1).

La terme « instinctif » utilisée ci-dessus est par ailleurs considérée comme l'expression d'un haut niveau d'expertise, où l'individu a l'expérience suffisante pour avoir aiguisé son instinct à réagir correctement aux situations auxquelles il est confronté (Klein, 2004).

La métacognition intervient également dans l'évaluation de la décision, et dans le suivi dynamique de son adéquation avec la situation changeante, qui permet au décideur de modifier sa décision si elle s'avère inadaptée (suite par exemple à une modification importante du contexte).

1.3 Modèles de prise de décision

Nous allons à présent décrire quelques modèles de prises de décision compatibles avec le cadre d'étude que nous venons de définir : celui d'un décideur expert du domaine de compétences concerné. Ces modèles constitueront, en grande partie, la base théorique de l'établissement de nos propres modèles.

Nous proposons dans un premier temps la description de quelques modèles issus du domaine de la prise de décision « écologique » (appelée « Naturalistic Decision Making » par les anglophones). Nous montrerons dans un second temps leurs faiblesses, notamment en terme de formalismes, et décrirons pour pallier cela un modèle cognitif de représentation mentale, qui nous conduira naturellement, dans une troisième partie, à la description des modèles de stratégies élémentaires de décision et de l'Heuristique de la Base Mobile.

1.3.1 La prise de décision « écologique »

Ce domaine prend ses racines dans les travaux de Klein, Orasanu, Calderwood, et Zsambok (1993), qui font suite à une conférence initiatrice de

1989, où les thèmes suivants furent pris pour définition de la décision « écologique » [5] :

environnement complexe et dynamique : le contexte des prises de décision étudiées est caractérisé par l'importance de la pression du temps, de l'incertitude des données, de la mauvaise définition des buts et des enjeux ;

décision experte : les décideurs étudiés sont experts, notamment parce qu'une tâche dont l'enjeu est important n'est pas confiée à un novice ;

nature de la décision : la prise de décision est une problématique de reconnaissance de situation prototypique (ce qui est valide avec l'hypothèse d'expertise des décideurs), et non de résolution de problème qui correspondrait à une construction étape par étape de la solution.

Les modèles répondant de ce domaine prennent souvent la forme d'une description non prescriptive, peu formalisée, de prise de décision experte, en situation réelle, que nous appellerons « écologique ». Nous allons détailler deux exemples : le modèle Recognition-Primed Decision (RPD) (Klein, 1989), centré sur la capacité d'évaluation de la situation du décideur, et le modèle Recognition-Metacognition (R/M) (Cohen, Freeman, & Wolf, 1996), qui met en exergue les capacités d'autocritique des experts.

Recognition-Primed Decision

Dans une étude préliminaire sur la prise de décision des pompiers en situation de combat du feu (Klein, Calderwood, & Clinton-Cirocco, 1986), Klein *et al*. émettent l'hypothèse que ces « décideurs » n'ont pas le temps, à cause de l'urgence des situations, de comparer un grand nombre d'alternatives, mais seulement quelques unes, pour choisir la meilleure. Cependant, lors d'entretiens, ils s'étonnent de ne pas pouvoir vérifier cette hypothèse parce que les pompiers disent ne faire aucun choix, aucune comparaison d'alternatives. Ils se voient plutôt comme des acteurs de leur propre expérience : ils ne gênèrent qu'un seul plan d'actions, et ne le modifie que pour parfaitement répondre aux spécificités de la situation.

Pour décrire la prise de décision de ces pompiers, Klein propose le modèle Recognition Primed Decision (RPD) (Klein, 1989) dont l'élément central est la capacité des décideurs experts à identifier de façon *satisfaisante* une situation grâce à leur expérience, à la classifier pour lui associer un comportement « habituel », puis à la contrôler pour détecter si les événements anticipés ont bien lieu, et si aucun événement majeur non anticipé

[5] Cf. Lipshitz, Klein, Orasanu, et Salas (2001) pour une revue complète et un historique de ce domaine.

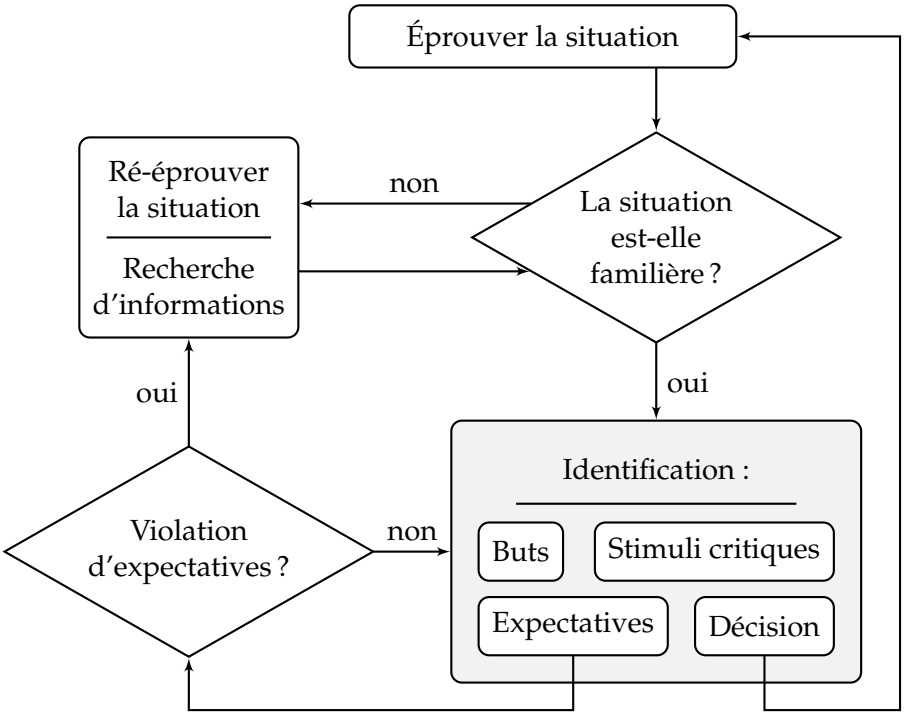

FIG. 1.3 – Modèle « Recognition Primed Decision »

n'intervient. La notion de satisfaction est cruciale ici, puisqu'elle justifie à elle seule le caractère séquentiel de la prise de décision décrite par le modèle RPD. En effet, l'idée centrale reste qu'un décideur expert prend une décision, juge de son à-propos, et n'en change, éventuellement à plusieurs reprises, que s'il détecte un problème. Les différentes alternatives sont ainsi parcourues séquentiellement, jusqu'à en obtenir une qui soit satisfaisante, et non pas optimale (Simon, 1955). Le modèle propose de plus que la décision la plus satisfaisante pour le décideur expert est celle que son processus de typicité lui fournit en premier.

Le modèle RPD, présenté figure 1.3 dans sa variation de « diagnostic » (Klein, 1998, chap.3), s'appuie donc sur l'« identification » de la situation, décrit par [6] :

buts : à chaque situation correspond un ensemble d'objectifs qui constitueront les buts que le décideur souhaite atteindre par sa prise de décision. Un pompier cherchera ainsi toujours à sauver des vies, mais cela soit en attaquant très rapidement le feu, soit en évacuant le lieu du sinistre avant de combattre le feu, ou carrément en abandonnant

[6] On notera avec profit, comme le fait Klein lui-même, que cette description est très proche de la notion de schéma de connaissance (cf. paragraphe 1.1.2).

un bâtiment aux flammes au profit de l'évacuation des victimes.

stimuli critiques : comme nous l'avons dit au paragraphe 1.2.2, une caractéristique d'un expert est de savoir extraire les informations pertinentes d'une situation complexe : ce sont les « stimuli critiques ».

expectatives : les expectatives sont des informations, des événements, ou des séquences d'événements que le décideur sait devoir apparaître ou arriver. Un pompier sait, par exemple, que la couleur de la fumée change s'il a correctement dirigé la lance à eau sur la base du feu. Il sait aussi donner une chronologie approximative des dégâts qui seront causés par le feu qu'il combat. Si ces expectatives sont violées, alors, le décideur sait que son identification de la situation est remise en cause, et qu'il va devra peut-être obtenir de nouvelles informations.

décision : la décision constitue la réponse *typique* du décideur à la situation qu'il a identifiée. Dans le cas d'une décision à finalité pragmatique (cf. paragraphe 1.1.1), comme celles que des pompiers doivent prendre, elle consiste en un plan d'action qu'il faut implémenter. Dans le cas d'une décision à finalité épistémique, la décision est un élément de connaissance, généralement une description synthétique de la situation (on reconnaît ainsi un véhicule en le résumant à sa marque et son modèle).

Autour de cet élément central d'identification s'articule donc :

- un test de typicité de la situation qui permet au décideur de savoir si la situation est prototypique, et qui conditionne la possibilité d'associer un comportement appris par l'expérience. Dans le cas contraire, de nouvelles informations devront être acquises de façon proactive, depuis l'environnement,
- le suivi de l'adéquation de la décision avec la situation à travers le contrôle des expectatives. En effet, l'identification peut être erronée du fait d'informations mal perçues, ou devenir caduque avec l'évolution de la situation,
- une recherche proactive d'informations et une nouvelle reconnaissance de la situation, si l'une des deux situations précédentes le provoque.

Recognition/Metacognition

Tandis que le modèle RPD s'appuie essentiellement sur la notion d'*identification* de la situation, le modèle Recognition/Metacognition (R/M)

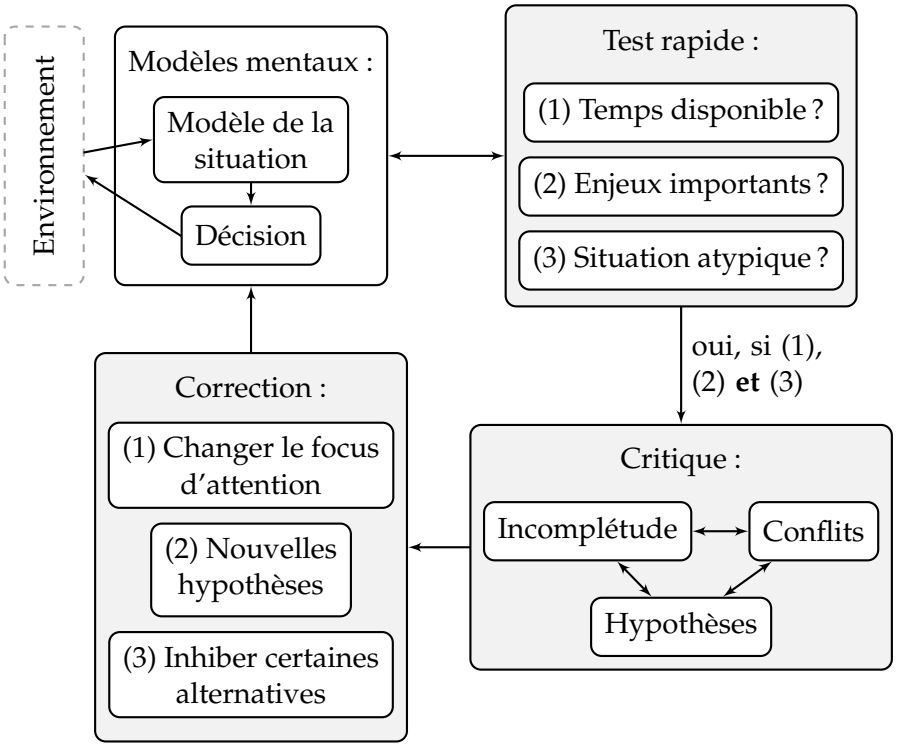

FIG. 1.4 – Modèle « Recognition/Metacognition »

(Cohen *et al.*, 1996) met plus particulièrement en exergue les capacités métacognitives mises en jeu dans les tâches de résolution de problème et de prise de décision.

Étant donné que l'« identification » de la situation et de la décision, nommées modèles mentaux dans le modèle, s'appuie sur un processus assez proche du modèle RPD, nous ne le détaillerons pas ici. En revanche, prenons le temps d'explorer les activités métacognitives proposées par le modèle (cf. figure 1.4).

Test rapide : ce processus se situe à un niveau de précédence par rapport aux deux suivants, dont il conditionne l'exécution. Il décrit les fonctions de contrôle détaillées au paragraphe 1.2.3, par lesquelles le décideur peut choisir de re-planifier des objectifs mal adaptés à la situation, en fonction du temps des enjeux et du temps disponibles. Dans le cas où il fait ce choix, la décision est suspendue et la critique entre en œuvre.

Le « test rapide » est à rapprocher du suivi des expectatives décrit dans le modèle RPD, dans lequel le décideur interprète la violation d'une expectative comme le besoin de remettre en cause son identification de la

situation.

Critique : le processus de critique est un *raisonnement à finalité épistémique* qui identifie les « problèmes » du modèle de la situation et de la décision associée, vis-à-vis de la situation réelle. En accord avec le modèle R/M, trois types de problèmes peuvent apparaître : (i) l'incomplétude de la description de la situation, c.-à-d. qu'un argument nécessaire pour confirmer ou infirmer un élément du modèle ou du plan est absent, (ii) le modèle de la situation semble s'appuyer sur des hypothèses douteuses, (iii) un conflit sur les conséquences de différentes alternatives du modèle et/ou du plan d'action sous-jacent à la décision (quand celle-ci possède une finalité pragmatique).

Cette étape du raisonnement est absente du modèle RPD. Elle permettrait pourtant de décrire comment le décideur choisit, après avoir détecté une violation d'expectative, quelles informations il délaisse, et vers quels nouveaux stimuli il souhaite se tourner pour faire évoluer son identification.

Correction : la « correction » s'appuie sur les problèmes mis en exergue par le processus de critique. Il s'agit donc, pour le décideur, soit (i) d'obtenir de nouvelles observations et informations en modifiant son focus d'attention, soit (ii) de réviser ses hypothèses qui sous-tendront un nouveau modèle de la situation, soit (iii) d'inhiber des alternatives problématiques du modèle de la situation en cours de critique/correction.

Ce processus correspond évident à la recherche proactive d'informations du modèle RPD, mais apparaît ici aussi bien plus détaillé.

Malgré les apports théoriques essentiels de ces deux modèles, ils restent difficiles à exploiter dans le cadre d'une aide informatique aux décideurs, d'une part par leur manque de formalisme, et d'autre part parce qu'il ne sont que des descriptions de haut niveau des processus de décision, et qu'ils ne donnent ainsi aucun détail sur les processus d'activation des prototypes en mémoire. Voyons comment répondre à ces deux besoins.

1.3.2 Représentation mentale de la situation

Un apport majeur de l'approche de traitement de l'information des sciences cognitives concerne la représentation des données manipulées par les modèles de processus proposés. En d'autres termes, cette influence se traduit par des choix spécifiques sur le modèle de représentation mentale de l'individu.

Il a par exemple été proposé (Svenson, 1979), et nous garderons ce formalisme par la suite, que chaque attribut de description de la situation induise, pour l'individu, une *échelle d'attractivité* : une alternative a est ainsi plus attractive qu'une alternative b sur un attribut donné, si leur différence d'évaluations sur l'échelle d'attractivité associée est, par exemple, au dessus d'un certain seuil (Montgomery & Svenson, 1976). Notons que la subjectivité de cette notion conduit bien évidemment, pour une *même grandeur physique*, c.-à-d. un même attribut de description, à *des échelles d'attractivité différentes pour différents individus*.

Dans ce cadre, conformément aux dénominations habituelles en théorie de la décision (Montgomery & Svenson, 1976 ; Barthélemy, 1997), on appelle *aspect* l'évaluation subjective d'une alternative sur une échelle d'attractivité, associée à un attribut. La représentation mentale prend alors la forme d'un vecteur d'aspects. Alors, le choix d'échelle(s) effectué par un individu pour construire sa représentation est une *stratégie élémentaire* de décision.

1.3.3 Stratégies élémentaires et structures de dominance

Stratégies élémentaires

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, la notion de stratégie élémentaire de décision apparaît avec le formalisme des échelles d'attractivité. Pour en présenter les concepts, nous suivrons la classification qu'en a fait Svenson, et qui s'effectue selon :

- la structure des échelles d'attractivité, qui peuvent être : bipartites (l'attribut sépare les objets en deux classes), ordinales (les aspects forment un ordre total), semi-ordinales (deux objets ne sont ordonnés que si leurs différences d'attractivité dépasse un seuil spécifique à l'attribut), ou de différences (seules les différences d'attractivité sont comparées, et elles forment un ordre total).
- la *commensurabilité* entre attributs : traduit le facteur compensatoire des aspects entre eux, sur les différentes échelles d'attractivité.
- l'existence d'un ordre lexicographique, c.-à-d. d'un ordre de priorité, entre les attributs.

Parmi les différentes stratégies élémentaires possibles, nous pouvons trouver (les descriptions sont données pour une tâche de choix de 1 parmi n)[7] :

[7] Une revue complète des stratégies élémentaires de décision a été effectuée par Barthélemy et Lapébie (1995).

Stratégie lexicographique : *Échelles ordinales, sans commensurabilité, avec ordre lexicographique* (Tversky, 1969). L'alternative choisie est celle qui possède la plus grande attractivité sur l'attribut le plus important (par expression des préférences du décideur). En cas de non choix, le second attribut est examiné, et ainsi de suite.

Stratégie de dominance pure : *Échelles ordinales, sans commensurabilité, sans ordre lexicographique* (Lee, 1971). L'alternative choisie est celle qui est plus attractive que les autres sur au moins un attribut, et pas moins sur tous les autres.

Stratégie de dominance : *Échelles de différences, avec commensurabilité, sans ordre lexicographique* (Lapébie, 1995). L'alternative choisie est celle qui maximise au moins une différence d'attractivité (qui doit également être supérieure au seuil de l'attribut), et qui n'en minimise aucune.

Stratégie de la plus grande différence d'attractivité : *Échelles de différences, avec commensurabilité, sans ordre lexicographique* (Montgomery & Svenson, 1976). Le décideur détermine l'attribut ayant la plus grande différence d'attractivité, et choisi l'alternative qui maximise cette différence.

Recherche de structure de dominance

Cette section reprend essentiellement l'article de Montgomery (1983), et ne souhaite pas s'y substituer. Le lecteur pourra donc s'y référer, ainsi qu'à Montgomery et Willén (1999), pour plus de détails.

La construction d'un modèle capable de prendre en compte toutes les stratégies élémentaires de décision paraît futile.

Au lieu d'étudier les différentes règles de décision séparément, ce que propose Montgomery est un modèle composite qui combine ces règles autour de ce qui est pour lui, et pour certains neurobiologistes (Berthoz, 2003, p. 306), la règle principale dans un processus de décision : la dominance. Les autres règles n'interviennent alors que pour structurer le problème avant et après l'utilisation de cette règle.

Dans son processus de décision, le décideur s'appuie sur une représentation mentale de la situation, faite à partir d'une sélection d'informations disponibles dans son environnement. Cette construction est alors l'élément central utilisé pour la tâche de choix ou de jugement. Si elle ne permet pas de décider, une nouvelle construction est nécessaire.

Le modèle obtenu fait alors apparaître la notion de *structure de dominance*, qui représente une construction mentale permettant de prendre une décision, et qui traduit les comportements complexes d'un décideur. La

prise de décision correspond à la recherche de la structure de dominance, c.-à-d. de la représentation mentale de la situation qui permettra la décision. Cette notion de « bonne » représentation rejoint alors le principe de satisfaction proposée par Simon (1957).

Nous pouvons dire que le processus de décision correspond ainsi à la « recherche d'une bonne structuration du problème », c.-à-d. celle qui permettra sa résolution. Elle s'effectue autour de la règle de dominance, à l'aide d'autres stratégies élémentaires qui permettront (conjonction, disjonction, lexicographique...), justement, de structurer la représentation.

Ces structures de dominance ont pour caractéristiques communes :

- d'être incomparables : l'expertise du décideur lui a permis de construire un ensemble de structures de dominance qui ne comporte pas d'ambigüité, i.e. que si une structure de dominance s'applique à la situation, elle est unique.
- d'être stable : l'expertise du décideur assure une (relative) stabilité de l'ensemble des structures de dominance, pour une tâche de décision donnée.

Finalement, nous décrirons le processus de décision comme étant la recherche d'une structure de dominance adaptée à la situation. Cette recherche peut notamment être décrite par le biais de l'heuristique de la base mobile présentée au prochain paragraphe.

Heuristique de la Base Mobile

Proposée par Barthélemy et Mullet (1986), l'*Heuristique de la Base Mobile* (HBM) propose de décrire la prise de décision experte, à travers la théorie de la *recherche de structures de dominance* (Montgomery, 1983) et la notion de *stratégie de décision*. Elle introduit de plus une notation algébrique qui permet une formalisation et une implémentation informatique [8].

À l'origine, la tâche de décision traitée par Barthélemy et Mullet était celle du choix de 1 parmi n. Néanmoins, d'autres travaux ont, par la suite, étendu la portée du modèle aux tâches de catégorisation (Barthélemy & Mullet, 1987), de sélection (Barthélemy & Mullet, 1992), ou de jugement de similarité (Barthélemy & Mullet, 1996 ; Kant, 1996).

L'heuristique s'établit autour de quatre hypothèses sur le comportement cognitif du décideur expert :

[8] Cette notation ne sera donnée, puisqu'exploitée et étendue, qu'au paragraphe 4.2.1.

Préférences (H_1) : Le sujet possède des préférences sur les attributs.

Seuils (H_2) : Le sujet utilise des seuils spécifiques aux différents attributs : une alternative est préférée à une autre sur un attribut, si son évaluation dépasse l'autre de la valeur du seuil.

Agrégation (H_3) : Le sujet manipule simultanément un ensemble d'attributs (par exemple par une règle conjonctive).

Stratégies (H_4) : D'une comparaison ou d'un jugement à l'autre, le sujet n'utilise pas les mêmes jeux d'informations (par exemple par une règle disjonctive), et modifie ainsi ses *stratégies de décision*.

Une représentation schématique du modèle, pour une tâche de jugement, est donnée figure 1.5. Le bloc de « sélection d'un ensemble d'attributs » représente le processus de construction de la représentation mentale de la situation, et traduit notamment les hypothèses H_1 et H_3. Le « jugement » qui lui fait suite traduit alors la construction du jugement pour cette représentation (opinion, catégorie...). La satisfaction que ce jugement apporte au décideur est alors mise en question pour déterminer si la décision est possible, ou non (opinion non définie, catégorie indéterminée...), notamment par la mise en œuvre de l'hypothèse H_2 au sein d'une stratégie élémentaire de dominance sur les attributs sélectionnés (cf. paragraphe 1.3.3). Le bloc suivant teste si d'autres ensembles de recherche sont disponibles, c.-à-d. d'autres ensembles d'attributs de description sont restés inexploités. Cette boucle, et cette nouvelle sélection d'un ensemble d'attributs, sont le reflet de l'hypothèse H_4. Si le décideur n'obtient aucun jugement satisfaisant, une situation de non-décision apparaîtra, et terminera le processus. Néanmoins, certaines situations peuvent forcer le décideur à fournir une réponse, et il devra alors mettre en œuvre d'autres processus cognitifs de construction d'une solution.

Trois principes cognitifs peuvent être extraits du modèle (Barthélemy & Mullet, 1992) :

Principe de parcimonie : en raison de sa rationalité limitée, c.-à-d. de son impossibilité de prendre en compte l'intégralité des aspects descriptifs de la situation, le décideur construit des représentations mentales de la situation utilisant les ensembles les plus petits possibles d'attributs.

Principe de fiabilité : ce principe s'oppose au premier, dans le sens où, surtout lorsqu'il est expérimenté, le décideur sait que sa décision doit être fiable, et il sera alors conduit à utiliser un nombre plus importants d'attributs, de façon à obtenir des critères plus significatifs.

Principe de décidabilité : le décideur souhaite décider, si possible dans toutes les situations, et s'autorise alors à modifier sa représentation

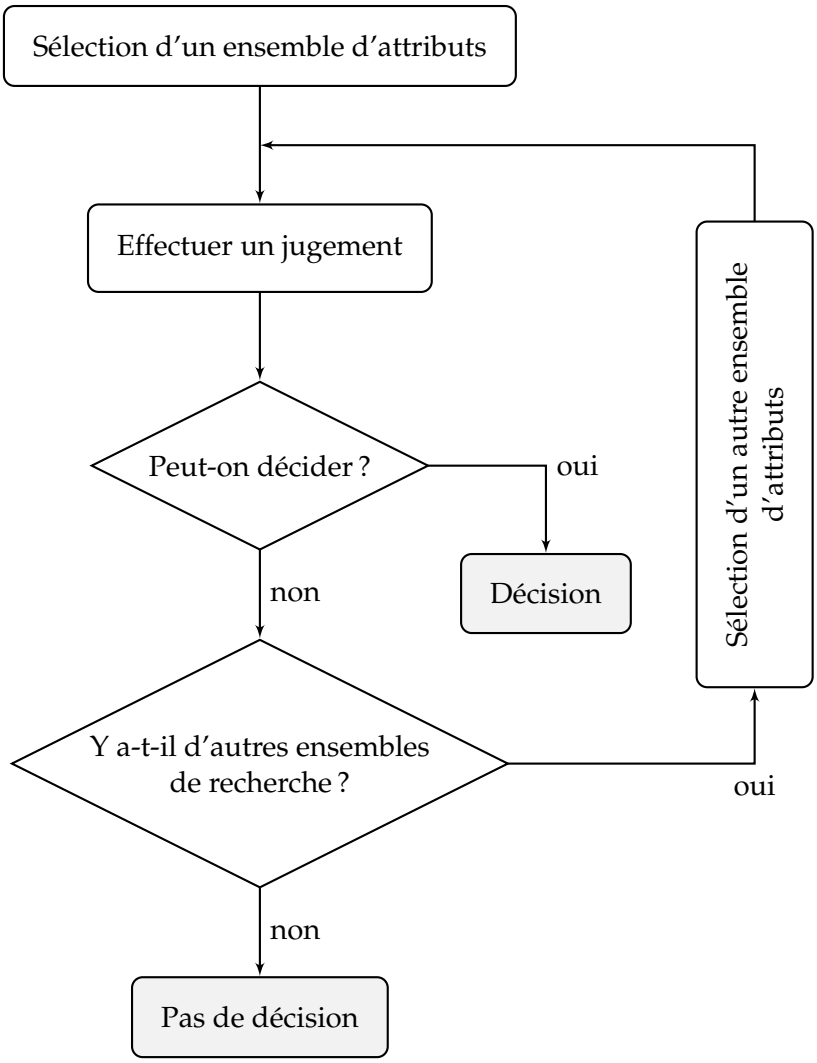

FIG. 1.5 – Heuristique de la Base Mobile

mentale autant que nécessaire, tant qu'elle ne permet pas la décision (cf. hypothèse H_4).

Un point central de ce modèle reste la notion de satisfaction : dès qu'un ensemble d'attributs permet un jugement satisfaisant *pour* l'expert, la décision est prise. Le modèle se différencie ainsi nettement, et gagne en souplesse d'application, par rapport aux modèles de décision basés sur les stratégies élémentaires, ou la recherche de structure de dominance. En effet, ici, seule une construction *satisfaisante* de la situation est recherchée, et il n'est pas nécessaire que tous les attributs soient impliqués. Ainsi, lorsque les ensembles d'attributs sont réduits à des singletons, nous obtenons un modèle dit « disjonctif », ou « lexicographique » si les attributs sont ordonnés. Si un seul ensemble d'attributs est considéré durant le processus de décision, nous sommes face à un modèle dit « conjonctif ». Et dans le cas où l'ensemble d'attributs contient tous les attributs, le modèle devient un « modèle de dominance » (puisqu'il en exploite le principe) (Barthélemy & Mullet, 1986).

Une autre remarque concerne un principe de monoticité, induit par le modèle et son usage de la règle de dominance, qui traduit le fait que l'expression d'un jugement par un décideur sur une représentation donnée (par exemple l'acceptation sur la représentation (a, b)) induira le même jugement pour toutes les représentations qui dominent la précédente (par exemple toute représentation (c, d) où c est plus grand ou égal à a, et d est plus grand ou égal à b). Ce principe sera essentiel sur toutes les phases d'apprentissage des règles de décision, comme nous le verrons dans le chapitre 7.

Notons également que les différentes itérations de l'heuristique font plus clairement apparaître la notion de stratégie de décision : les différents « essais » du décideur représente son cheminement intellectuel, c.-à-d. sa stratégie de résolution face à une problématique donnée. Les différentes représentations mentales intermédiaires, chacune construite sur une *base* différente d'attributs justifie alors l'appellation d'*heuristique de la base mobile* du modèle.

Chapitre 2

Travail en équipe

Nous avons jusqu'à présent parlé du décideur seul face à sa tâche de décision. Néanmoins, cette situation est de moins en moins réaliste, avec la complexité grandissante des problèmes auxquels les experts doivent répondre, qui conduit à leurs spécialisations sur des domaines de compétence de plus en plus pointus. Ainsi, pour couvrir l'étendue d'une *unique* tâche de décision, de nombreux experts sont souvent sollicités, et il leur faut alors travailler ensemble, avec l'objectif commun d'obtenir une réponse cohérente au problème soulevé.

Le positionnement de notre travail considère justement que la prise de décision n'est pas à la charge d'un seul décideur, mais d'un ensemble d'individus dont les interactions doivent permettre la décision. Caractériser cet ensemble de décideurs, et les méthodes par lesquelles ils peuvent coopérer, constitue ainsi un élément essentiel de notre étude.

Dans ce chapitre, nous définirons d'abord la notion de travail en équipe, que nous souhaitons bien distinguer du travail en groupe. Ensuite, à l'aide de ces définitions, nous caractériserons la décision distribuée, telle qu'elle apparaît quand une équipe d'experts se réunit pour prendre une décision. Nous présenterons alors quelques modèles de décision dont l'objectif est de décrire le processus au niveau de l'équipe, et non au niveau des décideurs individuels. Enfin, nous présenterons quelques résultats intéressants issus de la psychologie sociale, qui permettent de replacer différents comportements individuels dans une logique de groupe plus globale.

2.1 Équipe de décideurs

L'existence des groupes humains est indéniable, et notre appartenance à toutes sortes d'entre eux paraît également évident. Néanmoins, la défini-

tion du concept de groupe est délicate, et il est important que nous nous positionnions avant de l'exploiter.

2.1.1 Qu'est-ce qu'un groupe ? Une équipe ?

D'après les définitions classiques [1], un groupe représente soit un « ensemble distinct d'êtres ou de choses analogues, réunis ou rapprochés, que l'œil embrasse en une fois », soit un « ensemble de personnes réunies par une communauté de caractères, d'intérêts, d'objectifs, associées pour une activité déterminée ou un but commun ».

Ces définitions très lâches conviennent bien évidemment à la description des ensembles de décideurs dont nous avons souhaité modéliser les comportements. Néanmoins, en extraire un cadre applicatif paraît vain, ou trop générique, étant donné la variabilité des groupes qu'elles définissent. Ainsi, pour Anzieu et Martin (2003), un groupe d'individus peut prendre différentes formes et différents noms :

la foule est constituée d'un grand nombre d'individus, situés en un même endroit sans l'avoir voulu explicitement. Chacun est là pour son propre compte et cherche à satisfaire en même temps une même motivation individuelle,

la bande se caractérise par le nombre réduit d'individus, comparativement à la foule, par le fait que ses membres sont réunis volontairement, et qu'ils ont du plaisir à se retrouver (parce que l'exigence d'adaptation individuelle aux autres est supprimée, ou suspendue, dans un groupe de cet nature),

le groupement est une réunion de personnes en petit, moyen ou grand nombre. La périodicité des réunions est plus ou moins importante avec une constance relative des objectifs. Le but principal est de répondre à un intérêt de ses membres, comme le font par exemple les associations du genre « Loi 1901 »,

le groupe primaire ou restreint est déterminé par son nombre restreint, par le fait que chacun a une perception individualisée de l'autre, et par le fait que les échanges inter-individuels sont nombreux. De plus, les participants ont en commun les mêmes buts, et construisent des interdépendances, qui peut amener une solidarité très forte, même en dehors des réunions et actions communes. Des normes, des signaux et des rites propres s'érigent,

le groupe secondaire ou organisation se caractérise par le plus grand nombre de ses membres (hôpital, école, entreprise, parti politique), et par le fait qu'ils poursuivent des buts similaires ou complémentaires.

[1] Source : 9e édition du dictionnaire en ligne de l'académie française.

Il est alors intéressant de lire [1] la définition d'une équipe : « groupe de personnes affectées à un travail déterminé ou unies par un but commun », qui la place, par nature, comme un type particulier de groupe, très proche du groupe primaire dépeint par Anzieu et Martin.

L'élément central pour notre travail, dans cette définition, est la tâche commune. Ainsi, dans notre problématique de prise de décision distribuée, le « travail déterminé » est la prise de décision, le « but commun » est l'obtention de cette décision, et les décideurs qui en ont la charge forment une équipe.

2.1.2 Caractéristiques des équipes de décideurs

La prise de décision distribuée est ainsi caractérisée par Skrzyniarz (2003) :

- plusieurs entités décisionnelles différentes sont impliquées, et prennent des décisions de manière autonome,
- les entités travaillent sur le même objet, mais peuvent aboutir à des décisions différentes : c'est une situation de *conflit*,
- pour réduire les conflits, les entités cherchent de nouvelles hypothèses, qu'elles confrontent à nouveau entre elles. Si le conflit disparaît, il y a *consensus*.

À cela, nous souhaitons ajouter quelques caractéristiques liées à la nature particulière de notre équipe :

- les entités décisionnelles ont un but en commun, puisqu'elles font partie d'une équipe : obtenir une décision consensuelle de bonne qualité. La source des conflits n'est donc pas à chercher dans les conflits d'intérêt, mais dans une éventuelle connaissance incomplète de l'état du monde.
- en tant que membres d'un groupe primaire, les entités créent, avec le temps et l'habitude de *travailler ensemble*, des interdépendances au niveau informationnel. Cela traduit notamment le fait que leurs schémas de décision s'adaptent, et s'accommodent du fait qu'un ensemble d'informations sur lesquelles elles reposent peuvent être fournies par des coéquipiers. Ce niveau d'interdépendance nous permettra d'ailleurs de parler d'expertise au niveau même de l'*équipe* (cf. paragraphe 2.2.1).
- elles coopèrent en réponse à une double motivation :

  la volonté de réduire les conflits, pour atteindre le but commun le plus rapidement possible. Cette volonté traduit ce que Lamarche,

Gascon, et Thibault (1980) (cité dans Anzieu et Martin (2003)) appelle la règle d'*appariement*, par laquelle un individu compare les informations présentées avec ses croyances, et polarise éventuellement son opinion pour chercher l'équivalence ;

la nécessité créée par la dépendance que nous avons décrite, qui les empêche de décider individuellement, et les oblige à interagir pour décider.

Nous avons montré, au niveau individuel, que l'expertise joue un rôle essentiel dans la *performance* du décideur. Il est alors intéressant de constater que, au niveau collectif, l'expertise est également un critère essentiel de performance (cf. paragraphe 2.2). En effet, une *équipe experte* aura développé des méthodes évoluées de travail, augmentant généralement la dépendance entre les décideurs, mais leur permettant de mieux décider, et plus rapidement.

Le mode de travail en équipe n'exclut toutefois pas différents degrés de liberté. Ainsi, malgré les inter-dépendances entre décideurs, le remplacement d'un membre de l'équipe par un autre n'est pas systématiquement préjudiciable. S'il a une expertise équivalente en terme de domaines de compétence et de niveau d'expertise, l'équipe n'aura que peu à modifier ses pratiques pour s'adapter. Autrement, la dégradation des performances de l'équipe dans son ensemble peut être notable. Par exemple, dans les équipes de sports collectifs, il est possible en cours de match de changer un joueur pour un autre, à poste équivalent.

Un autre degré de liberté concerne la structuration de l'équipe. Rien ne présuppose en effet que les décideurs ont tous les mêmes responsabilités, ou fonctions, et une structure hiérarchique peut être présente. Elle peut même s'avérer utile, par exemple lorsque les différents agents n'arrivent pas à une décision consensuelle, alors même que ne pas décider est pire que prendre une mauvaise décision. La hiérarchie, en donnant un rôle et la responsabilité de chef à l'un des coéquipiers, lui permettra de « trancher », et d'imposer une décision.

2.1.3 Caractéristiques de la décision distribuée

Si la décision est prise en charge par une équipe, nous dirons qu'elle est distribuée, cet aspect faisant référence à des caractéristiques spatiales, temporelles et/ou fonctionnelles.

La décision peut être distribuée de façon spatiale en référence aux différentes localisations des agents décideurs, qui leur confère usuellement des

points de vues différents sur le monde qui les entoure. Néanmoins, cette séparation, éventuellement importante sur le plan géographique, ne doit pas empêcher la coopération des agents, par exemple au moyen d'une mise en relation par un réseau informatique, et une application distribué.

La caractéristique temporelle de la décision distribuée peut être considérée comme une conséquence, extrinsèque à l'équipe, de la dynamique de l'environnement. Les informations traitées n'ont alors qu'une validité limitée dans le temps, et les processus de décision doivent gérer ces évolutions. Cette caractéristique est également intrinsèque à l'équipe lorsque l'on prend en compte la dynamique de convergence (ou d'établissement) d'une décision collective à partir des décisions individuelles des agents décideurs de l'équipe [2].

L'aspect distribué de la décision peut enfin être considérée du point de vue fonctionnel, au sens où les agents peuvent se voir assigner des rôles différents. Cette répartition peut notamment faire référence à leurs compétences, puisque l'on s'intéresse particulièrement aux situations où les décideurs sont experts de leurs domaines (cf. chapitre 1).

Les trois dimensions de la décision distribuée sont étroitement liées. La distribution spatiale, qui permet d'obtenir des points de vue différents, est ainsi très liée à la distribution fonctionnelle qui suppose que les différents agents perçoivent des données pertinentes pour leurs compétences. Notons que, même lorsque ces compétences sont identiques, la distribution spatiale peut s'avérer nécessaire, pour assurer une redondance et ainsi renforcer la sécurité, ou pour s'assurer que la dynamique de l'environnement est correctement suivie, en offrant aux différents individus la possibilité de gérer différentes échelles temporelles.

Nous verrons au chapitre 5 que ces caractéristiques sont particulièrement bien illustrée au sein de la Patrouille Maritime, où des informations de différentes natures sont nécessaires à la réalisation de la tâche, c.-à-d. identifier des objets en mer. Chaque source d'information ne peut suffire seule à la tâche d'identification (ou très rarement), et la décision nécessite la mise en œuvre de compétences variées. L'identification nécessite ainsi la coopération des différents agents qui peuvent être spatialement éloignés (par exemple une équipe au sol, une autre en mer et une troisième dans un avion). Les échanges (informations, décisions, requêtes) entre les différents agents sont donc cruciaux au sein du processus.

[2] Nous détaillerons ces niveaux de dynamique au paragraphe 4.1.1.

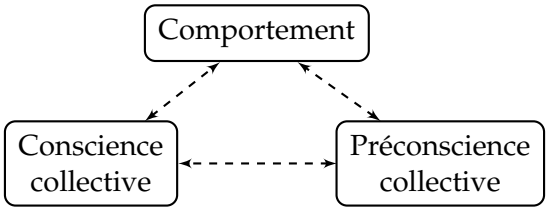

FIG. 2.1 – Métaphore « Team-Mind »

2.2 Modèles de décision en équipe

Dans cette section, nous souhaitons présenter quelques modèles de décision en équipe. Ceux-ci ont la particularité d'axer leurs propos sur l'équipe elle-même, plutôt que sur les individus la constituant, non pas pour dévaloriser leurs apports dans le processus distribué, mais, en revanche, pour mettre en évidence le statut de l'*équipe*.

Nous verrons également au paragraphe 3.3.2, que ces approches trouvent, paradoxalement, un écho important dans l'approche anthropocentrée de l'aide aux décideurs que nous présenterons, et soutiendrons.

2.2.1 Métaphore « Team-Mind »

Le modèle « Team-Mind » (Thordsen & Klein, 1989 ; Klein, 1998, chap. 14) se présente sous la forme d'une métaphore qui postule qu'une équipe, telle que nous l'avons définie, peut être vue durant l'activité comme une entité émergente, qui s'ajoute à ses membres. Thordsen et Klein proposent alors de distinguer trois composantes de l'« esprit d'équipe » (cf. figure 2.1).

Comportement

L'« esprit d'équipe » n'existe que dans l'activité de celle-ci. Pendant ces périodes actives, on peut attribuer des comportements à l'équipe, sans distinction des membres qui en sont véritablement les acteurs, et elle *émerge* alors du groupe.

Le comportement de l'équipe est constitué d'*actions collectives*, dans le sens où elles répondent à une volonté commune de l'ensemble des membres, et du fait qu'un observateur extérieur préfère en attribuer les bénéfices au collectif plutôt qu'à un individu particulier. Les actions non-unanimes prennent alors la forme d'« *actes manqués* » (Freud, 1926), et sont généralement le résultat d'actions individuelles qui n'ont pas été *contrôlées* par l'équipe. Nous distinguerons ainsi les *actes manqués* des *erreurs collectives*

qui, elles, sont des actions collectives erronées.

Conscience collective

La partie *consciente* de l'équipe est constituée de ce qui peut être verbalisé et entendu de l'intégralité de ses membres. Les processus conscients sont à l'origine des actions et erreurs collectives. Néanmoins, la *verbalisation* n'est pas nécessaire à leurs exécutions. Ces actions ne se limitent donc pas à celles présentant une coordination explicite, par exemple par la verbalisation, une gestuelle perceptible ou une communication à travers un medium quelconque (du moment qu'il est accédé par tous). Bien au contraire, comme nous allons le voir dans le modèle ATDM (présenté plus loin), on considère qu'une coordination implicite à travers les objets de l'activité ou des connaissances communes, c.-à-d. *conscientes* pour l'équipe comme un manuel ou une expérience événementielle commune, devrait suffire et est l'expression de l'*expertise* de l'équipe.

Préconscience collective

La *préconscience collective* dénote d'actions mises en œuvre par des membres isolés, sans que les autres n'en aient connaissance. Elles sont toujours attribuées au collectif, mais n'en sont pas le résultat.

Elles ne sont donc pas conscientes pour l'équipe, puisque certains membres ne sont pas en mesure de les verbaliser au moment de leurs exécutions [3]. Ces actions sont soit basées sur des informations, relatives aux tâches de l'équipe, qui n'ont pas été partagées, par exemple parce que les membres les détenant n'ont pas jugé utile de les communiquer aux autres, pensant qu'ils en avaient connaissance, soit le résultat d'actes manqués au niveau individuel, et dont les conséquences se répercutent au niveau collectif.

Les éléments soulevés par cette analogie sont essentiels à la compréhension du travail en équipe. Le modèle permet ainsi une lecture différente des sources d'erreurs classiques d'une équipe. Par exemple, trop d'informations maintenues au niveau préconscient traduiront souvent pour l'équipe, un manque de coordination, ou de coopération, entre ses membres. Cela résultera en une équipe manquant de *cohérence*, présentant des comportements mal maîtrisés, lents, inadaptés. À l'opposé, la conscience collective constitue le siège de la coopération.

[3] Il ne s'agit pas d'actions résultant du *subconscient* de l'équipe puisqu'il est possible de les rendre conscients par une analyse verbale ultérieure (Freud, 1926).

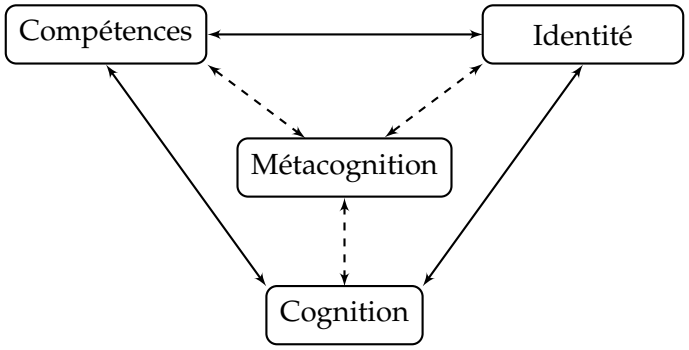

FIG. 2.2 – Modèle « Advanced Team Decision Making »

2.2.2 Advanced Team Decision Making (ATDM)

Plutôt qu'un modèle, il s'agit d'une base de travail permettant l'étude d'une équipe, au sein de l'analogie offerte par la métaphore Team-Mind (Klein, Zsambok, & Thordsen, 1993 ; Thordsen, Kyne, & Klein, 1994 ; Klein, 1998, chap. 14).

Ce modèle stipule l'existence d'une cognition d'équipe, et que sa construction peut être décrite avec les outils de la psychologie développementale [4]. Ainsi, quatre plans du développement de l'enfant ont été choisis pour créer un cadre d'étude des équipes (cf. figure 2.2) :

Compétences : Il s'agit de l'ensemble des savoirs et des savoir-faire de l'équipe. L'acquisition de ces connaissances lui permet, comme dans le cas d'un individu, d'acquérir de l'expérience et de gagner en expertise. Elle s'effectue par le biais des membres de l'équipe qui acquièrent des connaissances et des automatismes particuliers au travail en équipe. Cela signifie donc que, pour espérer avoir une équipe experte, il faut au minimum qu'elle soit composée d'individus experts. Notons pour finir, qu'« on ne change pas une équipe qui gagne », sous peine d'obliger ses membres à sans cesse réapprendre, et à ne jamais pouvoir atteindre un niveau d'expertise intéressant.

Identité : Le développement d'une identité dépend de la connaissance que l'on a de soi (distinction moi/autres, buts et intentions, rôles et fonctions...). Pour une équipe, cela nécessite que chaque membre (i) identifie ses buts et intentions à *ceux du groupe*, (ii) ait connaissance et comprenne les rôles et fonctions des autres membres, (iii) maîtrise parfaitement ses propres rôle et fonctions. Si ces conditions sont réunies, l'équipe peut acquérir la connaissance de ce qu'elle sait et peut faire, et des moyens et procédures à mettre en œuvre pour y parvenir.

[4] Ce sujet n'est pas abordé dans ce mémoire, mais le lecteur intéressé pourra se référer, notamment, aux travaux de Piaget (1987).

Concrètement, cette connaissance est répartie au sein de ses membres, mais, la coopération entre eux permet de l'attribuer à l'équipe dans son ensemble.

Cognition : La prise de décision coopérative définie à travers ce modèle (qui ne limite toutefois pas sa portée à l'étude des activités de décision) fait usage des éléments définis dans le modèle individuel RPD (cf. paragraphe 1.3.1) :

- l'*identification de la situation* est le point clé : elle n'est possible que par une compréhension *collective* de la situation, qui nécessite que tous les membres de l'équipe puissent s'exprimer et éventuellement débattre (niveau conscient de la métaphore Team-Mind).
- cette identification contient la nature des *buts* de l'équipe : pour les définir, et les atteindre, chaque membre doit connaître les intentions et besoins individuels des autres membres, et permettre ainsi une bonne coordination.
- elle définit également les *stimuli critiques* et les *expectatives* liés à la situation : l'équipe doit s'assurer que les membres sont compétents (si possible experts) pour le travail qui leur est demandé.
- enfin, la *décision* est la réponse typique de l'équipe à la situation identifiée. Cette décision, comme dans le cas individuel décrit par le modèle RPD, est soit à finalité épistémique, soit à finalité pragmatique. Dans les deux cas, il est nécessaire que l'un des membres se charge de l'expression de cette décision (quand il existe, c'est généralement le chef d'équipe qui a cette responsabilité). Si la finalité pragmatique entraîne une action de la part de l'équipe, la décision prend alors la forme d'un *plan d'actions*, qui décrit la façon dont les membres, dans cette nouvelle activité, vont coopérer.

Métacognition : La métacognition individuelle se caractérise par des capacités de *contrôle* et de *régulation* de l'activité (cf. paragraphe 1.3.1). Il en est de même pour une équipe : la métacognition correspond à des compétences de gestion des processus cognitifs distribués, et s'enrichit par l'expérience commune. Les membres apprennent à anticiper les besoins de leurs coéquipiers, c.-à-d. à mieux contrôler le processus dans lequel ils sont impliqués, et à évaluer ces processus, pour les adapter, au besoin, pendant leurs exécutions.

Suivant ces axes de développement, on observe l'acquisition par les équipes d'*automatismes* (au sens de Rasmussen (1983), cf. paragraphe 1.2.2), qui se traduisent par un haut niveau de coopération *implicite* entre les membres du groupe. Ceux-ci deviennent ainsi capables d'envisager les ac-

tions menées par l'équipe dans leurs ensembles, et de coopérer efficacement, bien que seules les informations essentielles ne soient verbalisées.

2.2.3 L'incident du *Vincennes* - Vue des individus

Les décisions en groupe ont été le sujet de plusieurs études en sociologie et psycho-sociologie. Ces études ont généralement pour point de départ un ensemble de décisions absurdes (Morel, 2002), de mauvaises qualités ou aux conséquences désastreuses. Nous adopterons une démarche semblable, en nous appuyant sur un exemple d'échec de décision, que nous allons décrire une première fois à l'aide des modèles que nous venons d'exposer, puis à l'aide des notions de sociologie présentées ci-dessous, et enfin, au chapitre 7, à l'aide des modèles d'aide à la décision que nous développerons dans la prochaine partie.

L'incident du *Vincennes* a été souvent exploité comme exemple type d'une mauvaise prise de décision en situation caractérisée par des responsabilités élevées et un stress important, dans des conditions de pression du temps, de danger et d'incertitude.

Beaucoup ont clamé qu'il y avait eu d'évidents défauts et biais dans la prise de décision de l'équipage du *Vincennes*, racontée en détails en annexe A. Néanmoins, rejeter la faute sur les membres de l'équipage ne suffit pas à en comprendre l'origine. Une lecture particulière à l'aide des modèles Team-Mind et ATDM des deux erreurs commises par l'équipage tactique permet en revanche ce travail :

1. la mauvaise lecture du signal d'Identification Ami ou Ennemi (IAE) permet trois remarques :
    - un mauvais suivi des stimuli critiques contribue aux mauvaises identifications, qui conduisent à des décisions sans adéquation avec la situation réelle ;
    - un des membres de l'équipage a fait une lecture correcte du signal IAE, mais il n'a pas été écouté : l'équipe n'a pas *pris conscience* de cette information, c.-à-d. que celle-ci n'est pas « passée » dans la conscience collective, et elle n'a donc pas contribuée à l'identification de la situation ;
    - des circonstances particulières de stress, de danger et de grandes responsabilité comme celles qu'a vécu l'équipage du *Vincennes* ce jour-là, peuvent provoquer une surcharge cognitive, qui se fait au détriment des fonctions métacognitives. L'équipe *subit* alors la situation, et perd le *contrôle* qu'elle a normalement sur ces processus.

2. l'erreur sur le changement d'altitude de l'Airbus soulève quant à elle le problème de la *responsabilité du système*. L'absence de diffusion, du moins correcte, de l'information concernant le changement de numéro de la piste a participé à une identification erronée, et, pour la raison évoquée à l'instant, les capacités d'évaluation métacognitive de l'équipe n'ont pu être pleinement exploitée.

2.3 Phénomènes de groupe

Nous avons pour l'instant abordé la description des équipes de décideurs par le biais des individus la constituant, et par la façon dont ils y contribuent. Une autre approche, celle de la sociologie, permet un éclairage différent : celui des phénomènes de groupe, qui exprime l'influence que le groupe constitué a sur ses membres.

2.3.1 La pensée de groupe

La *pensée de groupe* (« GroupThink ») est un terme proposé par Janis en (1972). Il décrit le processus selon lequel les individus d'un groupe, et encore plus fortement d'une équipe, ont tendance à rechercher le consensus plutôt qu'à appréhender de manière réaliste la situation.

Le danger d'un tel phénomène est que le groupe peut prendre de mauvaises décisions ou des décisions irrationnelles, même si les individus du groupe auraient individuellement pris une autre décision. Dans une telle situation de pensée de groupe, chaque membre du groupe essaye de conformer son opinion à ce qu'il croit être le consensus du groupe sans se poser la question de ce qui est réaliste. La conséquence est une situation dans laquelle le groupe finit par se mettre d'accord sur une action que chaque membre du groupe croit peu sage.

Janis identifie plusieurs raisons à ce comportement :

- une croyance indiscutée à la moralité du groupe, qui pousse les individus à *ne pas juger les conséquences* de leurs actes ;
- une pression directe, bien que souvent implicite, sur tout membre du groupe qui exprime des arguments forts allant à l'encontre des stéréotypes, et qui mène à la *censure* des membres « dissidents » ;
- l'*autocensure*, répondant aux mêmes causes que la censure, de ceux qui pensent dévier du consensus apparent du groupe ;
- l'*illusion de l'unanimité* qui provient entre autres de l'autocensure des déviations (« Qui ne dit mot consent. »).

2.3.2 Phénomènes de groupe

Moscovici (1984) a poursuivi une réflexion semblable sur les phénomènes d'influence dans les groupes. À la lecture de Janis (1972), il note ainsi que « toutes ces raisons montrent que le comportement des membres [des comités étudiés par Janis] vise à protéger le groupe du danger de dissensions internes. Chacun s'efforce de sauvegarder l'unité et l'unanimité en évitant tout conflit qui pourrait leur nuire. ».

Dans cette analyse, le rôle du groupe est essentiellement négatif, et mène les individus à prendre des décisions collectives de mauvaise qualité.

Moscovici propose de distinguer plusieurs effets du groupe sur les individus :

Effet de normalisation : Cet effet est visible lorsque la moyenne des opinions ou des jugements de chacun est devenue la norme de tous. Le consensus recherché au détriment des avis individuels, potentiellement contradictoires, en est la source majeure.

Effet de polarisation : À l'opposé de l'effet de normalisation, on observe que l'expression de certaines opinions dans le groupe peuvent avoir un effet particulièrement fédérateur. Dans ce cas, les décisions individuelles ont tendance à se cristalliser autour d'une décision qui n'exprime plus nécessairement la norme.

Consensus extrême : Dans certaines conditions, on constate que cette cristallisation s'effectue autour d'une solution extrême, et aux conséquences parfois importantes, en terme de risque. L'apparition de *minorités actives* dans le groupe peut en être la cause, grâce à une force de prescription liée aux charisme et au nombre de ces membres.

2.3.3 L'incident du *Vincennes* - Vue de l'équipe

L'étude des phénomènes de groupe nous donne un nouvel éclairage sur les causes possibles d'erreurs dans les processus d'équipe.

L'incident du *Vincennes* est ainsi un exemple de consensus extrême, résultat de censures, et probablement d'autocensures, de certains membres, et de l'illusion de l'unanimité.

En effet, la tension créée par la situation, notamment par le sentiment de danger, a exacerbé la volonté de l'équipe d'obtenir, rapidement, un consensus sur l'identification, ce but devenu envahissant en terme de gestion des processus cognitifs. D'ailleurs, un autre navire présent sur la zone, le *Sides*, ne s'est pas trompé sur l'identification de l'avion de ligne (cf. annexe A).

Tout se passe comme si l'équipe s'était, implicitement, fixé un objectif supplémentaire : obtenir *l'unanimité*. Alors :

- l'erreur d'appréciation du signal IAE peut alors être le résultat de la censure de l'équipier qui possédait l'information correcte (effet de normalisation),
- tandis que l'obtention de cette unanimité a certainement provoqué un manque de vérification de l'altitude, alors que l'information était (certes, mal) disponible.

Alors que notre première analyse de l'incident du *Vincennes* nous avait plutôt mené à dédouaner l'équipage tactique et ses membres, du fait du contexte très défavorable que la situation avait créé et de la surcharge cognitive que nous pensions avoir identifiée (cf. paragraphe 2.2.3), notre lecture à travers les phénomènes de groupe nous laisse à penser que l'équipe est bien responsable, du fait de la mauvaise gestion de son processus distribué.

Dans la prochaine partie, nous développons nos modèles de décision distribuée, et nous en proposerons une application en partie III. À ce point du discours, nous serons alors capable de donner une troisième lecture des événements du *Vincennes*, qui nous permettra de rétablir les responsabilités.

Deuxième partie

Approche anthropocentrée pour les systèmes d'aide aux décideurs

Chapitre 3

Systèmes d'aide à la décision et aux décideurs

> "We are analog beings trapped in a digital world, and the worst part is, we did it to ourselves."
>
> (Norman, 1998, chap. 7)

La problématique abordée dans ce chapitre est celle de l'aide informatique qui peut être apportée à un décideur, ou à un groupe de décideurs, et dont l'objectif est l'amélioration de la « qualité » de la décision, individuelle ou collective.

Deux approches s'opposent : soit l'aide constitue un guide pour les décideurs, vers une décision que l'on peut calculer et optimiser, selon une approche rationnelle : c'est l'*aide à la décision*, soit on considère que les décideurs sont les seuls en mesure de construire une décision appropriée : c'est l'*aide aux décideurs*.

Dans un premier temps, nous passerons donc en revue quelques approches des systèmes, que nous qualifions de « classiques », d'*aide à la décision*, et qui repose plutôt sur la structuration du processus de décision, ou sur des méthodes d'agrégation et de calcul de consensus. Nous en profiterons pour dire pourquoi nous considérons que les décideurs, surtout lorsqu'ils sont experts, sont et doivent rester les éléments centraux du processus de décision, et être au cœur du système d'aide. Ainsi, nous détaillerons notre vision des systèmes « anthropocentrés » d'*aide aux décideurs*, que nous situerons notamment au sein de la théorie de l'activité. Celle-ci nous permettra de clarifier les besoins en modèles de décision, nécessaires à la conception de tels systèmes, et qui seront développés dans le chapitre suivant.

3.1 Taxonomie des systèmes d'aide

Selon une typologie proposée par Reix (2002), les systèmes d'aide à la décision (SAD) font partie de la famille des *systèmes d'information*. Plus spécifiquement, ce sont des systèmes *supports de gestion* (par opposition aux systèmes *supports d'opérations*) définis par leur objectif, qui est d'aider les décideurs à prendre des « décisions opportunes ». Reix distingue deux fonctions complémentaires :

- fournir des informations,
- et assister les décideurs dans leurs processus de décision.

On retrouve alors la taxonomie proposée par Alter (1980), qui distingue les *SAD orientés données*, qui se concentrent sur la recherche, la présentation et l'analyse de données, et les *SAD orientés modèles* qui proposent des simulations, des optimisations et des suggestions de décision (Lebraty, 2006).

Pour une distinction plus fine, et une extension aux décisions de groupe, c.-à-d. les *système d'aide à la décision de groupe* (SADG) (Kraemer & King, 1988), Power (2002 ; Power & Sharda, 2007) propose de distinguer les SAD :

orienté données qui sont destinés à la collecte et la présentation de données, notamment depuis des bases de données,

orienté modèle qui offrent une aide à la décision à travers des outils de simulation et de calcul (finance, optimisation...),

orienté communication qui se propose, dans le cas de décision de groupe, d'aider la conduite de réunion, ou la collaboration entre les décideurs,

orienté document qui se focalise sur la recherche et l'analyse de document,

orienté connaissance qui utilise des modèles de résolution de problèmes et des connaissances « expertes » pour suggérer et faire des recommandations.

Néanmoins, l'intérêt majeur de cette taxonomie constitue également, à nos yeux, son plus gros inconvénient : elle est essentiellement motivée par une vue historique des SAD (Power, 2007). C'est pourquoi nous lui préférerons celle proposée par Zachary (1986) qui distingue, en fonction des besoins des décideurs, les SAD à base de [1] :

modèles procéduraux tels que les modèles de prévision économique,

modèles de choix tels que les modèles à base d'utilité espérée,

[1] Cette formulation de la taxonomie de Zachary est tirée de Hall (1994).

techniques de contrôle d'information à base, notamment, de systèmes de base de données,

méthodes de raisonnement et d'analyse numériques et symboliques telles que l'analyse statistique et le calcul d'inférence,

techniques de représentation telles que la représentation spatiale de données,

techniques d'aide au jugement humain qui guident le décideur, pour optimiser sa décision.

En introduction, nous opposions les systèmes d'*aide à la décision* aux systèmes d'*aide aux décideurs*. Cette opposition apparaît plus distinctement à présent : la première catégorie étant notamment constituée des SAD à base de modèles procéduraux, de choix, et d'aide au jugement humain pour proposer des guides au processus de décision, tandis que la deuxième utilisera plutôt des techniques de contrôle d'information, de représentation, et de raisonnement pour accompagner le décideur dans son processus.

3.2 Approches « classiques »

Nous ne souhaitons pas détailler toutes les approches existantes dans ce mémoire, et le lecteur pourra notamment consulter l'ouvrage de Bouyssou, Dubois, Pirlot, et Prade (2006) pour une discussion, et une revue, plus complète sur ce sujet. Néanmoins, notre cadre de travail, dont le support informatique mène généralement à une expression multicritère des problèmes, impliquant des experts dont la tâche de décision s'exécute en environnement incertain, et dont les conséquences peuvent être importantes, semble mener vers les approches multicritères, ou d'agrégation de préférences. Il est donc nécessaire d'expliquer en quoi ces approches ne nous conviennent pas.

Décision multicritère

Lorsque l'espace de décision peut être décrit par un ensemble de critères, ou d'attributs, c.-à-d. par un ensemble de variables descriptives, il est possible d'appliquer une méthode de décision multicritère. Celles-ci, bien que variées (Roy, 1985 ; Bouyssou *et al.*, 2000, 2006), présentent plusieurs points communs (Pomerol, 2006) :

- elles mettent l'accent sur la formalisation des actions possibles, qui doivent être connues, ce qui limite généralement ces approches à une tâche de choix,

- elles reposent sur des méthodes d'agrégation des évaluations des actions possibles,
- elles recherchent l'optimisation de la décision en fonction des préférences exprimées par l'utilisateur.

De façon synthétique, nous remarquons que ces méthodes reposent sur un principe de *rationalité* qui stipule (i) que le décideur est capable de définir un ensemble pertinent et pondéré d'attributs, (ii) qu'il sait évaluer, de façon exhaustive, les actions le long de ces attributs, (iii) et qu'il choisit toujours l'action la plus favorable (Von Neumann & Morgenstern, 1944).

L'objectif de l'aide multicritère est ainsi de guider le décideur sur toutes les étapes calculatoires et d'ordonnancement des actions, pour l'aider dans son processus de décision supposé rationnel, mais potentiellement biaisé (Kahneman, Slovic, & Tversky, 1982 ; Barthélemy, 1997 ; Lebraty & Pastorelli-Negre, 2004). Il n'intervient alors plus que dans les phases de description des actions possibles, et d'expression des préférences, ces phases pouvant être répétées, si l'interaction avec le modèle de calcul multicritère le permet.

Autres méthodes d'agrégation

Les méthodes multicritères ne sont pas les seules méthodes d'agrégation existantes. Ruta et Gabrys (2000) proposent notamment une revue très complète des méthodes de fusion, dans lesquelles on peut distinguer les méthodes de :

fusion de données ou de caractéristiques : la fusion s'effectue sur les résultats de différentes méthodes de classification automatique, et une combinaison de ces différents résultats est effectivement calculée (la fusion bayésienne (Cornuèjols & Miclet, 2003), les intégrales de Choquet ou la théorie Dempster-Shaffer sont de cette catégorie) ;

fusion de classifieurs : les différentes méthodes de classification automatique sont groupées, ou sélectionnées, par un processus de plus haut niveau en fonction de la nature des données, ou de mesures sur la qualité de leurs résultats, et aucune combinaison des résultats n'est proposé (cf. le projet SMA2 présenté au paragraphe 6.1).

Globalement, les avantages de ces méthodes multicritère ou de fusion résident dans deux caractéristiques :

- proposer, soit un ordre (ou pré-ordre) sur les actions, soit un choix unique parmi elles, quand bien même celles-ci ne seraient qu'imparfaitement décrites, en environnement incertain,

- guider le(s) décideur(s) dans le processus de décision, supposé rationnel, notamment quand son contexte de réalisation est délicat (risque, incertitude...).

Néanmoins ces approches ne conviennent pas à notre contexte :

- tout d'abord, nous réfutons le principe de rationalité, pour lui préférer le principe « cognitivement réaliste » de *rationalité limité* (cf. le paragraphe 1.1.1) (Barthélemy, Coppin, & Lenca, 2006),
- ensuite, elles nécessitent que les décideurs « aient le temps » de formaliser les actions ou leurs préférences, et d'attendre le calcul de la (ou des) solution(s), puisque les algorithmes peuvent être très complexes, et ne fournissent aucune proposition avant la fin du processus,
- de plus, nos décideurs sont des experts, et en tant que tels, ils sont les seuls garants de la qualité de la décision quelle que soit la situation, familière ou inhabituelle, avec une flexibilité inaccessible aux méthodes automatisées (Bisdorff, 1999 ; Barthélemy, Bisdorff, & Coppin, 2002),
- enfin, les analyses en psychologie sociale (cf. paragraphe 2.3) laissent penser que l'existence même de l'équipe et la recherche d'un consensus détériorent les compétences des individus, et placent ce phénomène au centre de nombreuses erreurs de décision.

Malgré tout, ces décideurs experts sont de plus en plus sollicités, soumis à une pression grandissante, notamment en terme de responsabilité, et toujours sujets à l'erreur (Reason, 1993). Les systèmes d'aide sont alors toujours justifiés, s'ils permettent aux utilisateurs d'être plus performants (Favier, 1996 ; Morrison, Kelly, Moore, & Hutchins, 1997 ; Gassemi, 2005). Notre approche consiste donc, non pas à aider la *décision*, mais à aider, ou à accompagner, les *décideurs* dans leur tâche de décision.

3.3 Approche anthropocentrée de l'aide aux décideurs

Pour parvenir à une aide aux *décideurs*, il convient d'adopter un point de vue différent des approches « classiques ». L'objectif du système n'est plus de proposer un guide normatif et rationnel au décideur. Nous considérons plutôt que les processus de traitement de l'information humains constituent des heuristiques pertinentes pour les tâches de décision soumises, et qu'elles doivent être encouragées. Pomerol (2006) note d'ailleurs, à ce propos, que les décideurs ont tendance à refuser les approches trop formelles, comme la décision multicritère, qui mènent à l'*hésitation*, en apportant souvent leur propre niveau de complexité (Kottemann & Davis, 1991 ; Berthoz,

2003 ; Papy, Folcher, Sidir, & Cerratto Pargman, 2004, p. 286). Notre approche s'inscrit alors d'elle-même dans le mouvement « Human-centered computing » (Hoffman, Hayes, & Ford, 2001) qui propose une nouvelle façon de penser les systèmes informatiques *autour* des humains.

3.3.1 Design anthropocentré

Le design anthropocentré, d'après Rabardel (1995), se focalise sur le point de vue utilisateur de l'activité, tandis que les approches classiques se concentrent sur la partie technique de celle-ci. Le concepteur du système doit alors explicitement considérer les utilisateurs ciblés comme des êtres psychologiques, ayant des motivations, des buts, un système cognitif et mémoriel aux caractéristiques particulières.

Malheureusement, il n'existe pas, ou peu, d'accord sur une définition unique de cette approche, ou sur les moyens qui lui sont nécessaires (Gulliksen *et al.*, 2005), et les approches méthodologiques se multiplient, perdant alors en lisibilité pour les concepteurs de systèmes (Seffah, Gulliksen, & Desmarais, 2005).

Exemples méthodologiques

Un exemple intéressant est présentée par Wolf, Klein, et Thordsen (1991), qui proposent l'utilisation d'une méthodologie d'extraction des connaissances auprès d'experts appelée « Critical Decision Method », due à Flanagan (1954), pour la constitution des spécifications de systèmes d'aide aux décideurs. Cette approche favorise, durant la phase de design, l'exploitation des incidents les plus critiques rencontrés par les décideurs comme base de discussion entre le concepteur et les utilisateurs finaux, pour en extraire les connaissances fondamentales autour desquelles l'activité du décideur s'effectue.

Plus récemment, l'approche « Cognitive Task Analysis » de Klein (1998, pps. 171–175), elle aussi basée sur l'extraction de connaissances auprès d'experts et leurs représentations formalisées (cartes cognitives, listes de caractères critiques, diagrammes hiérarchisés...), a été utilisée pour la mise au point de divers systèmes, notamment dans le domaine de la décision militaire, suite à l'incident du Vincennes (cf. annexe A) (Morrison *et al.*, 1997).

Dans ces deux exemples, le travail réalisé pendant la phase de design et de développement du système, notamment au niveau de l'interface homme-machine, s'inscrit dans l'approche « Cognitive Engineering » proposée par Norman (1986) dans le cadre, plus général que celui de la décision, de

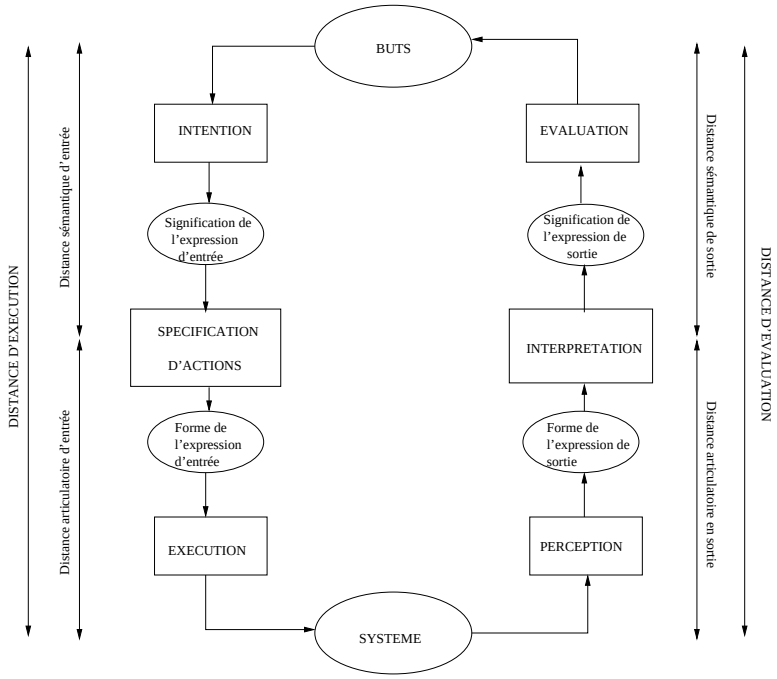

FIG. 3.1 – Boucle de conception du « Cognitive Engineering » (tiré de (Coppin, 1999))

la « coopération homme-machine ». Cette approche décrit une boucle de conception basée sur la réduction des distances pouvant apparaître, d'une part entre le but et le plan d'actions qu'un utilisateur se fixe, et l'état du système obtenu, et d'autre part entre l'état du système, et la compréhension que l'utilisateur en a, qui déterminera le but suivant (cf. figure 3.1).

Insuffisances méthodologiques

Malgré le constat, fait en introduction de cette section, sur le peu d'acceptation de ces méthodes, les exemples d'application démontrent leur validité. Le design anthropocentré démontre ainsi, notamment, les avantages et les apports d'une structuration des connaissances expertes pour la conception d'un système d'aide aux décideurs, et justifie l'effort d'inscription dans la machine des besoins utilisateur, dès la phase de conception.

Néanmoins, les connaissances utilisateurs impliquées se limitent généralement à une vue statique, presque instantanée, de la cognition, et leur exploitation dans la phase de conception laisse encore place à une grande part d'interprétation de la part du designer [2] (Wong, 1999).

[2] On pourra d'ailleurs s'amuser du fait que le concepteur, alors qu'il cherche à définir un

De plus, cette approche continue à voir l'utilisateur et la machine comme deux entités séparées *dans* l'activité, et entretient, à notre avis, l'illusion que l'on peut « abstraire » un design de son utilisation (« Design as *Gestalt* » Hoffman *et al*. (2004)), à travers des processus de conception très formalisés.

Enfin, l'approche *Cognitive Engineering* repose sur la capacité de l'expert à décrire son expertise (« Design as a pervasive activity » Hoffman *et al*. (2004)), bien qu'il soit notoire qu'un « expert n'est pas expert de son expertise » (Shanteau, 1988 ; Barthélemy & Mullet, 1994), et que lui demander de verbaliser son propre savoir-faire introduit un biais important.

Pour pallier ces lacunes, l'approche *Cognitive Engineering* a été étendue (Woods, Roth, & Bennett, 1990 ; Hollnagel, 2005) à la démarche « Joint Cognitive Systems », qui insiste plus spécifiquement sur le besoin de *partage de représentation* et de *compréhension mutuelle* entre l'homme et la machine. Brezillon et Pomerol (1997) précisent dans ce cadre que la question n'est plus sur le *besoin* de ce partage, mais sur le *comment*.

Nous souhaitons également suivre cette démarche, et nous en proposons une lecture sous l'angle de la *théorie de l'activité*, qui la replacera dans une perspective historique de l'évolution des *instruments*.

3.3.2 Théorie de l'activité

Les approches anthropocentrées sont construites avec la volonté de s'opposer aux approches techniques. Il semble pourtant délicat d'évincer totalement les outils de notre étude, dès lors qu'ils sont les médiateurs entre les utilisateurs et les objets de l'activité.

La théorie de l'activité a été développée en ce sens par Vygotsky (1978) et ses collègues (Leontiev, 1981) au début du 20e siècle, pour proposer une nouvelle vision du travail humain en environnement professionnel stable [3].

La relation sujet-objet

Le paradigme central de cette théorie repose sur l'existence, dans toute activité humaine, d'un *artefact* qui est le médiateur du *sujet* avec l'*objet* de l'activité (cf. figure 3.2).

système adapté à un décideur dont on peut modéliser la prise de décision par des modèles tels que « Recognition-Primed Decision » (cf. paragraphe 1.3.1), met en œuvre des processus que l'on peut qualifier de « Recognition-Primed *Design* » (Hoffman, Roesler, & Moon, 2004)

[3] La présentation faite dans cette section s'inspire grandement du travail de Legras (2007) sur l'intégration des technologies de l'information en interaction homme-système.

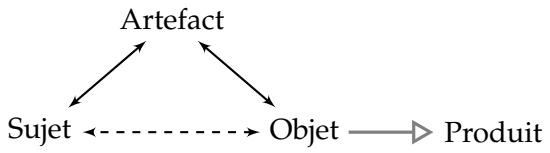

FIG. 3.2 – La relation sujet-objet en théorie de l'activité

Plutôt que de considérer l'individu lui-même en activité, c.-à-d., dans notre cas, les processus cognitifs liés à son activité, Vygotsky propose d'étudier l'activité elle-même en tant qu'entité. Le *sujet* de l'activité est l'individu, ou le groupe d'individus, dont on choisit le point de vue comme référence de l'étude. Il est motivé et orienté dans ses actions *vers un objet*, qui peut être compris comme un objectif, qu'il doit transformer à l'aide d'un *artefact*. Cet artefact peut impliquer différents outils matériels (marteau, pierre...) ou symboliques (culture, connaissance, language...). Vygotsky a ainsi étudié la façon dont le language, chez l'enfant, est d'abord utilisé comme un moyen externe de communication avec les adultes, puis intériorisé pour devenir également un outil structurant de la pensée (Vygotsky, 1978, 1981).

Leontiev (1981) est à l'origine d'une extension de cette première version de la théorie de l'activité, intégrant des aspects sociologiques par la prise en compte de la communauté dans laquelle le sujet est inévitablement plongé durant son activité (cf. paragraphe 2.1). La figure 3.3 présente l'extension de la triade initiale à la communauté avec son partage de tâches et ses règles :

- la *communauté* représente le groupe d'individus impliqués dans l'activité, et dont le sujet (individu ou groupe) fait partie [4],
- le *partage des tâches* décrit de quelle façon l'activité est distribuée entre les individus de la communauté, horizontalement (distribution des tâches) et verticalement (hiérarchie et distribution du pouvoir),
- les *règles* sont constituées des normes et des conventions, implicites ou explicites, qui contraignent les actions et les interactions au sein du groupe.

Prescription et activité

La figure 3.4 illustre la proposition de Rabardel (1995), qui modifie la triade de Vygotsky à travers la notion d'*instrument*. Selon son point de vue, considérer l'artefact en tant qu'entité propre dans l'activité, contribue à la

[4] Cette notion renvoie bien évidemment à la notion d'*équipe* telle qu'elle apparaît dans les modèles Team-Mind et ATDM présentés au paragraphe 2.2.

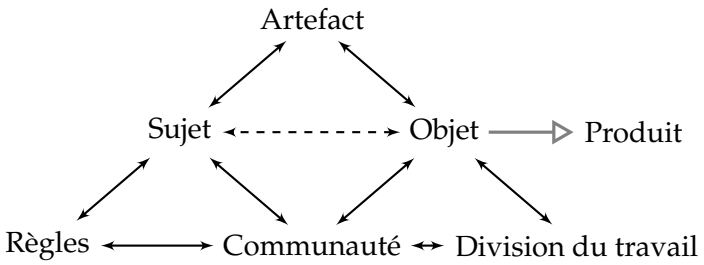

FIG. 3.3 – Aspects sociologiques en théorie de l'activité

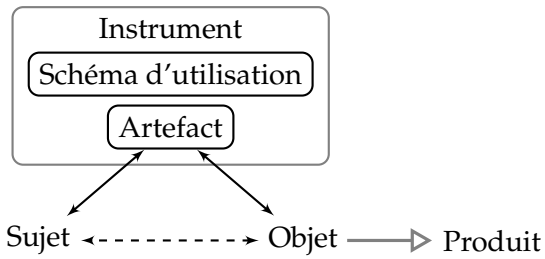

FIG. 3.4 – Concept d'instrument en théorie de l'activité

séparation des trois pôles la constituant. Rabardel propose plutôt de définir un instrument comme étant une entité hybride composée d'un artefact et du *schème d'utilisation* de l'utilisateur, nécessaire à l'aboutissement de l'activité. Cette notion de schème trouve un écho intéressant avec la notion de schéma présentée au paragraphe 1.1.2 pour représenter l'opérationnalisation des connaissances. Ainsi, suivant une approche piagetienne (Piaget, 1987), l'instanciation d'un schéma de connaissances peut être considéré comme la mise en action autour, et à l'aide, d'un artefact, dans une activité donnée (les clés à molette sont ainsi connues pour constituer des marteaux de qualité...), i.e. comme l'expression d'un *schème d'utilisation* dans un contexte particulier d'opérationnalisation.

La notion d'instrument permet également d'illustrer l'opposition classique (Leplat, 1997) entre *prescription* et *activité* : la prescription correspond à la tâche prévue, décrite par un organisateur en fonction des objectifs et de l'organisation du travail de l'individu qui en sera chargé, tandis que l'activité correspond à la réalisation, par cet individu, des actions nécessaires à la réalisation de ces objectifs (Coppin, 2002).

Nous pouvons alors dire que l'artefact ne devient un instrument que dans l'activité, par la transformation qu'un individu fait de la prescription en cette activité. Ou, autrement dit, que l'activité nécessite l'utilisation d'instruments qui dépendent de la compréhension que l'individu a de la

prescription.

Ce lien étroit qu'entretiennent artefact et prescription d'une part, et instrument et activité d'autre part, permet de mettre une nouvelle fois la notion d'expertise au cœur de la réalisation d'une tâche par un individu. En effet, si nous fixons l'environnement de travail, c.-à-d. l'objet et l'artefact, et donnons à un individu une prescription qui traduit la transformation désirée de l'objet, son activité n'est plus modifiée qu'en fonction de son expertise, c.-à-d. en fonction de ses schémas d'utilisation de l'artefact : *l'instrumentalisation de l'artefact est une traduction de l'expertise de l'individu*.

Évolution de l'activité

Telle qu'elle est décrite par la théorie de l'activité, l'évolution de l'activité est une réponse aux tensions pouvant exister en son sein. Ces évolutions ne sont pas courantes puisque les environnements étudiés sont supposés stables, mais ces tensions peuvent néanmoins apparaître, par exemple suite à l'évolution de la prescription ou à une modification d'une composante de l'activité (sujet, objet, règles...). Nous distinguons deux niveaux de tension [5] :

la tension primaire qui provient d'une contradiction au sein d'un élément. Par exemple un sujet, après une blessure, peut éprouver de grandes difficultés à réaliser une tâche qui lui semblait simple auparavant [6] ;

la tension secondaire qui provient d'une contradiction entre différentes composantes de l'activité. Par exemple un artefact (des connaissances...) peut s'avérer inadapté à un objet après la modification de celui-ci (nouvelles maladies en médecine, nouveau système d'exploitation en administration réseau...).

En réaction à ces tensions, une évolution de l'activité, comparable à un cycle de conception, est nécessaire, par l'intermédiaire d'une transformation de l'instrument [7] :

- soit le sujet développe de nouveaux schémas d'utilisation, qui permettent de contourner la tension,
- soit l'artefact est modifié (nouvelle génération).

[5] D'autres niveaux de tension, ternaire et quaternaire, peuvent apparaître, mais ne feront pas sens pour notre cadre applicatif. Nous renvoyons une fois encore le lecteur à Legras (2007) pour de plus amples détails.

[6] Nous penserons, par exemple, au batteur Richard John Cyril Allen qui perdu un bras dans un accident de voiture, ou au célèbre guitariste Django Reinhardt qui perdu l'usage d'une partie de sa main gauche dans l'incendie de sa roulotte.

[7] Les musiciens sus-cités n'ont pas, bien au contraire, arrêté leurs carrières...

La première situation correspond au développement de l'expertise de l'individu, et introduit ce que Rabardel (1997) appelle les *fonctions constituées* de l'instrument, c.-à-d. les fonctions nouvelles, élaborées au cours de l'histoire de l'instrument, tandis que la deuxième situation n'intervient plus que lorsque le développement d'une expertise par l'individu ne suffit pas, et qu'une nouvelle génération de l'artefact doit être pensée. Rabardel (1997) fait alors référence aux *fonctions constituantes* de l'instrument, c.-à-d. les fonctions préalablement définies, intrinsèques, constitutives de l'artefact.

3.3.3 Vers un instrument d'aide aux décideurs

Considérer la décision selon le point de vue de la théorie de l'activité nécessite quelques éclaircissements.

Premièrement, la théorie de l'activité suppose l'existence d'un objet. Dans le cadre de la théorie de la décision, cela signifie, même si cela n'est pas explicitement mentionné, que le processus de décision analysé est à finalité pragmatique (cf. paragraphe 1.1.1). L'activité de décision possède donc un objet qui sera transformé en fonction de la décision (des paramètres d'un processus industriel sont modifiés suite à une décision de contrôle, des actions sont vendues ou achetées en fonction d'une décision sur le marché, etc.)

Deuxièmement, les descriptions proposées par la théorie de l'activité ne sont valides qu'en environnement professionnel stable. Or, nos décideurs sont des experts. Cela signifie que la tâche de décision qui leur est confiée est l'objet habituel de leur activité professionnelle (cf. paragraphe 1.2.1).

Enfin, il nous faut identifier l'artefact qui médiatise l'action du décideur sur l'objet : il s'agit du système informatique, que nous considérerons capable, au minimum, de transformer la décision en l'ordre qui induira la transformation de l'objet.

Néanmoins, comment considérer un système informatique comme un instrument d'aide aux décideurs ?

La réponse nous est fournie par la théorie de l'activité, et passe par l'identification des schémas d'utilisation, propre au décideur et à son activité de décision. Néanmoins, cette réponse est, pour l'instant, d'ordre rhétorique, et elle est donc insuffisante pour l'implémentation d'un système d'aide aux décideurs.

Heureusement, les modèles de décision présentés au paragraphe 1.3 peuvent permettre de caractériser plus précisément ces schémas par la détermination des processus cognitifs impliqués dans ces tâches de décision,

tant au niveau des connaissances manipulées, qu'au niveau des processus de traitement de ces connaissances.

Cependant, nous les considérons insuffisants pour notre approche, notamment au niveau de la modélisation de la décision distribuée. Nous allons, dans le prochain chapitre, détailler cette critique, ainsi que nos propositions de modèles de décision individuel et collectif.

Chapitre 4

Modèles cognitifs pour l'aide aux décideurs

Dans une tâche de décision distribuée, chaque décideur prend en charge une partie des données, c.-à-d. qu'il participe en partie au consensus qui constitue la *décision de l'équipe*, dont il partage alors la responsabilité, et communique avec ses coéquipiers pour échanger des informations et des *décisions intermédiaires*. On suppose pour cela (cf. chapitre 2) :

- que tous les équipiers travaillent sur le même objet,
- que la réunion de leurs compétences est nécessaire à l'accomplissement de la tâche de décision,
- qu'ils coopèrent à un même objectif.

Dans ce chapitre, nous allons présenter nos hypothèses et notre modèle de décision distribuée, adapté au cas d'une équipe d'experts. Notre discours sera construit selon la démarche que nous avons adoptée. Dans un premier temps, nous détaillerons notre constat sur les lacunes des modèles présentés en état de l'art, et les hypothèses que nous avons construites pour y pallier. Ensuite, nous donnerons nos propositions d'évolution des modèles de prise de décision *individuelle* d'un expert *travaillant en équipe*, établi sur les bases de ces modèles, mais tenant également compte de nos nouvelles contraintes. Enfin, nous expliciterons le *modèle d'interaction* qui décrit la coopération entre plusieurs experts au sein d'une équipe.

4.1 Choix, constat et proposition

Le constat que nous effectuons est simple : si certains des modèles que nous avons étudiés jusqu'à présent peuvent mentionner l'existence de mé-

canismes de décision impliquant plusieurs décideurs, aucun ne le décrit. En conséquence, aucun de ces modèles ne nous permet de décrire les activités de gestion de conflits, qui sont pourtant nécessaires au bon fonctionnement d'une équipe.

Avant de donner plus de détails sur ce constat, et d'en tirer des conséquences, nous replacerons la gestion de conflit au sein de la notion de dynamique d'interaction entre décideurs. Ensuite seulement, nous préciserons l'approche que nous avons choisie, nous analyserons notre constat en détail, et présenterons notre hypothèse sur les processus cognitifs engagés dans une tâche de décision. Enfin, nous reprendrons la notion de *règle de décision*, et un modèle d'*activation des règles de décision par ecphorie distinctive*, qui constituera l'élément central de notre modèle de décision.

4.1.1 Dynamiques de la décision distribuée

Le terme de « dynamique » fait ici référence à l'activité d'échange d'informations au cours du temps, que ce soit entre un décideur et son environnement, entre deux décideurs, ou entre différents processus cognitifs d'un décideur. Nous dirons ainsi que le processus global de prise de décision en équipe peut être décrit le long *des dynamiques d'échange d'informations* ayant lieu en son sein.

Nous distinguerons trois niveaux de dynamique :

- la dynamique d'*intériorisation* des perceptions de l'environnement, dont l'évolution au cours du temps modifie les données auxquelles chaque membre de l'équipe a accès ;
- la dynamique *intra-décideur* qui concerne les échanges d'informations au sein du processus mental de chaque décideur, au cours de sa prise de décision individuelle ;
- et la dynamique *inter-décideurs* qui concerne les échanges d'informations entre les décideurs, conséquence des interactions lors de l'établissement du consensus.

Notons que cette approche de la dynamique est parfaitement compatible avec l'approche de *comportementalisme cognitif* que nous avons décrits au paragraphe 1.1. En effet, si nous savons décrire ces dynamiques et les processus de traitement des informations, nous retrouverons la chaîne de traitement « informations–processus de décision–réponse », pour chacun des niveaux proposés, et notre description sera complète.

Malheureusement, les modèles RPD, R/M et l'HBM (cf. paragraphe 1.3) ne décrivent qu'une partie seulement de ces dynamiques. Le modèle RPD

et l'HBM attachent une grande importance à la description de la dynamique intra-décideur, c.-à-d. à la description, plus ou moins formalisée, du processus de décision individuel. Ces deux descriptions indiquent également quand et comment l'individu intériorise son environnement, avec un avantage notable, partagé avec le modèle R/M, pour le modèle RPD qui décrit le mécanisme par lequel le décideur vérifie qu'il est toujours en cohérence avec son environnement. Mais, aucun détail n'est donné sur la dynamique inter-décideurs.

Pourtant, la prise en compte de cette dynamique est critique dans la description de la prise de décision distribuée, d'une part parce que les échanges d'informations entre les décideurs sont cruciaux pour leurs processus individuels de décision, du fait du partage de compétences établi dans l'équipe (cf. chapitre 2). Et d'autre part, parce que ne pas prendre cette dynamique en compte revient à supposer qu'il n'y a jamais de conflit entre les décideurs, et la notion de consensus perd alors son essence. Or, Montgomery et Willén (1999) font eux-même le constat d'avoir sous-estimé, dans la théorie de la recherche de structures de dominance, l'importance des processus de résolution de conflit dans la prise de décision en condition réelle.

Notre problème nous mène donc à la question suivante : comment un individu, au cours de son propre processus de décision, gère-t-il l'arrivée de nouvelles informations, potentiellement conflictuelles ?

4.1.2 Choix et constat

Nous avons choisi de baser notre travail sur l'Heuristique de la Base Mobile, présentée à la paragraphe 1.3.3. Le choix de ce modèle est motivé par ses qualités de formalisation, que nous exploiterons à divers niveaux de notre travail, et par la souplesse de la notion de *stratégie de décision* qu'il sous-tend, et que nous allons adopter. Rappelons que par *stratégie de décision*, nous décrivons le processus par lequel le décideur construit, et reconstruit au besoin, sa représentation mentale de la situation, jusqu'à l'obtention d'une représentation *satisfaisante* lui permettant de décider.

Barthélemy et Mullet (1986) appelle cette représentation une *règle de décision*, en référence au fait qu'une construction de cette nature, si elle est satisfaisante, entraîne toujours la décision. Le processus décrit par l'HBM correspond alors à la *recherche d'une règle de décision*.

Toutefois, l'HBM ne donne que peu de détails sur cette recherche, notamment au niveau de la dynamique inter-décideurs, et de nombreuses questions restent en suspens : comment le décideur choisit-il les attributs

sur lesquels il construit ses représentations mentales ? Sous quelle forme les *règles de décision* sont-elles stockées en mémoire, et comment les représentations interagissent avec elles ? Comment un individu gère-t-il des informations conflictuelles, et comment celles-ci modifient-elles la recherche d'une règle de décision ?

Pour répondre à ces questions, nous proposons d'étendre le modèle de l'HBM à l'aide d'un modèle d'« activation des règles de décision par ecphorie distinctive », à même de décrire le processus par lequel une règle de décision :

- est progressivement activée par ecphorie, depuis la mémoire à long terme (cf. paragraphe 1.1.3),
- et peut être pré-activée ou inhibée par un contexte particulier.

4.1.3 Activation des règles de décision par ecphorie distinctive

Le modèle d'activation des règles de décision que nous proposons est basé sur le processus d'ecphorie synergétique de Tulving (1983) et le modèle Minerva II de Hintzman (1986), tous deux succinctement décrits au paragraphe 1.1.3, et présente également des similitudes avec le modèle ACT*/ACT-R J. R. Anderson (1983, 1996) [1]. La description informelle que nous proposons dans ce paragraphe trouvera son complément formalisé dans le paragraphe 4.2.3.

Règles de décision et mémoire à long terme

Nous proposons, suivant une approche inspirée de la notion de structure de dominance (Montgomery, 1983) et du modèle de mémoire à long terme Minerva II de Hintzman (1986), qu'une règle de décision soit représentée, en mémoire à long terme, sous la forme d'un ensemble d'aspects accompagné de la décision qu'elle provoque. En revanche, bien que le modèle de Hintzman en soit inspiré, nous n'intégrons pas l'hypothèse de Tulving (1983) selon laquelle chaque épisode laisse sa propre trace individuelle en mémoire, préférant emprunter à la notion de schéma de connaissance (cf. paragraphe 1.1.2) l'idée que chaque épisode *participe* à la stabilisation d'une règle de décision en mémoire.

Néanmoins, nous conservons l'idée selon laquelle chaque épisode est encodé de façon spécifique, notamment en fonction de son contexte (cf. le paragraphe 1.1.2 pour une – courte – discussion sur le contexte), avant

[1] Il s'en distingue néanmoins, notamment, par le fait que ACT*/ACT-R repose sur une architecture cognitive différente de celle que nous utilisons, et qui amène à considérer une fonction cognitive comme la somme de ses sous-fonctions.

d'être intégré à la mémoire à long terme. Cette hypothèse se traduit, vis-à-vis de la notion de *règle de décision*, par le fait que chacune des règles abstrait, non seulement les situations autour desquelles elle s'est constituée, mais également leurs contextes.

L'activation d'une règle de décision suppose donc que la situation courante, mais également son contexte soient comparables avec les expériences passées.

Processus d'ecphorie distinctive

Dans notre modèle d'activation par ecphorie, la représentation mentale de la situation constitue alors la sonde, au sens du modèle Minerva II (cf. figure 4.1). Elle est construite en mémoire de travail sous la forme d'un vecteur d'aspects, défini sur des échelles d'attractivité à partir des données de l'environnement décrites par des attributs (cf. Damas, Mille, et Versace (2004) pour une approche similaire). Elle active certains aspects constitutifs des règles de décision du décideur, par « similarité ». Deux précisions sont ici très importantes : d'une part, (i) ces activations respectent la règle de dominance, c.-à-d. que ne sont activés que les éléments des règles de décision *dominés* par l'aspect correspondant dans la représentation mentale de la situation (par exemple dans la figure 4.1, nous supposons que l'aspect d'indice 6 de la règle R_2 n'est pas dominé) ; d'autre part, (ii) ces activations ont lieu de façon simultanée sur toutes les règles de décision, selon un processus en parallèle.

Niveau d'activation

Nous définissons alors le niveau d'activation d'une règle de décision au moyen :

- de son niveau préalable d'activation ou d'inhibition, lié au contexte,
- et du nombre de ses aspects activés, en fonction de la représentation mentale de la situation.

Le premier élément est défini, d'une part, à travers le contexte d'exécution de la tâche, qui influence le décideur en positionnant son avis *a priori*, en fonction par exemple des risques liés à la décision, de la nature de celle-ci, du stress ou de la fatigue de l'individu (cf. la paragraphe 5.1.1 pour une discussion sur ce point, dans le cadre de la patrouille maritime), et, d'autre part, à travers la dynamique inter-décideurs, c.-à-d. la polarisation du décideur en fonction des influences qu'il subit, ou a subi depuis le début du

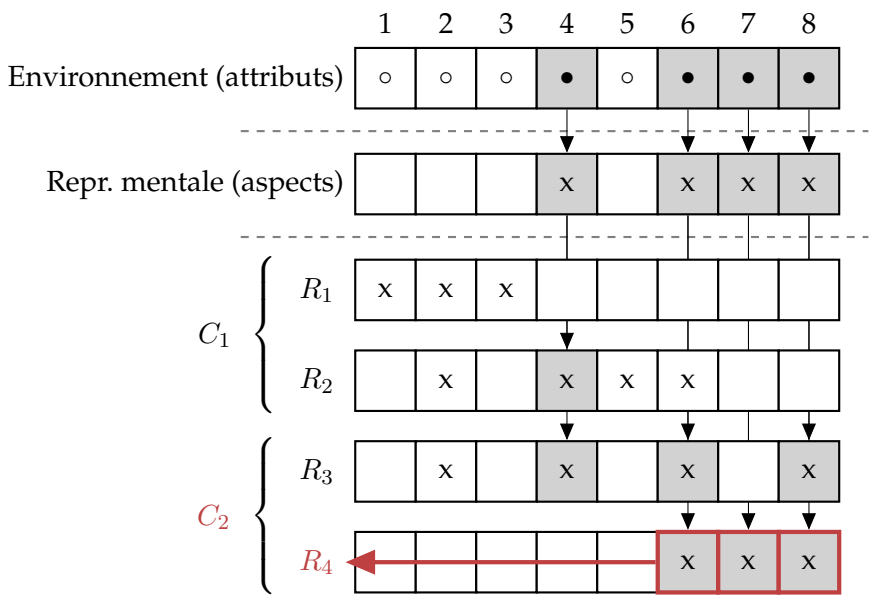

FIG. 4.1 – Exemple d'activation par ecphorie : la représentation mentale active complètement la règle de décision R_4, et entraîne la décision associée, c.-à-d. la catégorie C_2.

processus. Ces deux données sont agrégées durant le processus d'activation en un ensemble de préférences sur les règles de décision, que le décideur devrait pouvoir exprimer hors situation[2] (« Pour cette mission, je sais que telle ou telle décision est totalement inadaptée », ou « Vu ce qu'en disent mes coéquipiers, telle ou telle décision est, d'emblée, préférable. », par exemple). Du point de vue de la dynamique inter-décideur, précisons que cette préférence est *réévaluée à chaque évolution du contexte, et en réponse à toute nouvelle influence*.

Le deuxième point nous permet d'évaluer le niveau d'activation de chaque règle de décision, en fonction de la représentation mentale courante de la situation[3]. Décrit du point de vue des dynamiques d'intériorisation et intra-décideur, cela signifie que le décideur modifie son focus d'attention, soit en réponse à l'évolution de la situation réelle, soit à la recherche d'informations supplémentaires, et que sa représentation mentale évolue de concert. En réponse, les règles de décision sont plus ou moins activées, leurs niveaux d'activation sont modifiés, et les décisions potentielles (les alternatives, selon le vocabulaire de la recherche de règles de décision) évo-

[2]Mais néanmoins en contexte, pour que la définition de notre niveau préalable d'activation soit respectée.

[3]Cette notion est empruntée au modèle Minerva II dans lequel une *intensité* de l'information retrouvée est calculée (cf. paragraphe 1.1.3).

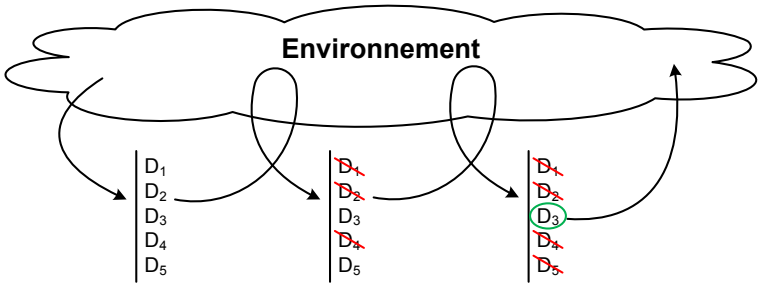

FIG. 4.2 – Élimination « distinctive » des alternatives

luent.

Cette évolution de l'ensemble des alternatives décrit le caractère *distinctif* de notre modèle. Au fur et à mesure des modifications de sa représentation mentale de la situation, le décideur distingue de plus en plus distinctement une décision appropriée, comme un flou qui se dissipe... (cf. figure 4.2).

Enfin, l'information est retrouvée (au sens du modèle Minerva II) sous la forme d'une règle de décision, accompagnée de la décision associée.

Discussion

L'une des caractéristiques importantes des règles de décision est leur incomparabilité, héritée des structures de dominance (cf. paragraphe 1.3.3), qui stipule qu'une, et une seule, règle ne peut être totalement activée (c.-à-d. que tous ses aspects sont activés par la représentation mentale) à un instant donné. Sinon, une situation pourrait mener à deux décisions différentes, et ceci est incompatible avec le niveau d'expertise envisagé pour nos décideurs.

Néanmoins, une activation totale ne constitue plus la seule situation de décision. En effet, le principe de satisfaction proposée par Simon (1957), et utilisé par l'heuristique, peut être étendu pour autoriser les décisions *alors même qu'un doute subsiste*, ce que nous traduirons par une prise de décision s'appuyant sur une règle de décision qui n'est pas totalement activée, mais dont le niveau d'activation dépasse un *seuil de satisfaction* propre au décideur, et défini en fonction du contrôle métacognitif qu'il possède sur son processus de décision.

Le modèle R/M (paragraphe 1.3.1) que nous adopterons sur ce point, propose ainsi trois critères de contrôle métacognitif, qui peuvent être mis en vis-à-vis des principes de l'HBM (cf. paragraphe 1.3.3), en fonction desquels chaque décideur peut modifier son seuil de satisfaction. Ainsi, le seuil

pourra être :

- plus élevé si le *temps disponible* est important, tant que le *principe de parcimonie* est respecté,
- plus élevé si les *enjeux sont importants*, tel que décrit par le *principe de fiabilité*,
- plus faible si la *situation est atypique*, pour permettre la décision dans toutes les situations, comme le décrit le *principe de décidabilité*.

Les contrôles métacognitifs s'effectuant en parallèle des processus de décision (cf. paragraphe 1.2.3), toute évolution de l'un de ces éléments pourra influencer la prise de décision *pendant son déroulement*. Malheureusement, et bien que ces contrôles métacognitifs soient potentiellement cruciaux dans la stratégie de décision d'un décideur expert, ils n'ont pu être étudiés de façon systématique dans ce mémoire. Ainsi, le seuil de satisfaction [4] sera par la suite considéré fixe durant chaque prise de décision.

4.2 Modèle de décision par ecphorie distinctive

Notre modèle s'appuie essentiellement sur le phénomène d'ecphorie distinctive que nous avons proposé dans la section précédente. Notre description sera effectuée en trois étapes : d'abord, nous allons développer le formalisme mathématique, issu de celui de l'HBM, sur lequel nous nous appuierons ; ensuite, nous exprimerons le modèle d'activation des règles de décision par ecphorie distinctive que nous venons de présenter ; et nous finirons par le développement de notre extension de l'HBM.

4.2.1 Espace de représentation

La description que nous proposons s'effectue dans le cadre d'une équipe où plusieurs décideurs partagent un espace multicritère de décision, et y évoluent pour trouver un consensus. Rappelons que cet espace multicritère est décrit par un ensemble d'attributs qui induisent des évaluations (subjectives) chez les décideurs, appelées *aspects* et définies sur des *échelles d'attractivité* (cf. paragraphe 1.3.2). Notons également que la subjectivité de ces échelles peut mener à coder plusieurs fois un même attribut, si plusieurs décideurs sont amenés à l'évaluer.

On note alors :

[4] Notons que nous considérons cet élément de notre modèle comme étant le seul influencé par les fonctions métacognitives. Celles-ci ne feront donc pas partie de la formalisation proposé au paragraphe 4.2.3.

- I l'ensemble des indices des échelles d'attractivité nécessaires à une description complète de la situation : $I = \{1, ..., p\}$ où $p \in \mathbb{N}^+$ est le nombre total d'échelles.
- X l'ensemble des *échelles d'attractivité*, indicés sur I :

$$X = \{X_1, ..., X_i, ..., X_p\}$$

- $D(X_i)$ le domaine de définition de l'échelle d'attractivité d'indice i.

Nous appelons alors *espace de représentation* de la situation, l'espace produit défini sur l'ensemble des échelles d'attractivité. On le note $D(X)$ et il est définit par le produit cartésien suivant :

$$D(X) = \prod_{i \in I} D(X_i)$$

Sous-espace de représentation

Étant donné le caractère distribué de la décision que nous étudions, l'espace de représentation de chaque décideur ne sera défini que sur un sous-espace de $D(X)$. Ce sous-espace sera relié aux échelles d'attractivité du décideur concerné, et sur lesquelles il construit sa *représentation mentale* de la situation.

Plus formellement, pour un décideur A, on note :

- $A \subseteq I$ un sous-ensemble d'indices de I.
- $X_A \subseteq X$ l'ensemble des échelles d'attractivité (indicés sur A) du décideur.

Alors, le *sous-espace de représentation* du décideur est noté $D(X_A)$, et est défini par le produit cartésien suivant :

$$D(X_A) = \prod_{i \in A} D(X_i)$$

Représentation dynamique instantanée

La représentation mentale du décideur évolue dans le temps, en fonction de son environnement, de son focus d'attention et des influences qu'il subit (cf. paragraphe 4.1.3). Cette évolution traduit notamment le fait que le décideur, pour construire sa représentation mentale de la situation à un instant donné, ne mobilise qu'une partie seulement des échelles d'attractivité de son sous-espace de représentation. Dans l'HBM, cela est pris en

compte par la boucle itérative au sein du processus, et dans laquelle une phase de sélection d'attributs est toujours présente.

Formellement, en notant k l'itération du processus en cours, nous noterons :

- $A^{(k)} \subseteq A$ un sous-ensemble d'indices de A.
- $X_A^{(k)} \subseteq X_A$ l'ensemble des échelles d'attractivité (indicés sur $A^{(k)}$) jouant un rôle dans la représentation mentale du décideur. Nous dirons également que $X_A^{(k)}$ est le *support* de la représentation mentale.

Le sous-espace nécessaire à la description de la représentation mentale du décideur pour l'itération k est alors appelé *sous-espace de représentation instantané*. Il est noté $D(X_A^{(k)})$, et défini par le produit cartésien suivant :

$$D(X_A^{(k)}) = \prod_{i \in A^{(k)}} D(X_i)$$

Représentation mentale, règles et stratégies de décision

Pour chaque itération k, la représentation mentale du décideur accepte alors deux expressions : une première naturelle sous la forme d'un vecteur d'aspects $\{a_i^{(k)} | i \in A^{(k)}\} \in D(X_A^{(k)})$, et une deuxième algébrique, proposée par Barthélemy et Mullet (1986), sous la forme d'un *monôme* noté :

$$\prod_{i \in A^{(k)}} X_i^{a_i^{(k)}}$$

où chaque échelle d'attractivité X_i est une inconnue portée à la puissance $a_i^{(k)}$ (Barthélemy & Mullet, 1996 ; Kant, 1996).

De la même façon, une règle de décision R_i, associée à la décision $D_{(R_i)}$, accepte deux expressions : l'une naturelle sous la forme d'un vecteur d'aspects $\{a_i^{(k)} | i, X_i \in X_A^{(R_i)}\}$ où l'ensemble $X_A^{(R_i)}$ des échelles d'attractivité utilisés dans la règle est appelé *support* de la règle, et l'autre sous la forme d'un monôme $M_{(R_i)}$ défini comme précédemment.

Une *stratégie de décision* SD_i peut alors être considéré comme étant la conjonction de toutes les règles menant à une même décision $D_{(SD_i)}$. D'un point de vue ensembliste, nous aurons :

$$SD_i = \{R_i | D_{(R_i)} = D_{(SD_i)}\}$$

et nous pouvons alors définir le *support* $X_A^{(SD_i)}$ d'une stratégie comme étant l'union des supports des règles la constituant :

$$X_A^{(SD_i)} = \bigcup_{\forall R_i, D_{(R_i)} = D_{(SD_i)}} X_A^{(R_i)}$$

D'un point de vue algébrique, nous pouvons exprimer une *stratégie de décision* SD_i sous la forme d'un polynôme :

$$SD_i = \sum_{\forall R_i, D_{(R_i)} = D_{(SD_i)}} M_{(R_i)}$$

dont des exemples d'interprétation sont donnés dans le prochain paragraphe.

4.2.2 Formalisation du processus d'activation par ecphorie distinctive

Reprenons la description du paragraphe 4.1.3, en nous appuyant sur nos notations. L'exemple de la figure 4.1 sera également repris.

À l'initialisation du processus, le seul élément ayant une influence sur le décideur est le contexte d'exécution de la tâche de décision, relié, comme nous l'avons précisé au paragraphe 4.1.3 au niveau préalable d'activation, ou d'inhibition de chaque règle de décision R_i. Formellement, cette quantité sera décrite par un poids $\omega_{R_i}^{(k)}$, modifié par l'évolution du contexte et les interactions avec l'équipe.

Ensuite, à chaque itération k, le décideur construit sa représentation mentale de la situation à partir d'un ensemble $X_A^{(k)}$ d'échelles d'attractivité, indicée sur un ensemble $A^{(k)}$. Dans l'exemple de la figure 4.1, nous avons ainsi :

$$A^{(k)} = \{4, 6, 7, 8\} \text{ et } X_A^{(k)} = \{X_4, X_6, X_7, X_8\}$$

La représentation mentale du décideur peut alors s'écrire :

$$X_4^{a_4^{(k)}} X_6^{a_6^{(k)}} X_7^{a_7^{(k)}} X_8^{a_8^{(k)}}$$

où $\{a_4^{(k)}, a_6^{(k)}, a_7^{(k)}, a_8^{(k)}\} \in D(X_A^{(k)})$ est le vecteur d'aspects codant la représentation mentale du décideur.

Donnons à présent les expressions polynômiales des stratégies de décision SD_1 et SD_2 de la figure 4.1, menant respectivement aux décisions C_1 et C_2 :

$$\begin{aligned} SD_1 &= M_{(R_1)} + M_{(R_2)} \\ &= X_1^{a_1^{(R_1)}} X_2^{a_2^{(R_1)}} X_3^{a_3^{(R_1)}} + X_2^{a_2^{(R_2)}} X_4^{a_4^{(R_2)}} X_5^{a_5^{(R_2)}} X_6^{a_6^{(R_2)}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SD_2 &= M_{(R_3)} + M_{(R_4)} \\ &= X_2^{a_2^{(R_3)}} X_4^{a_4^{(R_3)}} X_6^{a_6^{(R_3)}} X_8^{a_8^{(R_3)}} + X_6^{a_6^{(R_4)}} X_7^{a_7^{(R_4)}} X_8^{a_8^{(R_4)}} \end{aligned}$$

Alors, par exemple, le polynôme définissant la stratégie SD_2 du décideur, ayant pour support $X_A^{(SD_2)} = \{X_2, X_4, X_6, X_7, X_8\}$, traduit le fait que, à chaque fois :

- que la règle de décision R_3 s'applique, c.-à-d. que la représentation mentale contient des valeurs d'au moins :
  - $a_2^{(R_3)}$ sur l'échelle d'attractivité X_2,
  - $a_4^{(R_3)}$ sur X_4,
  - $a_6^{(R_3)}$ sur X_6,
  - $a_8^{(R_3)}$ sur X_8,
  - *et* n'importe quoi ailleurs,
- *ou* que la règle de décision R_4 s'applique, c.-à-d. que la représentation mentale contient des valeurs d'au moins :
  - $a_6^{(R_4)}$ sur l'échelle d'attractivité X_6,
  - $a_7^{(R_4)}$ sur X_7,
  - $a_8^{(R_4)}$ sur X_8,
  - *et* n'importe quoi ailleurs,

alors la stratégie de décision SD_2 permet d'aboutir à la décision C_2.

Cette « lecture » des monômes et polynômes codant les règles et stratégies de décision s'appuie sur l'idée, proposée par l'HBM, que l'activation d'un aspect constituant le monôme d'une règle de décision s'effectue par un test de dominance de cet aspect *par* l'aspect correspondant de la représentation mentale, c.-à-d. sur la même échelle d'attractivité. Ce test se traduit par un test de divisibilité (au sens classique de la division polynômiale) du monôme de la représentation mentale, réduit à l'échelle d'attractivité considérée, par le monôme de la règle de décision, également réduit à cette échelle d'attractivité. Dans notre exemple de la figure 4.1, l'aspect d'indice 8 de la règle R_3 est activé parce que nous avons supposé que $a_8^{(k)} \geq a_8^{(R_3)}$, et nous vérifions donc que $X_8^{a_8^{(R_3)}}$ divise $X_8^{a_8^{(k)}}$, et l'aspect d'indice 6 de la structure R_2 n'est pas activé parce que nous avons supposé que $a_6^{(k)} < a_6^{(R_2)}$, et nous vérifions donc que $X_6^{a_6^{(R_2)}}$ ne divise pas $X_6^{a_6^{(k)}}$.

Nous pouvons également raisonner plus globalement pour effectuer ces tests de dominance. Ainsi, les trois aspects du monôme de la règle de décision R_4 de la figure 4.1 sont activés parce que nous avons supposé que $a_6^{(k)} \geq a_6^{(R_4)}$, $a_7^{(k)} \geq a_7^{(R_4)}$, et $a_8^{(k)} \geq a_8^{(R_4)}$, et ceci se traduit par la divisibilité

du monôme codant la représentation mentale, c.-à-d. $X_4^{a_4^{(k)}} X_6^{a_6^{(k)}} X_7^{a_7^{(k)}} X_8^{a_8^{(k)}}$, par celui codant la règle de décision : $X_6^{a_6^{(R_4)}} X_7^{a_7^{(R_4)}} X_8^{a_8^{(R_4)}}$.

Enfin, en notant $N_{R_i}^{(k)}$ le nombre d'aspects activés de la règle R_i, nous pouvons définir le niveau d'activation $Act_{R_i}^{(k)}$ de cette règle par :

$$Act_{R_i}^{(k)} = \begin{cases} \omega_{R_i}^{(k)} * N_{R_i}^{(k)} & \text{si} \quad N_{R_i}^{(k)} < card(X_A^{(R_i)}) \\ +\infty & \text{si} \quad N_{R_i}^{(k)} = card(X_A^{(R_i)}) \end{cases}$$

Ainsi, le niveau d'activation dépend du contexte (c.-à-d. le contexte de la tâche de décision, et les influences inter-décideurs) à travers le poids $\omega_{R_i}^{(k)}$, et de sa similarité avec la situation en cours à travers la quantité $N_{R_i}^{(k)}$ (cf. paragraphe 4.1.3). De plus, pour représenter le fait qu'une règle de décision totalement activée entraîne systématiquement la décision associée, nous plaçons son niveau d'activation à l'infini (cf. paragraphe 4.1.3).

Nous avons ainsi pu formaliser notre processus d'activation de règles de décision par ecphorie distinctive, à l'aide de l'approche polynômiale proposée par l'HBM, dont nous pouvons dès lors présenter notre extension.

4.2.3 HBM et ecphorie distinctive

Pour la suite, nous supposerons que le *décideur est seul*, et soumis à une tâche de jugement. Cela nous permettra de nous concentrer sur le processus cognitif de décision décrit par la figure 1.5 (page 43), c.-à-d. sur la dynamique intra-décideur. Le cas coopératif, qui nous permettra d'introduire la dynamique inter-décideur dans le modèle, sera présenté dans la paragraphe 4.3.1.

Sélection d'un ensemble d'attributs

Cette étape correspond à la sélection initiale (on ne repassera pas par cette étape ultérieurement) d'un ensemble $A^{(0)}$ d'indices, et donc à la sélection d'un ensemble $X_A^{(0)}$ d'échelles d'attractivité sur lequel le décideur va construire sa première représentation mentale.

Nous considérons ce choix uniquement contraint par les préférences du décideur sur les attributs (cf. l'hypothèse H_1 du paragraphe 1.3.3), codées sous la forme d'un ensemble de poids sur les échelles d'attractivité du décideur : pour chaque itération k, pour chaque échelle d'attractivité X_i, nous noterons $\omega_{X_i}^{(k)}$ son poids.

À l'initialisation du processus, nous considérerons que les préférences du décideur sur les attributs sont données par des connaissances qu'il possède sur leurs saillances relatives, et qui peuvent être extrapolées des supports des règles de décision du décideur. En effet, selon une approche comparable à la notion de traits *définitoires* et *caractéristiques* vue à la paragraphe 1.1.2, nous considérons que plus un attribut, par le biais d'une échelle d'attractivité, est utilisé dans les règles de décision, plus il est probable qu'il soit utilisé dans la sélection d'attributs.

Alors, les poids initiaux sont donnés par :

$$\forall i \in A, \omega_{X_i}^{(0)} = card(\{R_i | X_i \in X_A^{(R_i)}\})$$

La sélection correspond alors au choix des attributs dont les poids sont les plus élevés.

Nous supposons ensuite être au temps k.

Effectuer un jugement

Cette étape du processus correspond à une tentative de recouvrement d'une catégorie pour la situation courante, décrite par la représentation mentale de support $X_A^{(k)}$, suivant le processus d'ecphorie distinctive décrit précédemment.

À la fin de ce processus, le décideur a récupéré, en mémoire de travail, un ensemble $C^{(k)}$ (généralement petit, voire réduit à un singleton) de catégories potentielles C_i, chacune étant liée à une règle de décision R_i, de niveau d'activation $Act_{R_i}^{(k)}$. Toutes les alternatives ne sont néanmoins pas retenus en tant qu'*alternative prometteuse* : il faut pour cela que le niveau d'activation dépasse un seuil $Act_\sigma^{(k)}$, qui code le niveau de satisfaction minimum du décideur, pour l'itération k (cf. paragraphe 4.1.3).

Suivant le modèle RPD, nous considérons également que le décideur a, à chaque itération du processus, une connaissance des stimuli critiques et des expectatives liés à la situation courante, et que ces informations influent sur son processus (cf. la phase de sélection d'un autre ensemble d'attributs).

Pour prendre ces hypothèses en compte, nous considérons que l'ensemble $SC^{(k)} \subseteq X_A^{(k)}$ des échelles d'attractivité considérées comme stimuli critiques est donné par l'intersection des supports des règles de décision liées aux alternatives prometteuses, c.-à-d. dont le niveau d'activation dépasse le seuil $Act_\sigma^{(k)}$. D'un point de vue algébrique :

$$SC^{(k)} = \bigcap_{\forall R_i, Act_{R_i}^{(k)} \geq Act_\sigma^{(k)}} X_A^{(R_i)}$$

L'ensemble $Exp^{(k)} \subseteq X_A^{(k)}$ des expectatives est, quant à lui, donné par le support de la règle de décision de l'alternative la plus prometteuse (c.-à-d. liée à la règle de décision ayant le plus haut niveau d'activation), privé des échelles d'attractivité présentes dans le support de la représentation mentale. Si plusieurs alternatives possèdent le même niveau (maximum) d'activation, l'union de ces supports « tronqués » est réalisée. D'un point de vue algébrique, en notant $Act_{max}^{(k)} = max_{R_i}\{Act_{R_i}^{(k)}\}$ le plus haut niveau d'activation obtenu :

$$Exp^{(k)} = \bigcup_{\forall R_i, Act_{R_i}^{(k)} = Act_{max}^{(k)}} X_A^{(R_i)} \setminus X_A^{(k)}$$

Peut-on décider ?

La décision est possible si l'ensemble des alternatives prometteuses est un singleton. Cette situation est obtenue, soit si une règle de décision est totalement activée (et nous savons qu'il ne peut y en avoir qu'une dans cette situation), soit si une et une seule règle de décision possède un niveau d'activation excédant le seuil. Puisque nous avons choisi de représenter le niveau d'activation d'une structure totalement activée par une valeur infinie, nous dirons simplement que la décision est possible si et seulement si :

$$card(\{R_i | Act_{R_i}^{(k)} \geq Act_{\sigma}^{(k)}\}) = 1$$

Si l'ensemble des catégories prometteuses n'est pas un singleton, ou est vide, la décision est impossible, et le processus continue. Sinon, suivant le principe de satisfaction (cf. paragraphe 1.3.3), le décideur décide, quand bien même il existerait une *meilleure* solution.

Y a-t-il d'autres ensembles de recherche ?

Ce test doit permettre au décideur de déterminer si d'autres structurations du problème sont possibles. Considérer qu'il les énumère toutes est néanmoins en contradiction avec notre approche, notamment en raison des limites de la rationalité limitée. Nous considérons alors que ce test est réduit à celui visant à déterminer si certains attributs n'ont pas encore été exploités. D'un point de vue algébrique, il s'agit de tester l'égalité suivante :

$$\bigcup_{i=0}^{k} X_A^{(k)} = X_A$$

Si ce test échoue, le décideur se retrouve dans une situation de non-décision.

Sélection d'un autre ensemble d'attributs

Si le test précédent l'autorise, une nouvelle sélection d'attributs peut avoir lieu, pour construire une nouvelle représentation mentale, qui servira pour le jugement à l'itération $k+1$.

Comme la sélection initiale, cette sélection s'appuie sur les poids d'attributs. Ceux-ci sont donc préalablement actualisés en fonction du résultat du jugement à l'étape k, c.-à-d. en fonction :

1. de l'ensemble des niveaux d'activation $Act_{R_i}^{(k)}$ des règles de décision R_i associées aux alternatives prometteuses ;
2. des stimuli critiques $SC^{(k)}$ et des expectatives $Exp^{(k)}$ liés à la situation de l'itération k.

Ainsi, pour chaque attribut X_i, l'influence de chaque stimuli critique $X_i \in SC^{(k)}$ est donnée par [5] :

$$\omega_{X_i}^{(k+1)} = \omega_{X_i}^{(k)} + card(\{R_j | X_i \in X_A^{(R_j)}\})$$

Et l'influence de chaque expectative $X_i \in Exp^{(k)}$ est donnée par :

$$\omega_{X_i}^{(k+1)} = \omega_{X_i}^{(k)} + \sum_{\forall R_j, X_i \in X_A^{(R_j)}} Act_{R_j}^{(k)}$$

4.3 Modèle d'interaction

Nous nous sommes pour l'instant limité au développement d'un modèle de décision individuel, et à la prise en compte des dynamiques d'intériorisation et intra-décideur. L'objectif de cette section est l'obtention d'un modèle prenant également en compte la dynamique inter-décideurs, propre à décrire les comportements des experts lors d'une prise de décision en équipe.

Les décideurs experts de l'équipe sont en interaction. Ces interactions s'effectuent dans le cadre de rapports humains tels que la hiérarchie, la confiance ou l'amitié, que nous voulons traduire sous la forme d'influences sur les processus cognitifs des décideurs. Nous introduisons pour cela un *modèle d'interaction* construit autour, d'une part d'un modèle relationnel qui

[5] On pourra remarquer la similitude de ces équations avec celles régissant de nombreux réseaux de neurones (Bennani, 2006), et de façon plus globale, noter la résonance que notre approche trouve dans ces théories. Le lecteur pourra d'ailleurs consulter le travail de Kant (1996) sur ce sujet.

décrit les liens existants entre les décideurs de l'équipe, d'autre part de l'ensemble des influences possibles entre décideurs, chaque influence étant décrite par l'information la provoquant et par l'effet obtenu sur le processus cognitif. Après avoir présenté ces deux éléments, nous donnerons les expressions formelles des influences sur le processus décrit par l'HBM.

Notons que la modélisation que nous proposons ne présente aucun caractère exhaustif du point de vue des rapports humains étudiés. L'objectif de cette section est de définir une approche méthodologique permettant, au cas par cas, de traduire ces rapports humains en des influences quantifiables sur le processus cognitif des décideurs. Nous ne prendrons donc ici que l'exemple d'un lien de confiance/méfiance, et montrerons les implications de cette relation sur les interactions en termes d'échanges et de traitement de l'information.

4.3.1 Modèle relationnel

Notre modèle relationnel s'appuie sur la notion de réseau social, et prend ainsi naturellement la forme d'un graphe dont les nœuds sont les acteurs du réseau, et dont chaque arc traduit le lien entre deux individus (Degenne & Forsé, 1994). Cet arc porte deux informations : tout d'abord, son existence signifie celle d'un lien entre les deux individus, ensuite, ce lien doit permettre de « quantifier » la relation codée. Pour que le réseau social que nous dessinons reste lisible, nous serons amener à le dupliquer pour chaque type de relation que nous souhaitons prendre en compte entre nos acteurs.

Dans notre exemple du lien de confiance/méfiance, nous imaginons une équipe de trois décideurs A, B et C, dont les niveaux de confiance $\alpha_{I,J}$ (où I et J sont deux décideurs) sont compris entre -1 pour représenter la méfiance et 1 pour une confiance « aveugle », et sont donnés par la figure 4.3. Par exemple, le décideur C a un niveau de confiance $\alpha_{C,A}$ de 0.9 envers A, et une légère méfiance $\alpha_{C,B}$ de 0.2 envers B.

Une remarque importante concerne l'évolution des relations au cours du temps. De la même façon que nous avons émis l'hypothèse, en travaillant avec des décideurs experts, que leurs stratégies de décision (c.-à-d. les règles de décision) sont stables dans le temps, nous considérons que les réseaux d'interaction que nous modélisons sont stables dans le temps.

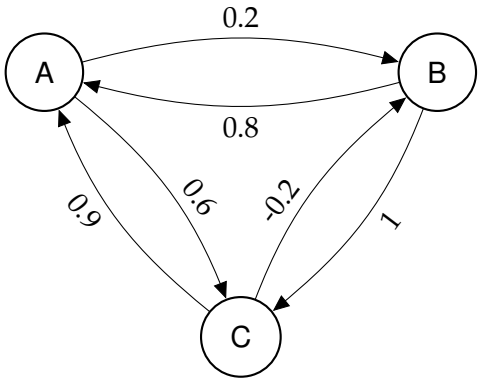

FIG. 4.3 – Un réseau de confiance

4.3.2 Natures des influences

Le paragraphe précédent nous a donné un outil pour représenter les liens qui peuvent exister entre les décideurs. Il nous faut à présent décrire, d'un point de vue informationnel, quelles sont les causes possibles d'une influence d'un acteur sur un autre, et quelles sont les conséquences sur ses processus cognitifs.

Causes et natures des influences

Nous distinguons deux causes possibles d'influence d'un décideur sur un autre, que nous appellerons A :

- premièrement, les décisions individuelles, intermédiaires du point de vue de l'établissement du consensus de l'équipe, peuvent (et doivent) être échangées. Par exemple, nous pouvons imaginer que l'ensemble des règles de décision de A soit modifié, pour assurer une compatibilité entre sa décision éventuelle et celles qui ont déjà été exprimées.
- deuxièmement, des informations concernant les échelles d'attractivité et les aspects des règles de décision ou des représentations mentales des décideurs peuvent être extraites et transmises (cf. paragraphe 7.2). Suivant le même raisonnement que précédemment, nous pouvons imaginer que notre décideur A modifie son focus attentionnel, pour assurer que ses observations soient compatibles avec les autres.

Ainsi, la prise en compte des informations manipulées par les autres décideurs peut conduire notre décideur A à modifier ses stratégies de décision. Nous considérerons deux effets majeurs :

- ses règles de décision peuvent être pré-activées, ou au contraire partiellement inhibées, en réponse aux influences qu'il subit. La pré-activation d'une règle de décision dénotera de la volonté du décideur A de rester en cohérence avec ses co-équipiers, tandis que l'inhibition traduira un désir de se différencier.
- Ses préférences sur les attributs, c.-à-d. son focus d'attention, peuvent également être modifiées pour chercher une cohérence ou une différence avec ses co-équipiers.

Retour sur les phénomènes de groupe

À présent capable d'analyser et de prédire les effets de la dynamique inter-décideurs sur le processus de décision de chaque décideur, nous souhaitons donner une nouvelle interprétation des phénomènes de groupe, présentés au paragraphe 2.3, s'appuyant sur les influences inter-décideurs que nous venons de décrire.

Ainsi :

- l'effet de *polarisation* d'un décideur envers l'un de ses coéquipiers s'interprète comme la recherche d'une cohérence, de sa part, vis-à-vis de la décision de l'autre, c.-à-d. par une pré-activation de ses règles de décision lui permettant d'aboutir à une décision identique (ou du moins proche) à celle de son coéquipier. Dans l'exemple du réseau de confiance, on peut s'attendre à une polarisation de B par A du fait de la grande confiance ($\alpha_{B,A} = 0.8$) qu'il a en lui. Cet effet se généralise sans peine à des influences entre plus de 2 décideurs, en imaginant que la polarisation se « propage » le long du réseau d'influence.
- le phénomène de *minorité active* traduit un *noyau* dans le réseau d'influences. Ce noyau est constitué de décideurs dont les influences mutuelles, et avec les autres membres de l'équipe, les mènent, d'une part, à une polarisation interne au noyau, et, d'autre part, au rejet des autres décideurs par un effet opposé à celui de polarisation (inhibition). Dans l'exemple du réseau de confiance, on peut ainsi s'attendre à ce que les décideurs A et C forment un groupe soudé par la confiance, et rejette B pour qui ils n'ont pas ou de peu de confiance [6].

Dans un discours plus global, il apparaît que la coopération entre plusieurs décideurs peut facilement être décrite et exploitée (cf. paragraphe 7.2) à l'aide de notre modèle. Nous proposons donc maintenant naturellement

[6] Notre réseau d'exemple ne permet pas, ici, à proprement parler de construire de minorités actives puisqu'il faudrait au moins cinq décideurs pour qu'un noyau de deux individus constitue une minorité... Néanmoins, la démonstration est valide tant que le noyau existe et que les autres décideurs n'affichent pas entre eux de comportements similaires.

une formalisation de ses influences, dans le cadre de notre extension de l'HBM.

4.3.3 Formalisation des influences d'interaction

Nous supposons être à l'itération k du processus de décision.

Les influences que nous avons exposées impliquent des modifications sur les poids d'attributs et de règles de décision. Ces modifications, du point de vue algorithmique, s'effectue de façon asynchrone avec le processus de décision. Cela signifie que les mises à jour des poids entraînées par les interactions entre décideurs peuvent intervenir à n'importe quelle étape du processus de décision, et que celui-ci s'en trouve immédiatement modifié.

Reprenons l'exemple de la figure 4.3, dans lequel nous souhaitons quantifier les influences subies par C. Le premier cas de figure est celui où le système identifie les ensembles $X_A^{(k)}$ et $X_B^{(k)}$ qui représentent les échelles d'attractivité utilisées respectivement par A et B. Alors, l'information transmise à C concernera un ensemble d'attributs actuellement en cours d'utilisation par ses co-équipiers dans leurs processus de décision. Pour chacun des attributs concernés que C est en mesure d'utiliser, c.-à-d. pour tout X_i dans $(X_A^{(k)} \cup X_B^{(k)}) \cap X_C$, une modification du poids intervient selon l'expression :

$$\omega_{X_i}^{(k)} = \omega_{X_i}^{(k)} + \alpha_{C,\cdot} * inc_X$$

où la quantité $\alpha_{C,\cdot}$ est le niveau de confiance de C envers chaque coéquipier qui l'influence (donc $\alpha_{C,\cdot} = \alpha_{C,A}$ puis $\alpha_{C,\cdot} = \alpha_{C,B}$ dans notre cas), et inc_X représente un facteur d'incrément des poids d'attribut, traduisant l'amplitude de l'influence que C peut subir sur ces poids. Si cet incrément est élevé, le décideur sera très influençable, sinon, il sera considéré comme têtu.

Le deuxième cas de figure, est celui où A et B expriment chacun une décision, et où les règles de décision de C s'en trouvent pré-activées ou inhibées. Dans cette situation, deux informations parviennent à C : la décision de chacun de ses co-équipiers, et les supports de leurs règles de décision (connues du système, cf. paragraphe 7.3.1). Il transforme alors chaque information de type décision en une information sur la règle de décision qu'il lui associe, et chaque information sur les supports de règles de décision en information sur les attributs utilisés par ses coéquipiers. Il modifie alors les poids des attributs concernés de la même façon que précédemment, et le poids de chaque règle de décision R_i concernée selon l'expression suivante :

$$\omega_{R_i}^{(k)} = \omega_{R_i}^{(k)} + \alpha_{C,\cdot} * inc_R$$

où la quantité inc_R représente le facteur d'incrément des poids de règle de décision.

Ainsi, par exemple, si A transmet une décision à C, comme la quantité $\alpha_{C,A}$ est positive, sa règle de décision correspondante sera pré-activée. Tandis qu'une décision de B, puisque $\alpha_{C,B}$ est négative, provoquera une inhibition de sa règle de décision correspondante.

Troisième partie

Patrouille maritime : simulations de décisions distribuées et résultats

Chapitre 5

La patrouille maritime

Notre approche des systèmes d'aide aux décideurs peut trouver de nombreuses applications, dans les domaines bancaire ou médical par exemple, mais il est un domaine particulier, dont les caractéristiques en font un cadre d'application privilégié : l'aviation de patrouille maritime. Ce chapitre a pour vocation d'en faire une présentation [1], sinon exhaustive, permettant au moins de le mettre en regard des éléments présentés dans les parties précédentes, et d'introduire une problématique précise, que nous exploiterons dans la suite du document.

Après une présentation d'ordre général de la patrouille maritime, nous nous attarderons sur la description de l'une de ces tâches, l'identification de la nature d'objets en mer, et la relierons à notre problématique de décision distribuée.

5.1 Généralités

Le domaine maritime est le théâtre d'enjeux stratégiques majeurs. C'est le passage obligé de la plus grosse partie des échanges commerciaux à travers le globe, et son libre accès et l'immensité de son étendue en font un lieu difficile à contrôler.

La sauvegarde des intérêts économiques d'une nation à vocation maritime, et la libre circulation de ses navires dépendent en grande partie de son aptitude à contrôler les mers et les océans. L'aviation de patrouille maritime a dès lors été développée pour en assurer la surveillance, et répondre aux menaces de belligérants évoluant dans cet espace complexe, englobant

[1] Inspirée du document de Yvon (2003)

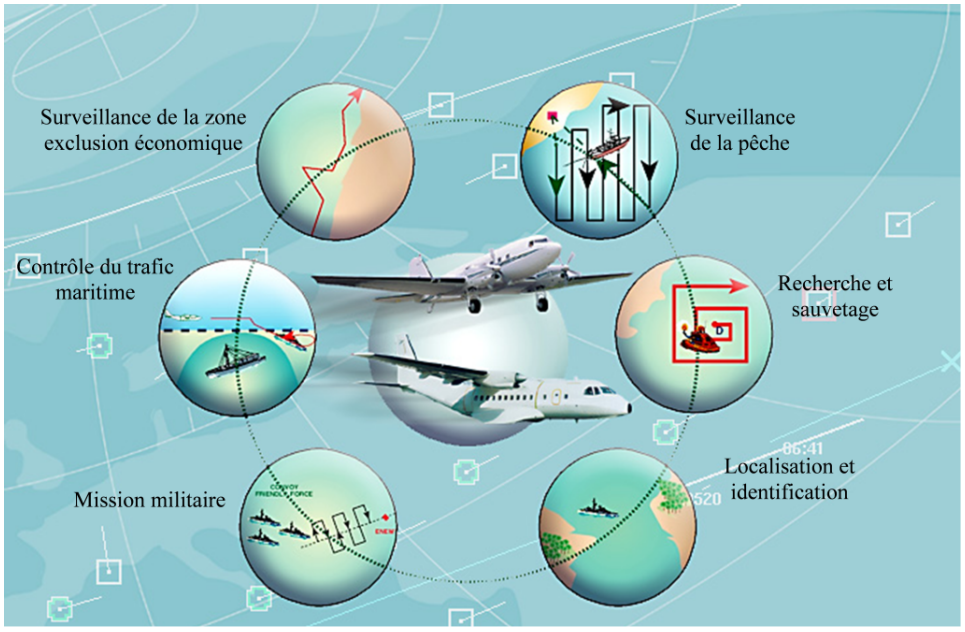

FIG. 5.1 – Les missions de la patrouille maritime

les trois milieux (aérien, marin et sous-marin) soumis aux perturbations climatiques et à la dynamique océanique.

Pour réaliser cette surveillance, chaque avion est équipé d'un ensemble de capteurs, permettant d'observer l'environnement, et, notamment, les acteurs de la zone dite « tactique » sur laquelle l'avion doit apporter le contrôle. Ces capteurs sont choisis pour leur complémentarité, et l'ensemble ainsi constitué est exploité par un équipage, dit « tactique », d'opérateurs en charge des missions confiées à la patrouille maritime. Celles-ci comprennent des missions de surveillance et de contrôle à caractère *civil* (surveillance maritime), ainsi que des missions de défense à caractère *militaire* (cf. figure 5.1).

5.1.1 Les missions

Les missions peuvent avoir une connotation civile ou militaire, et chacune d'elles est déclinée en plusieurs missions secondaires bien précises, en fonction de la nature des interventions. L'exécution de la mission, et de ses missions secondaires, forme ce que l'on a coutume d'appeler un *scénario*, et comprend :

- une phase préparatoire où les objectifs de la mission sont données, et où le plan de vol sur la zone de surveillance est décidé,

- une phase de décollage et d'approche de la zone de surveillance,
- un travail *sur zone*, pour lequel le plan de vol est dynamiquement adapté à la situation,
- une phase de retour, d'atterrissage et de debriefing de la mission.

Nous nous concentrons, dans ce mémoire, sur la phase *sur zone*.

Dans le domaine civil

Les missions principales sont le secours des personnes, la surveillance des zones de souveraineté, la surveillance des rails de navigation commerciale, la lutte contre les trafics et la lutte anti-pollution :

- les missions de secours : leur but est de *localiser* les personnes en détresse, pour leur apporter secours et assistance.
- La surveillance des zones économiques exclusives et des eaux territoriales : elle comprend la surveillance des pêches, le contrôle des zones contenant des matières premières (pétrole, minerais...), la surveillance des approches maritimes, la détection des pollutions. Le but, *sur zone*, est de *détecter*, de *localiser* et d'*identifier* tous les navires présents sur zone, pour, selon la mission, *contrôler* le comportement des navires (pêche illicite, trafic de drogue, dégazage en mer...).

Dans le domaine militaire

Les deux domaines des missions de défense sont la lutte anti-sous-marine et la lutte anti-surface (ou lutte anti-navire), réalisées soit de manière autonome, soit en coopération (cf. figure 5.2).

Ces missions pouvant aller jusqu'à l'engagement d'une arme, les risques de méprise ne sont pas tolérés, et les contraintes de ces missions sont celles qui dimensionnement les aptitudes du système aéroporté (notamment au niveau des capteurs embarqués).

Pour ces missions, la phase *sur zone* se décomposent en trois sous-phases :

- la *recherche* et l'*identification* de contacts,
- la tenue de contact, i.e. son *suivi* cinématique et la détection de comportement suspect,
- et l'action anti-surface ou anti-sous-marine (pistage serré...).

FIG. 5.2 – Les missions militaires de la patrouille maritime

5.1.2 Contexte des missions militaires

Avec la disparition de la confrontation est/ouest, et la recrudescence de conflits régionaux, les zones de conflits potentiels se sont déplacées, et sont maintenant localisées dans les eaux peu profondes du littoral. Les menaces associées sont composées de sous-marins classiques et de bâtiments de surface de taille réduite (corvettes, vedettes de patrouille rapides).

L'environnement de tels scénarios est caractérisé par une forte densité d'émissions électromagnétiques, des conditions de propagation électromagnétique et acoustique complexes et la présence d'une double menace aérienne et côtière. Dans ce genre de conflits, les opérations maritimes impliquent conjointement des forces navales, des forces aériennes et éventuellement terrestres de différents pays. Par conséquent, l'avion de patrouille maritime doit être capable de s'intégrer au sein d'une force inter-armées et inter-alliées, et dans le but de transmettre et de recevoir des informations provenant de différentes plates-formes.

Le contexte de ces décisions est ainsi souvent caractérisé par des conditions d'*incertitude*, de *temps limité* ou par le fait que le coût des erreurs de décision n'est pas symétrique [2]. Par exemple, dans le cas militaire, identifier un navire ami comme un ennemi déclenche ce que l'on appelle désormais classiquement un « tir ami ». L'erreur opposée n'a pas le même coût. De même dans le cas de sauvetage en mer, ne pas identifier qu'un navire est

[2]Skrzyniarz (2003) utilise ainsi une modélisation des coûts par une matrice de risque non symétrique (cf. paragraphe 6.1).

en perdition ne déclenche pas l'opération de secours, alors même que des personnes sont en danger. L'erreur opposée, encore une fois, n'a pas les mêmes conséquences.

Cela provoque chez les opérateurs, conscients des conséquences éventuelles de leurs décisions, un niveau de stress important. Par ailleurs, les missions de surveillance peuvent être longue (jusqu'à 16 heures) et la fatigue peut devenir une source importante d'erreurs aux conséquences dramatiques, particulièrement si une surcharge cognitive survient. Un incident célèbre dans un contexte similaire illustre, par exemple, ces diverses situations : la destruction d'un avion civile par le navire USS Vincennes de la marine nord-américaine (Klein, 1998, chap.6), que nous avons traité sous divers angles dans ce mémoire (cf. paragraphes 2.2.3, 2.3.3 et 7.1), et dont le récit complet est donné en annexe A. D'autres exemples, tel que la percussion en plein vol de deux avions civils, peuvent être trouvés dans l'ouvrage d'Otelli (2003).

5.1.3 Les équipages

Les équipages en charge des missions de la patrouille maritime sont constitués d'opérateurs experts aux compétences diverses, et complémentaires. Chacun possède une vue différente sur son environnement par le biais d'instruments spécialisés (capteurs), qui déterminent la nature de son expertise. La complémentarité de ces points de vue se justifie notamment par l'impossibilité pour un opérateur seul de manipuler tous les capteurs et de traiter les données nécessaires en un temps raisonnable, et par le degré d'expertise requis pour tous ces équipements, qu'un individu seul ne pourrait développer.

Les opérateurs constituant ces équipages *tactiques* sont donc distingués selon leurs compétences :

- les *opérateurs capteurs* sont en charge de l'acquisition et du traitement des données issues de leurs équipements respectifs :
    - détection d'anomalie magnétique - ESM[3] : le détecteur de radars analyse les émissions radio-électriques et établit la situation électromagnétique de zone. Il permet de déterminer le type d'équipement radio-électrique à bord des différentes cibles ainsi que leur mode de fonctionnement, et, dans une certaine mesure, de surveiller les intentions des navires (détection d'un radar de conduite de tir accroché sur l'avion par exemple).

[3]Electronic Support Measure

- imagerie radar - ISAR[4]/FLIR[5] :
  - les images ISAR permettent de caractériser les cibles par la distribution du coefficient de rétro-diffusion. Cette distribution est caractérisée par le SER[6] des cibles et la position des points brillants. L'écho radar ainsi obtenu est néanmoins fonction de l'orientation de la cible. Il peut fournir une carte radar de la situation de surface, i.e. de l'ensemble des navires de surface, en faible résolution, ou une mesure de la SER et de la longueur de la cible. Il permet également à l'opérateur d'estimer le profil géométrique du navire.
  - le FLIR délivre une image infra rouge de la cible. Cette image peut être exploitée par l'opérateur. Les paramètres extraits de l'image sont la longueur et la position des superstructures. De la position de la tourelle et de l'altitude du porteur, on déduit l'azimut et la distance de la cible. Le FLIR permet également de localiser les points chauds comme par exemple une cheminée, il peut posséder également une fonction de pistage.
- analyse acoustique - SONAR[7] : le système acoustique est destiné à repérer les sous-marins et à les traquer. L'opérateur utilise pour cela des bouées acoustiques actives ou passives, qui sont larguées par l'avion en mer, et qui transmettent les sons qu'elles détectent.

- et le *chef d'équipage*, le coordinateur tactique - TACCO[8], gère la situation tactique (i.e. la vue globale de l'ensemble des navires de surface sous surveillance) et les armements, prend les décisions finales de classification des contacts, de déroutement de l'aéronef vers un bâtiment ou des demandes d'informations capteurs à ses opérateurs

Ils embarquent à bord d'avions tels que l'Atlantique2, le P-3 ou encore le Casa 235, et *coopèrent* dans leurs tâches. Celles-ci sont dictées par un ordre de mission, et dépendent donc de la nature de cette dernière (cf. paragraphe 5.1.1) : détecter, localiser, identifier et suivre les contacts sont, au choix, nécessaires. Parmi ces tâches, l'identification nous apparaît comme une *pièce maîtresse*, centrale à presque toutes les missions. Alors que les trois autres peuvent être largement automatisées, et qu'elles font donc appel à des compétences moins expertes, la tâche d'identification constitue une ac-

[4]Inverse Synthetic Aperture Radar
[5]Forward Looking Infrared Radar
[6]Surface Équivalente Radar
[7]Sound Navigation And Ranging
[8]Tactical Coordinator

Niveau	Informations fournies
1 : Catégorie	Air, surface ou sous-marin
2 : Appartenance	Combattant ou Non-combattant
3 : Type	Type de navire (croiseur, frégate, porteur, voilier...)
4 : Classe	Modèle (Lafayette...)
5 : Classification	Identité (nom, numéro d'enregistrement, pavillon...)

TAB. 5.1 – Niveaux de classification OTAN

tivité complexe, cruciale dans le processus de prise de décision des actions à mener (cf. paragraphe 1.1.3, et Zsambok et Klein (1997)).

5.2 Tâche de décision distribuée

Un des rôles essentiels des opérateurs lors d'une mission est donc d'*identifier* toutes les plate-formes (appelées pistes) en présence. Cette identification consiste en la *classification* chaque *contact* (écho radar, signal acoustique...), dans le but de déterminer sa nature, son appartenance (ami, ennemi ou neutre), sa classe (frégate, etc.), à des niveaux d'identification dépendant du type de la mission, et standardisés par des normes OTAN (cf. tableau 5.1).

5.2.1 Nature des données

Une identification se base sur un ensemble d'informations recueillies à l'aide des capteurs. Ses informations nécessitent alors des traitements, avant d'être interprétées et échangées par les opérateurs. L'exploitation des données capteurs se heurtent toutefois à deux difficultés : elles sont généralement incomplètes et imprécises.

L'*incomplétude* des descriptions utilisées par les opérateur est causée par le fait que chaque opérateur n'a qu'une vue partielle de son environnement, d'une part, (i) à cause de la spécialisation des équipements qu'il manipule, et d'autre part, (ii) du fait des conditions d'observation qui peuvent être peu favorables et entraîner des problèmes de visibilité. De plus, certains équipements ne sont parfois, simplement, pas pertinents (l'imagerie radar est souvent inutile dans la détection anti-sous-marine).

Les conditions d'observation peuvent par ailleurs être une cause importante de l'*imprécision* des données. Outre le fait que les capteurs transforment les informations qu'ils perçoivent, et limitent donc leurs qualités à celles de leurs processus de transformation (filtrage, transformées...), l'environnement peut être la source de *bruits* (pluie, houle, environnement élec-

tromagnétique...) qui se répercute sur la qualité des informations disponibles pour les opérateurs.

5.2.2 Processus de décision distribuée

La nature variée, et la difficulté d'exploitation, des données nécessaires à une identification constitue la raison principale pour laquelle le travail d'identification est confié à une équipe, plutôt qu'à un opérateur seul. Ce processus est alors distribué. De plus, il constitue un cas particulier de décision.

Processus *distribué*

La distribution du processus d'identification en patrouille maritime est essentiellement fonctionnel (cf. paragraphe 2.1.3), et définit plusieurs rôles au sein de l'équipe :

- ceux directement liés à l'exploitation des capteurs : acquisition et traitement des données,
- création de la situation tactique : l'opérateur radariste crée, via ses équipements, les *pistes* à partir des *échos radar* qui lui sont donnés par l'ISAR en mode PPI [9] (balayage circulaire),
- gestion de la situation tactique : le TACCO a la charge du choix des pistes à traiter, et des équipements qui seront impliqués. Il peut également être amené à modifier le plan de vol (normalement fixé avant décollage) en fonction des besoin de la mission.

Ainsi, le *scénario* typique d'une patrouille, sur zone :

1. l'opérateur en charge de l'ISAR crée des pistes,
2. le TACCO demande aux opérateurs des renseignements sur une piste qu'il souhaite identifier,
3. les opérateurs fournissent ces informations et peuvent éventuellement proposer des identifications, exprimées avec un niveau de certitude,
4. si certaines identifications intermédiaires entrent en *conflit* avec ses propres alternatives, un opérateur peut tout de suite tenter de les modifier, ou, au moins, informer les autres en leur signifiant la difficulté,
5. le TACCO centralise ses informations et :

[9] Plan Position Indicator

- propose une identification par la synthèse des identifications intermédiaires et l'établissement d'un consensus, puis choisit, s'il en reste, une nouvelle piste à identifier (retour à l'étape 2),
- ou demande de nouvelles informations, ou des vérifications, parce que des conflits ou des *ambigüités* empêchent le consensus (retour à l'étape 3).

L'étape 4 correspond à une étape essentielle de gestion et de résolution de conflits au niveau des opérateurs. Ce phénomène apparaît, par exemple, lors de *conflits de mesure forts* (Skrzyniarz, 2003), qui suppose que les mesures de plusieurs opérateurs sur un même attribut sont totalement différentes (intervalles de mesures disjoints [10]), ou lors d'identifications contradictoires. Le TACCO gère également ce type de conflits lors de la construction du consensus, ainsi que les *conflits de mesure faibles* (Skrzyniarz, 2003), qui ne traduit généralement que des imprécisions de mesure (intervalles de mesures différents, mais non disjoints).

Nous disions en introduction de ce chapitre que la patrouille maritime constitue un cadre d'application privilégié de notre approche des systèmes aux décideurs. Toutefois, cela nécessite de considérer la tâche d'identification de ces opérateurs en tant qu'activité distribuée de *décision*.

Processus de *décision* distribuée

Comme nous l'avons précisé, l'identification d'une piste consiste en son étiquetage selon une classification (normes OTAN) commune à tous les opérateurs. Cette opération est donc une activité de *catégorisation*, également appelé *jugement* en théorie de la décision (cf. paragraphe 1.1.3).

De plus, les opérateurs peuvent proposer leurs propres identifications (autonomie), confrontent leurs avis à propos de chaque contact à identifier, et *coopèrent* pour obtenir l'identification la plus juste possible. La gestion de *conflits* (étape 4 du processus précédent) est ainsi au centre des interactions pour la construction du consensus.

Enfin, il est courant que les opérateurs ne puissent pas finaliser seuls les identifications, du fait notamment de la spécialisation de leurs instruments qui ne leur donne qu'une vue très limitée sur leur environnement. Ils sont donc dépendants les uns des autres dans leur activité.

[10] Bien que les mesures soient exprimées sous la forme d'une donnée numérique unique, les opérateurs capteurs connaissent l'imprécision de leurs instruments, qui s'exprime en pourcentage autour de cette valeur. La mesure peut ainsi être considérée comme un intervalle de valeurs centré sur la mesure la plus probable.

Ainsi, les caractéristiques de l'activité d'identification de pistes (cf. paragraphe 2.1) en font une activité de décision distribuée, telle que nous l'avons définie, dont la finalité est la classification de la piste. Notons que les exigences sur celle-ci peuvent être importantes, si l'ordre de mission le requiert. Certaines identifications nécessitent ainsi le nom exact du navire, pour récupérer toutes sortes d'informations, par l'intermédiaire de bases de données (tonnage, port d'attache, nom du capitaine...).

Une bonne coopération entre les agents humains et logiciels, en répartissant les tâches convenablement entre eux, et en limitant les situations de surcharge cognitive, peut également permettre de mieux traiter les informations indispensables. Certaines sous-tâches nécessaires à l'identification peuvent, par exemple, être totalement automatisées (création et suivi de piste, interrogation de base de données...), tandis que d'autres pourront être mieux accompagnées lors du processus de décision, par exemple par un système d'aide aux décideurs. La répartition et la planification de tâches ont été particulièrement étudiés dans le contrôle aérien ((Vanderhaegen, Crevits, Debernard, & Millot, 1994) et (Crevits, 1996)). L'assistance aux opérateurs dans la patrouille maritime doit ainsi permettre d'améliorer la qualité des décisions prises par l'équipage.

5.2.3 Retour sur la théorie de l'activité

Cette description nous permet de situer l'activité d'identification de pistes dans le cadre de la théorie de l'activité (cf. le paragraphe 3.3.2 et la figure 3.3) :

Sujet : Le sujet de l'activité est l'équipage de patrouille maritime, constitué des opérateurs capteurs et du TACCO.

Artefact : L'artefact est le système d'information embarqué à bord de l'avion. Un prototype de ce type de système, appelé AMASCOS [11], nous a été accessible au sein du laboratoire ATOL [12], intégré au sein de l'ENST de Bretagne, et construit en partenariat avec la société THALES, propriétaire de ce démonstrateur.

Objets : Les objets sont les pistes radar à identifier. Nous considérons alors, implicitement, que le processus de création de ces pistes ne fait pas partie de l'activité d'identification.

Communauté : Il s'agit de l'équipage tactique, c.-à-d. les opérateurs capteurs et le chef d'équipage.

[11] Airborne Maritime Surveillance Cooperative System
[12] Aeronautics Technico-Operational Laboratory

Règles : Les règles sont constituées d'un ensemble de procédures d'identification, indiquant quand et comment chaque opérateur peut intervenir.

Division du travail : La division du travail est directement liée au partage de compétences présent dans l'équipe : chaque opérateur capteur se charge de l'exploitation de ces instruments, et proposent des identifications, tandis que le TACCO gère le processus d'équipe et propose les identifications finales, consensuelles.

Nous avons ainsi inscrit la tâche d'identification de piste dans notre cadre d'étude. Il s'agit bien d'une activité de décision distribuée, prise en charge par une équipe d'experts qui coopèrent à son déroulement. De plus, son expression dans le cadre de la théorie de l'activité est directe, notamment grâce à l'utilisation systématique, par les opérateurs, durant l'activité, de leur système d'information.

C'est ce sur ce point que nous souhaitons intervenir. Nous souhaitons leur proposer une évolution de cet outil, en y intégrant des composants logiciels d'aide aux décisions. Néanmoins, avant de pouvoir engager ce travail, il faut nous assurer que nos modèles nous le permettent.

Chapitre 6

Simulation et résultats

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté notre cadre applicatif de prédilection : la patrouille maritime. Nous allons, dans le présent chapitre, l'exploiter pour essayer de montrer la pertinence de nos modèles de décision distribuée, dans une optique de construction d'un système d'aide aux décideurs.

Différentes simulations logicielles, basées sur un système multi-agents (Wooldridge & Jennings, 1995 ; Ferber, 1995) permettant l'exécution de scénario d'identification, sont proposées suivant cet objectif. Elle permettront d'établir plusieurs résultats concernant la qualité descriptive de nos modèles, et leurs possibilités en terme de support d'aide à la décision.

L'objectif de ce chapitre est donc, dans un premier temps, de nous positionner vis-à-vis d'un système d'aide existant dans le démonstrateur AMASCOS de patrouille maritime. Alors, nous proposons une description informelle de l'outil de simulation et d'aide aux décideurs que nous avons développé. Enfin, nous décrirons les résultats de nos simulations, et montrerons que nos modèles nous ont permis de modéliser certaines situations pertinentes de décision distribuée.

6.1 Un premier système d'aide à l'identification de piste : le projet SMA2

Dans le cadre du projet SMA2 [1] financé par la DGA [2], une étude a porté sur l'élaboration d'un système d'*aide à la décision* destiné à être déployé

[1] Systèmes Multi-Agents pour la Surveillance Maritime Aéroportée
[2] Délégation Générale pour l'Armement

dans des situations où un ensemble de décideurs, qui disposent d'informations partielles et différentes, doivent parvenir à une décision commune répondant à des tâches de type identification d'objets (Skrzyniarz, 2003). Un prototype pour la patrouille maritime a été conçu et expérimenté.

Étant donné la proximité des sujets du travail présenté dans ce mémoire avec l'étude menée pour le projet SMA2, nous souhaitons en proposer une courte description. Nous détaillerons alors les bénéfices qu'elle a procurés au prototype AMASCOS, et un ensemble d'éléments sur lesquels elle nous paraît critiquable, ou insuffisante.

6.1.1 Approche de l'étude SMA2

L'approche choisie a consisté, dans un premier, en la structuration globale du processus de décision distribué.

Structuration du problème de décision

Ainsi, toute décision distribuée est découpée en trois phases (cf. figure 6.1) :

(A) chaque décideur renseigne une *structure de décision* qui lui est propre, selon son expertise et les mesures issues des capteurs qu'il manipule ;

(B) le système procède ensuite à une étape de *fusion d'information*, pour produire un ajustement consensuel des structures de décision, dans le but de réduire, voire résoudre, les conflits ;

(C) enfin, un ensemble de décisions « valides » sont renvoyées. Le TACCO peut en choisir une.

Cette structuration propose ainsi de restreindre les phases d'interaction à l'étape B. De plus, ces interactions ne s'effectuent plus entre les décideurs, mais entre les structures de décision manipulées par le système. La qualité et la pertinence des décisions que le système proposera est alors lié à la qualité et à la pertinence de ces structures de décision.

Modélisation de la décision

Un des objectifs poursuivis est de permettre à l'opérateur d'intégrer un maximum d'informations, pour être certain de ne pas ignorer une donnée cruciale, durant son processus de catégorisation. Néanmoins, ce critère n'ayant que peu de validité cognitive (la rationalité des décideurs est limitée), il n'intervient que dans la phase de construction des structures de

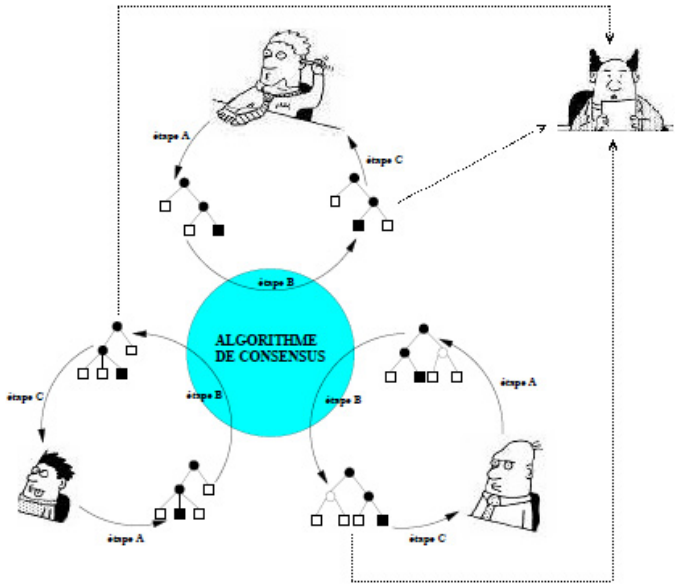

FIG. 6.1 – Processus de décision de SMA2 (tiré de Skrzyniarz (2003)).

décision, et leur utilisation doit respecter les contraintes de rationalité du décideur.

Une deuxième contrainte portant sur le choix de modélisation a été d'offrir un modèle robuste, capable d'effectuer des tâches d'identification. Le choix s'est alors porté sur les *arbres de décision*, qui représentent une catégorie de techniques d'induction permettant de reconnaître une action associée à un objet donné.

Formellement, un arbre de décision se présente sous la forme d'une hiérarchie de nœuds enracinée, c.-à-d. qu'il y a un unique « point de départ ». À chacun de ces nœuds correspond une question indépendante sur la valeur d'un critère, et les éléments terminaux de la hiérarchie, c.-à-d. les *feuilles*, représentent les actions possibles.

L'association entre un objet et une action s'effectue en *parcourant* l'arbre, en répondant aux différentes questions, et le parcours obtenu, c.-à-d. la *règle de décision*, est appelé *chemin*.

Dans le cadre de la patrouille maritime, les arbre de décision peuvent être construits, soit par un algorithme d'extraction de connaissance auprès des opérateurs capteurs, soit directement par les décideurs (et l'arbre est alors *une* expression de son processus de décision), soit par une approche hybride (apprentissage supervisé).

Quelle que soit la méthode choisie, s'appuyer sur l'expertise des opérateurs apporte une double garantie : elle assure de l'adéquation de chaque

arbre au décideur auquel il est affecté, et de la puissance de prédiction des arbres par la prise en compte des informations les plus pertinentes, identifiées par les experts.

Notons que, pour respecter au mieux la contrainte de rationalité limitée des décideurs, la construction des arbres dans SMA2 a subit une contrainte supplémentaire. Ainsi, les structures des arbres constituées permettent, dans leur ensemble, le traitement de nombreuses informations, mais les chemins ont été construits pour être *courts*. Ainsi, les *règles de décision* qu'ils représentent sont cognitivement réalistes.

Modèle d'interaction

Faire « coopérer » des arbres de décision impose de fortes contraintes sur les processus d'interaction. Parmi trois grandes famille de modèles identifiées lors de l'étude SMA2, les méthodes de *négociation*, pour l'établissement et le calcul du consensus, se sont imposées :

modèles organisationnels : cette approche suppose une structure relationnel entre les agents, basée sur leurs rôles dans l'organisation. La coopération repose alors sur leurs *engagements* à satisfaire ces rôles, et sur la *coordination* des tâches associées. Des modèles de responsabilité ou d'autorité sont parfois nécessaires au bon déroulement du processus distribué. Notre approche, présentée au paragraphe 4.3.1, s'inscrit dans cette catégorie.

modèles de planification : la coopération repose ici sur la capacité des agents à s'accorder à l'avance sur un plan de coordination et d'interaction (« qui fait quoi, et quand »). Certaines approches permettent un ajustement dynamique du plan, mais la gestion des événements imprévus reste un point délicat de ces approches.

modèles de négociation : la négociation suppose que les agents soient autonomes, pour proposer différentes décisions, avant de négocier par le relâchement de contrainte, leur permettant d'aboutir à des propositions conciliables. La construction du consensus est alors possible.

La négociation au sein du système multi-agents suit alors le modèle de coopération en trois couches d'Ossowski (1999) :

niveau individuel : ce niveau est l'expression des préférences individuelles de l'agent, et de ses relations avec les objets, passifs, de l'environnement : l'agent y produit ses propres hypothèses.

niveau social : les agents étant immergés dans un environnement qu'ils partagent, ce niveau permet de prendre en compte les interférences

mutuelles qu'ils subissent, et de gérer les conflits : des hypothèses consensuelles y sont construites à partir des hypothèses individuelles.

niveau déontique : la logique déontique permet l'expression de systèmes normatifs ; ce niveau du modèle impose de nouvelles contraintes sur les hypothèses valides, à l'aide d'*opérateurs* de permission et d'interdiction qui contraindront les propositions des agents : l'ensemble d'hypothèses consensuelles est élagué.

L'ensemble des hypothèses valides est ensuite évalué à l'aide de mesures globales et locales (notamment par le biais d'une matrice de risque), et de techniques multi-critères pour obtenir un ordre. La négociation permet ainsi dégager l'identification la plus probable.

6.1.2 Bénéfices

À l'issue de ce projet, un système multi-agents a été implanté dans le prototype AMASCOS. L'intégration a consisté à implémenter, pour chaque opérateur capteur de l'équipage de patrouille maritime, un agent utilisant les informations saisies pour construire des hypothèses d'identification. À la demande du TACCO, le système multi-agents engage l'étape B de calcul de consensus, et renvoie le consensus, si celui-ci existe.

Des expérimentations ont ainsi pu être menées afin de prouver les apports de l'approche. Les performances de l'équipage ont été comparés sur une série de scénarios, avec et sans l'aide fournie par le système multi-agents. Les gains se sont avérés importants, et l'acceptation du système d'aide par l'équipage a également été plus que satisfaisant.

6.1.3 Critique

Cette approche des systèmes d'aide s'inscrit ainsi au sein de celles que nous avons qualifier de « classiques » (cf. chapitre 3), et malgré l'intérêt démontré de cette démarche et de son application, il nous apparaît que l'approche suivie ne peut convenir pour un système d'aide aux décideurs tel que nous l'envisageons :

- Les arbres de décision ne sont pas des modèles de *processus de décision*, ils représentent et exploitent des stratégies de décision qui ne donnent qu'une vue statique des capacités cognitives de traitement de l'information des opérateurs experts.
- Les techniques de négociation font apparaître des calculs qui n'ont que peu, ou pas, de validité cognitive. Bien qu'elles soient capables d'utiliser des structures de préférence des utilisateurs, il n'est pas

vraisemblable que ces processus représentent les processus de négociation réels entre humains.

- L'ensemble de modèles mis en œuvre ne permet pas de prendre en compte la dynamique de la décision distribuée. Les phases d'interaction sont restreintes à celle de négociation, et il est impossible de prendre en considération la dynamique inter-décideurs que nous avons identifiée comme essentielle dans le processus de décision distribuée.

Une dernière remarque (qui n'est pas une critique...), concerne le fait que les représentations choisies dans le contexte de SMA2 étaient toutes de nature identique (les arbres de décision), et cela était nécessaire à la phase de négociation. Avec notre modèle d'interaction, il est théoriquement possible de faire « coopérer » différents modèles de décision, puisque la base de l'interaction est l'information échangée, et que la façon dont elle prend part aux différents modèles n'est pas contraignant. Néanmoins, nous n'avons pas eu le loisir de tester cette possibilité au delà de l'hypothèse, et nous placerons ce travail en perspective.

6.2 Environnement de simulation de dynamiques inter-décideurs

Notre approche des systèmes d'aide est différente, et consiste, comme nous l'avons développé à la paragraphe 3.3, à aider les décideurs dans leur activité distribuée, plutôt que de construire des méthodes de décision.

Nous avons, à ce propos, émis certaines hypothèses sur la dynamique intra-décideurs en étendant l'HBM, et sur la dynamique inter-décideurs en proposant de relier le réseau d'interaction aux influences sur les processus de décision individuels.

Nous avons alors souhaité tester ces hypothèses pour, d'une part, confirmer notre approche de modélisation, et, d'autre part, aider à la spécification d'un système d'aide aux décideurs en déterminant les éléments clé de nos modèles, et les moyens de les contrôler. Pour cela, nous avons construit un simulateur s'appuyant sur un système multi-agents, et mené un ensemble de tests autour de la tâche d'identification de la patrouille maritime.

L'architecture logicielle de ce simulateur est décrite ici de façon informelle, et une description plus « informatique », ainsi que les détails de l'implémentation sur l'exemple de la patrouille maritime, sont fournis en annexe B.

6.2.1 Objectif et ambitions

Bien que notre objectif soit la simulation dans le cadre de la patrouille maritime, notre simulateur a été développé selon une approche plus générique que ce seul cadre applicatif, et permet l'exécution de *tout système d'agents autonomes dont les interactions autour d'une tâche distribuée s'effectuent par échanges de messages*.

La seule contrainte réside ainsi dans le fait que les interactions entre les acteurs du processus distribué doivent être restreintes (ou considérées comme telles) à des échanges d'informations. Notons toutefois que ces échanges d'informations n'ont pas besoin d'être intentionnels pour être pris en compte dans la simulation, et que cela permet une ouverture vers d'autres types d'interaction, qui devront alors simplement être transcrits sous la forme de messages [3].

6.2.2 Architecture générique du simulateur

Nous avons choisi de construire notre approche théorique autour de la théorie de l'activité (cf. paragraphe 3.3.2). Il est donc normal que l'architecture de notre simulateur s'inspire de cette structuration particulière de l'activité. Ainsi, en considérant que l'activité de notre système d'agents consiste exactement en l'activité que nous simulons, trois couches logicielles ont été distingué :

« environnement » : l'environnement simulé contient les *objets* de l'activité des agents, i.e. les représentations dans l'espace « naturel » des attributs, des *objets* de l'activité réelle.

« système » : il s'agit de l'*instrument* à travers lequel les agents observent l'environnement, et échangent les *messages* nécessaires à leur activité, et correspond donc à une implémentation des fonctions centrales de l'*instrument* réel.

« agents » : ils sont le *sujet* de l'activité, c.-à-d. qu'ils implémentent les modèles de comportement visés par la simulation.

Les autres composants de la théorie de l'activité (règles, communauté et division du travail) ne sont pas implémentés sous la forme de couches logicielles, mais ont été intégrés aux trois précédentes :

- de façon implicite : la division du travail et la communauté traduisent, par exemple, le positionnement fonctionnel des différents agents,

[3] Notons qu'alors, la réception des messages est asynchrone, vis-à-vis de l'exécution logicielle des processus agents qui les exploitent.

- de façon explicite : les règles sont, quant à elles, dynamiquement prises en compte, et agissent sur le processus distribué.

Cette vision de l'activité est centrée sur les *agents simulés*. C'est pourquoi, après avoir présenté une application à la patrouille maritime, nous nous attarderons un instant sur le positionnement de ce simulateur vis-à-vis du système d'aide que nous souhaitons proposer aux décideurs [4].

6.2.3 Application à la patrouille maritime

En dehors de quelques échanges verbaux que nous avons décidé de ne pas prendre en compte, du fait de contraintes techniques sur la reconnaissance de la parole, toutes les interactions en patrouille maritime s'effectuent par l'intermédiaire d'un système d'information qui est le support d'exploitation des instruments de l'avion, et l'outil de saisie et de traitement des informations par les opérateurs. Notre outil de simulation a pu être exploité, et nous a donc permis d'obtenir des renseignements sur l'architecture du système d'aide à la décision visé, dont les spécifications sont proposées dans le prochain chapitre.

Ainsi, pour déterminer l'influence des échanges d'information caractérisant la dynamique inter-décideurs dans le processus de décision distribué, différents modèles d'interaction ont été testés sur un ensemble de tâches d'identification identiques. Dans ces simulations le système multi-agents développé devait identifier les pistes radar fournies, leurs algorithmes de décision étant une implémentation directe de notre version de l'HBM. Les règles de décision, constituant l'expertise sur laquelle chaque agent se repose pour prendre une décision (cf. paragraphe 4.2.3), ont été obtenu par « lecture » des arbres de décision de SMA2 : chaque tâche d'identification, qui serait ensuite soumise à nos agents, a été préalablement soumise au système multi-agents de SMA2 servant de référence, et chaque *chemin activé* dans un arbre a permis de construire une règle de décision.

L'« environnement » : c'est une métaphore de l'environnement réel dans lequel sont plongés les opérateurs. Il contient ainsi une description, exhaustive et non bruitée, des pistes radar devant être identifiées. Ces descriptions sont effectuées en fonction des attributs liés aux équipements capteurs (cf. tableau 6.1), et constituent les *objets* de l'activité. Pour cette description, nous avons utilisé des fichiers XML qui ont été validés par des opération-

[4] Une autre application qui prend place au sein du projet eDAI – *Electronic*-Dossier d'Accueil Individualisé – étudie le travail collaboratif d'une équipe de santé scolaire, pour l'intégration, dans les écoles, d'enfants ayant des problèmes médicaux. Des détails sur cette étude peuvent être trouvés dans Stratulat (2007).

Capteur	Attributs	Commentaire
PPI	SER	Surface équivalente radar
	Vitesse	Vitesse instantanée
	Sortie rail	Détecte la sortie d'un rail (commercial...)
ISAR	Longueur	
	Profil coque	Codé sur 3 bits (1 : haut, 0 : bas)
	I1 I2 I3 I4 I5 I6 I7	Éléments de superstructure
FLIR	Profil coque	Codé sur 3 bits (1 : haut, 0 : bas)
	F1 F2 F3 F4 F5 F6 F7	Éléments de superstructure

TAB. 6.1 – Attributs associés aux capteurs

nels, mais dont l'inconvénient est de n'être qu'une description *statique*, figée dans le temps, des pistes qui n'ont alors aucun « comportement » cinématique. Il est toutefois possible d'obtenir des descriptions qui simulent la dynamique de l'environnement, par l'utilisation du générateur de scénarios disponibles dans le démonstrateur AMASCOS. Ce générateur alimente en « temps réel » une base de données avec les informations descriptives des contacts présents sur la zone, et sur laquelle il est possible de « brancher » le simulateur [5].

Le « système » : cette couche doit simuler à la fois l'ensemble des moyens d'accès à l'environnement, et le système d'information permettant aux décideurs de saisir et d'échanger des informations. Il constitue l'*artefact* permettant l'activité. Il s'agit donc de simuler :

- les capteurs : n'ayant pas accès aux modèles de simulations utilisés dans le prototype AMASCOS, notre simulation des capteurs a sim-

[5] Néanmoins, nos simulations ne portant pas sur l'étude de l'influence de la dynamique d'intériorisation de l'environnement par les décideurs sur le processus distribué, ce travail constituera l'une de nos perspectives.

plement consisté en l'implémentation de fonctions de bruitage des données fournies par l'environnement. Ces fonctions utilisent, pour chaque valeur possible de chaque attribut, un choix aléatoire parmi une liste de méprises potentielles, issue d'une *matrice de confusion* (cf. tableau 6.2).

- les moyens d'échanges de messages : il ne s'agit évidemment pas de réimplanté le système actuel, mais plutôt d'en abstraire les capacités de saisie et d'échanges d'informations. Ainsi, nous avons représenté :
  - la saisie des informations opérée par chaque opérateur sur ses interfaces par des envois de messages contenant les informations saisies, et destinés à l'ensemble de ses coéquipiers,
  - la consultation de ces informations sous la forme d'une boîte de réception, individuelle, dans laquelle chaque agent reçoit les messages qui lui sont destinés, et qu'il peut alors exploiter.

Les « agents » : nos simulations de l'activité d'identification de la patrouille maritime ont été effectuées par l'implémentation de quatre agents dans notre simulateur : trois agents de type « opérateur capteur » (ISAR, FLIR et PPI), et un agent TACCO. Ils sont les *sujets* de l'activité, et manipulent les *objets* issus de l'« environnement » grâce à l'*artefact* « système ».

Les agents opérateurs possèdent une implémentation de nos modèles de décision distribuée (cf. paragraphe 4.2.3), qui leur permettent de manipuler les informations extraites de l'environnement à travers le système et de proposer des identifications (modèle de décision), à partir des règles de décision extraites pour chacun d'eux (cf. tableau 6.3, tableau 6.4 et tableau 6.5), et de traiter leurs influences avec les autres agents (modèle d'interaction). Souhaitant concentrer nos efforts de simulation sur les influences de la dynamique inter-décideurs, l'agent TACCO n'a, quant à lui, pas reçu d'implémentation d'un algorithme de décision, et sa tâche a donc été restreinte à la coordination des agents opérateurs. Une séquence de simulation classique est alors la suivante :

(1) le TACCO demande, aux agents opérateurs, l'identification d'une première piste choisie dans une liste (la méthode de choix importe peu ici, et nous supposons que toutes les pistes sont préalablement créées) ;

(2) les agents opérateurs pouvant obtenir des informations sur la piste[6] entament leur tâche d'identification, les autres restant inertes pour cette identification ;

[6]En effet, toutes les pistes ne sont pas systématiquement décrites sur l'ensemble des attributs disponibles.

Attribut	Imprécision
SER	Ces attributs sont à valeurs numériques : la confusion est une imprécision à $\epsilon\%$
Vitesse	
Longueur	

Attribut	Valeur	Signification	Confusion possible
Sortie rail	O	Sortie de rail	N
	N	Pas de sortie	O
Profil coque	000	*plat... ou rien vu*	Confusion sur un (seul) bit de la valeur Ex. : 010 --→ **1**10, 0**0**0 ou 01**1**
	001	*pétrolier...*	
	010	*combattant...*	
	011	*paquebot...*	
	100	*remorqueur...*	
	101	*cargo...*	
	110	*auxiliaire...*	
	111	*boite a chaussure...*	
Superstructure ISAR	-	Pas de point haut	Q
	Q	Marqueur	-
Superstructure FLIR	-	*rien de notable...*	D, H, I, L, O, P, R, T, W
	C	Crane	W
	D	Radome	I, T
	F	Funnel	?
	G	Gun	R
	H	Helicopter deck	-
	I	Missile	D
	L	Lifeboat	?
	M	Mast	R
	O	Off-loader	?
	P	Pipework	?
	R	Radar	G, M
	S	Sail	-
	T	Tank	R
	W	Winch	C
	?	*inconnu...*	

TAB. 6.2 – Valeurs d'attributs et confusions possibles

SER	Vitesse	Sortie rail	Identification
[4800.0,20000.0[	[0.0,25.0[	O	AO1/LSD1/LSD2
[0.0,17.0[	[8.0,21.0[		CAT1/SSK1/TU1
[20000.0,150000.0[	[20.0,50.0[		CVN1
[4800.0,20000.0[	[25.0,50.0[		DDG1/DDG2/DDG3/DDG4/DDG5/DDG6
[100.0,4800.0[	[23.0,50.0[		FFG1/FFG2/FFG3/FFG4/FFG5
[17.0,100.0[	[0.0,22.0[		MHC1/TU2/TU3
[0.0,17.0[	[18.0,50.0[		MYAC1
[17.0,100.0[	[22.0,50.0[		PBF1/PBF2
[0.0,17.0[	[0.0,8.0[		SSN1
[100.0,4800.0[	[0.0,23.0[	N	TM1/TM2/TM3
[4800.0,20000.0[	[0.0,25.0[	N	TMO1
[20000.0,150000.0[	[0.0,20.0[	N	TMO2

TAB. 6.3 – Règles de décision et identifications associées de l'agent PPI

(3) lorsque les agents ont obtenu un consensus, ou qu'un temps maximal de traitement a été atteint, le TACCO demande l'arrêt des traitements en cours aux opérateurs, choisit une prochaine piste et lance une nouvelle identification.

Moyens de contrôle de la simulation

Pour effectuer différentes simulations, il faut avoir la possibilité de contrôler leurs conditions d'exécution.

Notre simulateur nous apporte ce contrôle, notamment au niveau de la dynamique inter-décideur, et donc du modèle d'interaction :

- autoriser ou non certains circuits d'informations pour laisser la coopération inter-décideurs se mettre en place, ou l'interdire,
- faire varier les quantités $\alpha_{I,J}$ et les incréments inc_X et inc_R pour simuler différents niveaux d'influence et « influençabilités » des opérateurs,
- faire varier le seuil $Act_\sigma^{(k)}$ de satisfaction pour que les agents soient plus ou moins stricts sur la qualité de l'identification obtenue,
- imposer un bruit plus ou moins importants sur les observations pour tester la robustesse de notre algorithme de décision, et déterminer les apports de la coopération en environnement très bruité.

Quelques remarques comparatives avec SMA2

Nos agents sont semblables à ceux développés dans le cadre du projet SMA2 sur certains points :

Longueur	Profil coque	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	Identification
[135.0,160.0[	101								AO1
[15.0,35.0[	010				Q				CAT1
[300.0,500.0[	010				-	Q			CVN1
[135.0,160.0[	010		-	Q		Q			DDG1/DDG3/DDG5
[160.0,200.0[	010					-	-		DDG2/DDG4
[90.0,135.0[	010		-			Q			DDG6/FFG1/FFG3
[90.0,135.0[	010		-			-			FFG2
[90.0,135.0[	010		Q			-			FFG4
[60.0,90.0[	010	-	Q					-	FFG5
[160.0,200.0[	110								LSD1/LSD2
[35.0,60.0[	010			Q	-	Q			MHC1
[35.0,60.0[	011				Q				MYAC1
[60.0,90.0[	010	Q	-					-	PBF1
[35.0,60.0[	010	-			Q		-		PBF2
[0.0,15.0[	010								SSK1/SSN1
[60.0,90.0[	001								TM1
[135.0,160.0[	010		Q	-		Q			TM2
[160.0,200.0[	001							Q	TM3
[200.0,300.0[	001							-	TMO1
[300.0,500.0[	001								TMO2
[15.0,35.0[	110			Q				-	TU1
[15.0,35.0[	110			Q				Q	TU2
[60.0,90.0[	010					Q		Q	TU3

TAB. 6.4 – Règles de décision et identifications associées de l'agent ISAR

- la recherche d'autonomie des systèmes d'aide, que l'on peut relier à la généricité de la plateforme construite : elle n'est pas constituée dans l'optique de la résolution d'un problème particulier, mais selon une perspective *bottom-up* permettant l'émergence d'une coopération,
- la tâche de décision visée est la même, c.-à-d. une catégorisation d'un vecteur descriptif d'un objet du monde en une identification de cet objet,
- nos composants logiciels forment des systèmes multi-agents au sens d'Ossowski (1999) parce que :
  - chaque agent prend en compte son intérêt personnel,
  - les agents suivent des buts multiples (identification selon leurs propres données) potentiellement conflictuels,
  - ils sont (*potentiellement* pour SMA2) autonomes en terme d'adhésion à la tâche d'identification.

  et le système résultant est *fermé* durant chaque prise de décision distribuée (i.e. que l'ensemble d'agents impliqués est fixe), et *ouvert* à l'échelle des différentes identifications.

Néanmoins, nous distinguons les différences suivantes :

Profil coque	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	Identification
101	G		C	P		F	H	AO1
010	-	S		M				CAT1
010	-	-		-	M		D	CVN1
010	-	G		M			H	DDG1/FFG4
010	-	R		M		H	G	DDG2
010	G	I		M		H	G	DDG3
010	G	I		M		R	H	DDG4
010	G	R		F		I	H	DDG5
010	G	G		M		R	H	DDG6
010	G	D		F		I	H	FFG1
010	-	G		D		F	I	FFG2
010	I		R	M		G	H	FFG3
010	-	G		-	M		G	FFG5
110		M	H	H			F	LSD1
110		R	M	-		C	H	LSD2
010	-	G		-	F		C	MHC1
011	-		-	R		L	M	MYAC1
010	D	I					W	PBF1
010	-	G		I		-	G	PBF2
010	-	-		M				SSK1/SSN1
001	M		-	-		M	F	TM1
010	C		R	-		C	-	TM2
001	M		C	C		C	F	TM3
001	-		M	T		F	-	TMO1
001	-		M	T		P	F	TMO2
110		-	M	W			M	TU1
110		-	M	-			C	TU2
010	M		-	R			C	TU3

TAB. 6.5 – Règles de décision et identifications associées de l'agent FLIR

- les algorithmes de décision diffèrent par nature : suivant la typologie de Ferber (1995), nos composants logiciels sont des *agents proactifs* de type *cognitifs* (ils implémentent un automate de raisonnement cognitif suivant l'HBM), purement *communicants*, tandis que ceux de SMA2 n'implémentent pas de processus de décision (cf. paragraphe 6.1.3).
- d'ailleurs, SMA2 « ne s'intéresse pas aux relations humains/agents logiciels » (Skrzyniarz, 2003, p. 53), tandis que c'est le cœur de notre problématique,
- SMA2 n'envisage la coopération entre les agents informatiques qu'à des phases déterminées des processus de décision individuels, et nécessite leur synchronisation sur cette phase.

Positionnement du simulateur vis-à-vis du système d'aide aux décideurs

Les agents de notre simulateur prennent les décisions qu'ils jugent bonnes, concernant les pistes qu'ils veulent, et en fonction d'observations dont ils ont l'initiative. Ils sont autonomes.

Dans le système d'aide, ils devront utiliser leurs capacités pour construire des hypothèses (cf. paragraphe 7.2) sur la piste en cours de traitement par l'opérateur, et en fonction des informations que celui-ci a, ou non, saisies.

Ainsi, l'*instrument* d'aide aux décideurs que nous proposons correspondra en partie au simulateur actuel, dans lequel les agents auront perdu une part de leur autonomie.

6.3 Résultats

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulations menées dans le cadre de la patrouille maritime. Les identifications ont été effectuées sur un ensemble de 30 pistes.

6.3.1 Tests unitaires et performance

Une première remarque concerne les tests unitaires d'identification que nous avons effectués avec des données non bruitées. Ce test, bien qu'il puisse sembler superfétatoire, constitue un résultat d'importance, sans lequel la suite eut été superflue.

Les identifications obtenues individuellement (sans coopération) par nos agents sont d'excellente qualité : toutes les identifications correctes sont

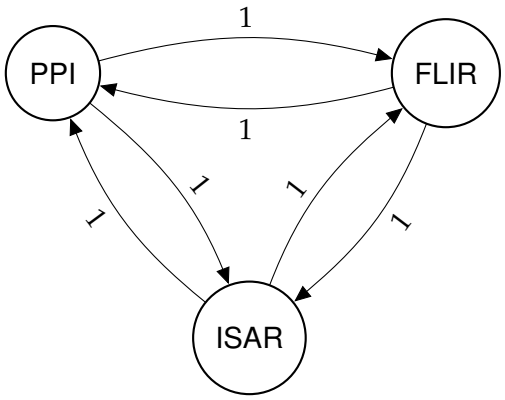

FIG. 6.2 – Notre réseau de confiance

systématiquement obtenues en un temps minimum (une itération dans l'HBM) avec un niveau de satisfaction maximum (les règles de décision correctes sont totalement activées).

Cela signifie que notre modèle de décision est valide, et que son implémentation est correcte. Ainsi, nos agents décident.

Nous avons alors souhaité connaître leurs résistances au bruit, toujours en travail individuel (sans coopération). Celle-ci s'avère correcte puisque, pour environ 10% de données bruitées, seul l'agent ISAR a vu ses résultats se dégrader (10 erreurs en moyenne sur 30) tandis que le FLIR et le PPI ont conservé 100% d'identifications correctes. Les temps de convergence sont également restés de bonne qualité puisque seuls les cas d'erreurs ont montrés une dégradation, l'agent ISAR devant être stoppé par le TACCO.

Néanmoins, les résultats se dégradent rapidement avec l'augmentation du niveau de bruit. Ainsi, à 25% de données bruitées, le taux d'identification correcte tombe à 50%, malgré de nombreuses itérations de l'HBM.

Nous avons alors autorisé la coopération, en autorisant les agents a utiliser un réseau de confiance totale entre les agents, instancié entre eux (cf. figure 6.2) :

- $\alpha_{I,J} = 1$ pour tout couple (I, J),
- $inc_X = 0,5$ pour tout attribut X,
- et $inc_R = 1$ pour toute règle de décision R,

et nous avons rejoué le même ensemble d'identifications.

Les résultats se sont montrés très probants. En effet, que ce soit dans la version où le bruit était de 10% ou celle à 25%, l'agent ISAR a largement

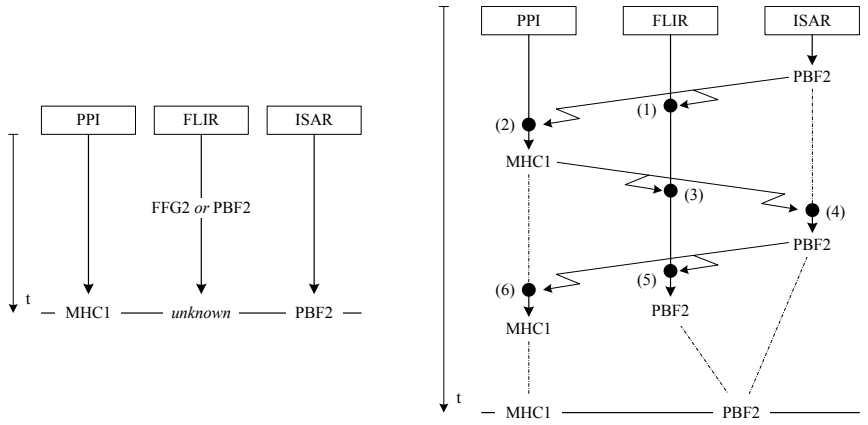

FIG. 6.3 – Simulations sans et avec interactions : *effet de polarisation*.

profité des interactions avec ses coéquipiers pour ne plus commettre que 4 erreurs en moyenne sur 30. En revanche, le nombre d'itérations sur ces cas d'erreurs n'a quasiment pas évolué. Une autre remarque concerne le fait que l'agent FLIR s'est, dans le même temps, mis à commettre des erreurs : 3 en moyenne sur les 30 identifications.

Nous allons discuter ce phénomène dans les deux paragraphes suivants.

6.3.2 Polarisation et basculement

Le basculement correspond au résultat d'un effet de polarisation d'un décideur par un ou plusieurs autre(s), les influences durant le processus de décision l'ayant progressivement fait basculer de l'incertitude, ou d'une hésitation, vers une décision consensuelle (cf. paragraphe 2.3).

Conditions de simulation

Deux simulations ont été menées pour modéliser correctement cet effet. La figure 6.3 en retrace les résultats :

- « PPI », « FLIR » et « ISAR » sont les agents opérateurs travaillant à l'identification de la piste ;
- « MHC1 », « FFG2 » et « PBF2 » sont différentes alternatives auxquelles ils parviennent durant leurs processus ;
- les flèches zébrées et les points numérotés représentent la transmission et la réception de messages par les agents ;
- les flèches en pointillés représentent un temps d'inactivité d'un agent

après une décision, tandis qu'une flèche pleine (verticale) représente un agent en activité.

La piste à identifier est un bateau de patrouille hostile (nommée « PBF2 ») décrit dans la tableau 6.6, qui indique, d'une part, le vecteur d'attributs non bruité, et, d'autre part, le vecteur bruité sur lequel les agents ont véritablement travaillé, et qui est la cause des ambigüités nécessaires à l'effet de polarisation.

Capteur	Attribut	PBF2 réelle	PBF2 bruitée
PPI	SER	30	30
	Vitesse	40	**15**
ISAR	Longueur	45	45
	Profil coque	010	010
	I1	-	-
	I2	-	-
	I3	-	-
	I4	Q	Q
	I5	-	-
	I6	-	-
	I7	-	-
FLIR	Profil coque	010	010
	F1	-	-
	F2	G	G
	F3	M	M
	F4	I	**D**
	F5	I	I
	F6	-	-
	F7	G	**R**

TAB. 6.6 – Description de la piste « PBF2 »

Résultats

On remarque que très peu de données sont bruitées, mais qu'elles suffisent à introduire, dans le cas non coopératif (cf. schéma de gauche de la figure 6.3), une erreur d'identification pour le PPI qui propose un bâtiment de déminage ami « MHC1 », et pour le FLIR qui ne peut décider entre le bateau de patrouille hostile « PBF2 » et une frégate hostile « FFG2 » (des photos de ces trois acteurs sont données figure 6.4).

La situation est donc celle d'une équipe où deux opérateurs aboutissent à des identifications différentes, et où le troisième ne se décide pas.

Nous avons alors redemandé l'identification à notre système multi-

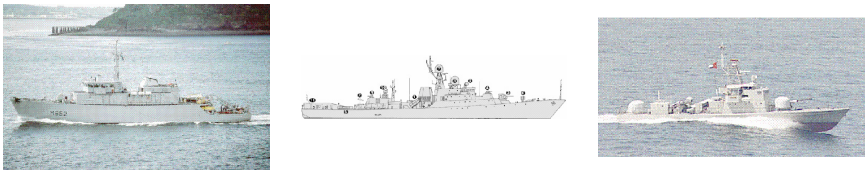

FIG. 6.4 – Acteurs « MHC1 », « FFG2 » et « PBF2 »

agents, en prenant soin, cette fois, d'implémenter un réseau d'interaction représentant la confiance qui existe entre les opérateurs (cf. figure 6.2). Nous avons choisi de placer cette confiance a un niveau élevé (ce qui est généralement le cas dans une équipe de patrouille maritime). Quelques soient les valeurs d'incréments inc_X et inc_R, les résultats sont sensiblement les mêmes (seule est modifiée la vitesse de convergence), et sont représentés sur le schéma de droite de la figure 6.3.

On peut y lire que plusieurs échanges de messages transportant les identifications obtenues par les agents ISAR et PPI. D'autres messages concernant les ensembles d'attributs choisis par chacun des agents ont également été échangés, mais n'ont pas été retranscrits sur le schéma pour un souci de lisibilité. L'influence de ces échanges est visible sur le comportement de l'agent FLIR qui, après une période d'hésitation (messages 1 et 3), finit par se « ranger aux côtés » de l'agent ISAR (message 5) sur l'identification « PBF2 ». Bien entendu, le consensus n'étant pas atteint dans l'équipe, les agents ont continués à interagir, mais n'ont plus modifié leurs identifications, et nous n'avons pas retranscrit tous ces messages.

6.3.3 Consensus extrême

Un consensus extrême peut être vu comme un cas d'inter-polarisation entre des décideurs qui, de plus, aboutissent à une décision aux conséquences potentiellement importantes en terme de risque (Moscovici & Zavalloni, 1969).

Conditions de simulation

Deux simulations ont également été menées pour modéliser correctement cet effet. La figure 6.5 en retrace les résultats :

- « PPI » et « ISAR » sont les agents opérateurs travaillant à l'identification de la piste ;
- « TM » et « FFG » sont différentes alternatives pour le PPI, correspondant respectivement à des cargos neutres (« TM1 » à « TM3 ») et à des frégates neutres (« FFG1 » à « FFG5 ») ;

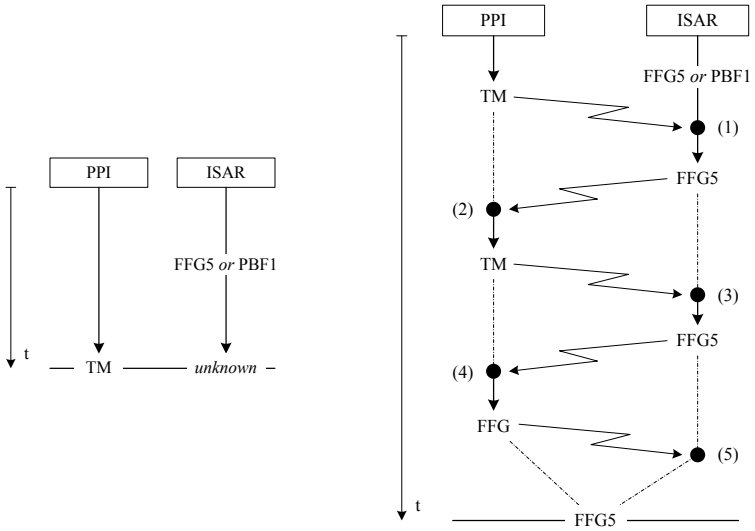

FIG. 6.5 – Simulations sans et avec interactions : *consensus extrême*.

- « FFG5 » et « PBF1 » sont les différentes alternatives de l'ISAR, correspondant à une frégate neutre « FFG5 » et au bateau de patrouille hostile « PBF1 » ;
- les flèches zébrées, les points numérotés et les flèches en pointillés ont la même significations que précédemment.

La piste à identifier est encore un bateau de patrouille hostile (nommée « PBF1 ») décrit dans la tableau 6.7. Le comportement de ce bateau est une approche lente pour masquer sa présence (ce qui explique la valeur erronée du PPI).

Capteur	Attribut	PBF1 réelle	PBF1 bruitée
PPI	SER	30	**100**
	Vitesse	31	**22**
ISAR	Longueur	62	**66**
	Profil coque	010	010
	I1	Q	Q
	I2	-	**Q**
	I3	-	**Q**
	I4	Q	Q
	I5	-	-
	I6	-	-
	I7	-	-

TAB. 6.7 – Description de la piste « PBF1 »

FIG. 6.6 – Acteurs « TM1 », « FFG5 » et « PBF1 »

Résultats

Ce qui est particulièrement intéressant ici, dans la situation sans interaction, est le fait que l'agent ISAR, bien qu'il ne parvienne pas à décider, hésite entre une identification correcte et une identification dangereuse (« FFG5 »), puisqu'elle le mènerait à considérer la piste comme neutre, et donc, à ignorer le danger que « PBF1 » représente. L'agent PPI, quant à lui, obtient une identification générique « TM », également neutre (des photos de ces acteurs sont données figure 6.6).

Lorsque la coopération est autorisée (avec les mêmes paramètres et remarque que précédemment sur la sensibilité des incréments), on aperçoit un premier effet de polarisation à la réception du message (1). L'agent ISAR détecte alors la cohérence entre son alternative « FFG5 » et l'identification « TM » en terme d'appartenance à la catégorie neutre.

Suivent alors deux messages (2 et 3) qui vont renforcer la position de l'agent ISAR (son niveau d'activation est de plus en plus haut sur l'alternative « FFG5 »).

Alors, à la réception du message (4), on observe un deuxième effet de polarisation, cette fois de la part de l'agent PPI, qui change son identification, au profit de l'alternative « FFG » très compatible avec celle de l'agent ISAR.

Le processus de décision s'arrête alors sur une identification, fausse, d'un frégate neutre, tandis que le patrouilleur hostile peut continuer sa route... C'est un consensus extrême.

Quatrième partie

Spécifications système et perspectives

Chapitre 7

Spécifications du système d'aide aux décideurs

Dans les chapitres précédentes, nous avons présenté nos modèles de décision distribuée, et nous les avons déployés au sein d'un simulateur appliqué à la patrouille maritime. Nous avons ainsi pu simuler un ensemble de situations qui ont confirmé nos hypothèses concernant la dynamique de la décision distribuée, et encouragé notre approche anthropocentré de l'aide aux décideurs.

Nous souhaitons à présent aborder le problème de la spécification d'un tel système, et donner l'ensemble des fonctions qu'il devrait implémenter pour être capable d'assister véritablement les décideurs dans leur tâche. Nous proposerons également une discussion sur les problématiques de conception liées à ce type de système informatique. Toutefois, il est intéressant, dans un premier, de revenir une fois encore sur l'incident du Vincennes, qui fait apparaître de façon évidente ce qu'un système mal adapté peut provoquer.

7.1 L'incident du Vincennes - Vue du système

Notre récit de l'incident du Vincennes (cf. annexe A), et les deux analyses que nous en avons proposées aux paragraphes 2.2.3 et 2.3.3, nous ont donné de nombreuses informations sur les erreurs individuelles et collectives qui se sont produites ce jour-là. La partie précédente sur nos simulations en patrouille maritime nous a, par ailleurs, permis d'*observer* l'existence de tels phénomènes dans les équipes de décideurs, et de les relier à certains phénomènes de groupe aux conséquences potentiellement funestes.

Cependant, ces erreurs n'étaient-elles pas inévitables ? Le contexte de l'incident était tel que, aux niveaux individuels et collectif, il eut été plus étonnant qu'il n'y ait eu aucune erreur. Klein (1998) remarque d'ailleurs que si le capitaine Rogers du *Vincennes* s'était réellement trouvé face à un avion de combat F-14 ennemi, et qu'il avait pris la décision de ne pas l'abattre, la communauté internationale l'aurait également « mis au pilori ».

L'aide aux décideurs prend ici tout son sens, et une analyse des fonctionnalités du système informatique du *Vincennes*, en tant qu'*acteur* dans la prise de décision, permet d'illustrer le travail à réaliser. Ainsi, ce système permet certaines tâches essentielles :

- pré-classification de la piste radar : le récit indique que le système « classa la piste radar comme... ». Cette tâche semi-automatisée fournit une classification de la piste, à l'aide d'une base de données utilisant les premières informations acquises ou saisies par les opérateurs.
- Attribution d'un numéro de piste : le système « attribua automatiquement le numéro... ». Cette tâche est, sans doute, totalement automatisé, le récit nous indique également que le système *en réseau* est capable de « juger » que des pistes ayant des numéros différents représentent le même contact, et peut choisir un numéro unique.
- Affichage des informations : il est fait plusieurs fois référence aux capacités d'affichage du système informatique, qui permet ainsi l'accès à toutes les données, acquises automatiquement ou saisies, concernant les pistes.

Le système est ainsi le *premier acteur* à intervenir dans le processus de décision. Et les renseignements qu'il fournit orientent et positionnent, d'emblée, la prise de décision. Il est de plus omniprésent dans l'accès et l'échange d'informations. Néanmoins, on note que :

- les informations ne sont pas toujours bien diffusées : le changement de numéro de piste a, semble-t-il, été mal annoncé. Il est difficile de savoir, avec le récit que nous possédons, si le système ou un opérateur était en charge de cette annonce. Mais, néanmoins, le système étant à l'origine de cette modification cruciale, nous considérons qu'il est de sa *responsabilité* d'en assurer la diffusion correcte. De même, le récit soulève le problème de la lisibilité des informations sur les affichages informatiques (l'altitude n'est, par exemple, pas inscrite dans son intégralité).
- Les décideurs n'ont pas été, individuellement, *aidés* dans leurs tâches : par exemple, nous savons qu'un opérateur avait la bonne lecture du signal IAE, et cette information lui a, nécessairement, été fournie par

le biais du système informatique du *Vincennes*. D'autres opérateurs ont eu une information différente, également par le biais du système. Pourtant, ils n'ont jamais été alertés de ce conflit de mesure.

Le système informatique a donc joué un rôle essentiel dans l'erreur de prise de décision. De plus, les systèmes actuels de patrouille maritime continuent à prendre une part grandissante de la responsabilité d'acquisition et de traitement de l'information. Toutefois, les opérateurs restent les seuls décideurs, et c'est bien ce couple homme-machine, dans l'activité, que nous devons étudier.

7.2 Spécification d'un système d'aide aux décideurs

Grâce à leur formalisme mathématique qui permet une implémentation *triviale* [1], nos modèles permettent la simulation de la décision distribuée, et une meilleure compréhension de ses dynamiques. Ils permettent notamment de comprendre l'*intrication* des dynamiques intra et inter-décideurs dans les processus cognitifs de ces individus. Nous pouvons alors envisager la spécification d'un *instrument* d'aide aux décideurs, s'appuyant sur l'identification de *schémas d'utilisation* de l'artefact « système informatique » par nos décideurs.

Le principe de notre système [2] s'appuie sur l'extraction des connaissances expertes des décideurs, et leurs exploitations par des *assistants* autonomes affectés aux différents décideurs de l'équipe [3]. Notons que cette approche a été appliquée avec succès dans un contexte mono-opérateur de contrôle de processus industriels (Le Saux, 2000).

Ces agents informatiques (au sens de Ferber (1995)) doivent alors implémenter trois fonctions :

Observation et représentation : l'observation du décideur auquel il est affecté doit permettre à l'agent informatique de construire une représentation de la situation cohérente avec celle de l'expert.

Raisonnement abductif : l'agent doit être capable de construire des hypothèses sur l'identification de la piste, en fonction de la représentation qu'il a construite [4].

[1] Ils ne nécessitent en effet que peu de reformulation avant d'être implémentable (cf. annexe B).

[2] comme nous l'avons détaillé au paragraphe 3.3

[3] Une approche très similaire proposant la construction d'assistant à la remémoration a été proposée par Damas (2003 ; Damas *et al.*, 2004 ; Mille, Caplat, & Philippon, 2006).

[4] On distingue classiquement la déduction (*inférence logique* d'une conclusion certaine

Aide aux décideurs : en fonction des hypothèses construites, et en fonction de ses interactions avec les autres agents, l'agent doit aider le décideur durant son processus cognitif de prise de décision.

Nous partons du principe, dans la suite, que les modèles de décision individuels, et le modèle d'interaction ont été préalablement appris, et nous reviendrons plus en détails sur cette problématique dans le paragraphe 7.3.

Les tableaux 7.1, 7.2 et 7.3 résument nos propositions en fin de paragraphe.

7.2.1 Observation et représentation

L'observation doit permettre à l'agent informatique de connaître l'ensemble des informations manipulées par le décideur auquel il est affecté, c.-à-d. :

- les données issues de l'environnement, acquises à travers le système informatique,
- et les informations saisies par le décideur sur le système informatique, par exemple après un traitement sur les données de l'environnement.

Pour y parvenir, l'agent doit accéder à l'ensemble des interactions homme-machine, à travers les traces informatiques qu'elles produisent (Mille, 2006). Néanmoins, certaines traces peuvent être difficiles à interpréter, à cause de leur caractère composite (multi-modalité d'interaction) et du *bruit* inhérent aux interactions homme-machine plus ou moins habiles de la part de l'individu. Par exemple, un ensemble de mouvements et de clics de souris, associés à plusieurs saisies au clavier ou commandes vocales peuvent être nécessaire à la saisie d'une seule information cognitivement pertinente. Il peut dès lors être nécessaire de mettre en œuvre des méthodes de traitement complexes.

Sur le démonstrateur AMASCOS, les opérateurs en charge du FLIR doivent, pour renseigner chaque élément de superstructure : (i) demander l'image infra-rouge si elle n'est pas affichée (mouvements et clics de souris), (ii) ouvrir une liste présentant tous les types d'éléments (id.), (iii) et sélectionner un de ces éléments (id.). Dès lors, des techniques d'estimation statistique et d'induction (voir par exemple Hayashi (2003)) devront être

à partir de prémisses vraies), l'induction (*inférence statistique* d'une règle à partir des prémisses), et l'abduction (inférence qui mène à la *construction* d'hypothèses plausibles). En d'autres termes : on *déduit* la conclusion q d'une prémisse p grâce à la règle $p \Rightarrow q$, on *induit* la règle $p \Rightarrow q$ des observations statistiques de p et q, et on *abduit* p de l'observation q, en faisant l'hypothèse de la règle $p \Rightarrow q$.

employés pour abstraire cet ensemble d'interactions de « bas niveau » en une information de nature plus symbolique, c.-à-d., ici, l'élément de superstructure identifié par l'opérateur.

À l'aide de ces informations, et de la connaissance de l'agent sur les attributs et les échelles d'attractivité du décideur, une représentation de la situation, elle aussi cognitivement pertinente, peut être construite. Elle prendra naturellement la forme d'un vecteur d'aspects, c.-à-d. dont les composantes seront les informations observées, codées sur les échelles d'attractivité du décideur.

7.2.2 Raisonnement abductif

Les capacités de raisonnement abductif des agents destinés à l'aide aux décideurs correspondent à celles des agents de notre simulateur. En effet, comme nous l'avons dit au paragraphe 6.2.2, ces derniers implémentent « les modèles de comportement visés par la simulation », qui ne sont autres que l'HBM basé sur un processus d'ecphorie distinctive, et le modèle d'interaction permettant de prendre en compte les influences inter-décideurs.

Néanmoins, alors que les agents du simulateur doivent décider, ceux du système d'aide ne doivent qu'émettre des hypothèses. Ils dépendent pour cela de la représentation de la situation qu'ils construisent en observant le décideur, et des règles de décision extraites auprès du décideur (cf. paragraphe 7.3.1).

Ces hypothèses permettent de construire une liste de décisions, ordonnée en fonction du niveau d'activation de chacune des règles, qu'il est probable que le décideur envisage.

7.2.3 Aide aux décideurs

À l'aide de ses observations, de sa représentation et de ses hypothèses, l'agent peut proposer une aide à la décision, qui se décline en trois sous-fonctions.

Détecter

Les observations cumulées au cours du temps permettent de détecter qu'un décideur n'explore pas tout son espace de représentation, et que certains attributs sont ignorés. Le décideur risque alors d'ignorer des informations qui lui permettraient d'aboutir à des décisions différentes, et peut-être meilleures, vis-à-vis de la situation.

Toutefois, nous avons clairement rejeté les approches soutenant que plus d'informations équivaut à une meilleure décision, et il ne s'agit donc pas de pousser le décideur à systématiquement explorer l'intégralité de ces attributs. Il faut au contraire que cette détection fasse preuve de pertinence. L'agent devra ainsi croiser ses observations avec les hypothèses qu'il formule, pour définir un ensemble d'attributs centraux liés aux stimuli critiques et aux expectatives.

Il s'agit donc de détecter les attributs ayant la plus forte probabilité d'être utiles, voire essentiels, au décideur, mais que celui-ci ignore actuellement dans sa représentation de la situation.

Un autre niveau de détection concerne les possibles conflits inter-décideurs. Les agents informatiques, en communiquant entre eux, doivent être capable de détecter :

- les conflits de mesure forts et faibles, que nous avons présentés au paragraphe 5.2.2, et qui détermineront des attributs que le décideur doit, plus ou moins impérativement, vérifier, et qui s'ajouteront donc à la liste précédente,
- et les conflits d'identification qui remettent en question l'intégralité du processus de décision du décideur.

Notons que l'un des intérêts majeurs de cette fonction est la possibilité de faire coopérer [5] des décideurs par l'intermédiaire de leurs assistants, sans qu'aucune action de leur part ne soit requise, et donc, en anticipant potentiellement un ensemble d'interactions.

Au niveau collectif, la détection concerne la reconnaissance des effets de groupe que nous avons identifiés au paragraphe 2.3. Ainsi, la détection :

- d'une *censure* s'effectuera par l'observation d'un décideur qui possède une information détectée comme conflictuelle, mais dont la représentation n'évolue pas (ce qui serait un signe d'activité de confirmation ou d'infirmation autour de cette donnée problématique),
- d'un *effet de normalisation* s'effectuera par l'observation de choix d'attributs qui ne respectent pas les ensembles que l'agent a détecté comme pertinents, et qui n'explorent pas complètement les espaces de représentation,
- d'un *effet de polarisation* s'effectuera par l'observation d'un décideur qui modifie une décision qui était conflictuelle en une décision consensuelle.

[5] Nous faisons ici référence à ce que Schmidt (1991) appelle la coopération *confrontative* qui suppose que différents agents décident individuellement avec leurs données à propos d'un même objet, pour confronter ensuite leurs points de vue.

Suggérer

La détection d'attributs que le décideur devrait observer, ou d'une identification conflictuelle peut être suivie d'une action auprès du décideur. Cette action peut ne consister qu'en l'affichage d'un message d'information ou d'alerte concernant la détection elle-même, ou consister en des suggestions plus abouties résultantes du raisonnement abductif de l'agent. Une série d'expérimentations, dans le cadre du projet COMAPS [6], a ainsi montré que cette approche permet une augmentation notable des performances des décideurs (Le Saux, Lenca, Picouet, & Barthélemy, 1999 ; Le Saux, 2000).

Ainsi, la liste des hypothèses d'identification peut être une fois encore exploitée, pour que l'agent informatique, non seulement suggère au décideur certains attributs d'observation, mais également les identifications auxquelles différentes observations sur ces attributs pourraient le mener. S'il en a la possibilité, il serait même judicieux que l'agent acquièrent lui-même les données concernées, pour affiner ses suggestions, et améliorer la pertinence de son aide.

Notons, comme précédemment, que l'un des avantages de cette approche est d'anticiper les interactions entre décideurs, en leurs donnant les informations essentielles sur lesquelles ils peuvent être amenés à discuter.

Toutefois, il faudra être très prudent dans l'intégration de cette fonction au système d'aide. Selon le degré d'acceptation de ce système par les décideurs, de telles suggestions pourront être plus ou moins perturbantes, et le concepteur devra faire preuve de finesse dans leur intégration à l'interface homme-machine.

Expliciter

Cette fonction permet à notre système d'aide de se doter de fonctions de retour sur expérience. Les prises de décision peuvent être toutes individuellement enregistrées, pour être rejouées hors ligne, lors d'un debriefing.

Mais une remarque préalable est ici nécessaire. Nous avons insisté sur le fait que nous souhaitons apporter cette aide à des décideurs experts. Quel est alors l'intérêt d'une telle fonction de retour sur expérience ?

Il y a au moins deux réponses :

- premièrement, nous avons noté au paragraphe 3.3.1 que « l'expert n'est pas expert de son expertise » (Shanteau, 1988 ; Barthélemy & Mullet, 1994). Il semble alors pertinent de lui proposer un système qui lui expliciterait ses propres stratégies de décision.

[6] Cognitive Management of Anthropocentric Production System

- Deuxièmement, un tel système s'avère être un bon outil d'apprentissage pour les décideurs novices, qui peuvent ainsi être confrontés à des cas réels, associées aux décisions qu'un expert pourrait prendre.

L'explicitation des stratégies de décision *individuelles* aux décideurs permet donc, non seulement, à chaque décideur d'observer son *propre* savoir-faire, mais également celui de ses coéquipiers. Cette observation est à la base de la constitution de l'expertise :

- de l'individu, par l'acquisition de fonctions métacognitives de contrôle et d'évaluation de son processus de décision,
- de l'équipe, par une meilleure connaissance et compréhension des compétences des autres, qui permettra à son tour une meilleure coopération *implicite* entre les coéquipiers.

Les stratégies collectives peuvent également être explicitées, en retraçant les étapes de construction des consensus au sein de l'équipe. Les différents effets négatifs observés dans les décisions de groupe, peuvent ainsi être décodées, et analysées par l'équipe.

L'aide à la décision que notre instrument peut apporter, au niveau individuel et collectif, tient à la connaissance que nous possédons sur chaque décideur de ses règles de décision, et aux hypothèses que nous construisons sur sa représentation mentale de la situation, et sur ses décisions probables. Au niveau collectif, cette aide est aussi liée à la connaissance du réseau d'influence et des échanges entre les décideurs, et aux hypothèses que nous pouvons construire quant à d'éventuels phénomènes de groupe.

Il faut donc nous assurer qu'une conception du système permette l'acquisition, et le maintien au cours du temps, de ces modèles.

7.3 Méthodologie de conception

La conception des systèmes d'aide aux décideurs doit prendre en compte les fonctions que nous avons identifiées. Nous proposons, à cet effet, quatre phases nécessaires[7] de développement logiciel (Coppin, Cadier, & Lenca, 2007) :

apprentissage : l'intégration des modèles cognitifs de décision implique une phase d'apprentissage, durant laquelle les stratégies expertes sont extraites sous la forme de règles de décision.

[7]Par l'utilisation du terme « nécessaire », nous souhaitons faire remarquer que nous ne parlerons pas de la conception du système informatique dans son ensemble, mais seulement des étapes nécessaires à notre outil d'aide.

Sous-fonctions		Description
F1.1 : Observer	F1.1.1 : Enregistrer les données	L'agent doit enregistrer l'ensemble des données issues de l'environnement, et à destination du décideur.
	F1.1.2 : Analyser les traces	L'agent analyse les traces d'interaction homme-machine, pour déterminer les données saisies et utilisées par l'opérateur dans sa représentation de la situation.
F1.2 : Construire une représentation		L'agent construit une représentation de la situation supposée identique à celle du décideur à l'aide des données identifiées par la fonction F1.1.2.

TAB. 7.1 – Spécifications de la fonction F1 : *Observation et représentation*

Sous-fonctions	Description
F2.1 : Abduction d'un ensemble de règles probables	L'agent récupère, par abduction, un ensemble de règles de décision à partir de la représentation de la situation.
F2.2 : Construction d'une liste de décisions	L'agent ordonne la liste de règles par en fonction de leurs niveaux d'activation et en déduit une liste ordonnée de décisions probables.

TAB. 7.2 – Spécifications de la fonction F2 : *Raisonnement abductif*

Sous-fonctions			Description
F3.1 : Détecter	F3.1.1 : Attributs		L'agent utilise ses observations du décideur (F1.1) et les règles probables (F2.1) pour construire une liste d'attributs importants et détecter si le décideur les exploite.
	F3.1.2 : Conflits	F3.1.2.1 : Conflits de mesures	L'agent communique avec ses homologues pour détecter des conflits de mesure ou de décision.
		F3.1.2.2 : Conflits de décisions	
	F3.1.3 : Effets de groupe	F3.1.3.1 : Censure	Un conflit de mesure (F3.1.2.1) qui entraîne une modification de la représentation de la situation (F1.1) par le décideur permet de détecter un effet de censure.
		F3.1.3.2 : Normalisation	Un ensemble d'attributs utilisés par le décideur (F1.1.2) incohérent avec les attributs importants (F3.1.1) permet de détecter un effet de censure.
		F3.1.3.3 : Polarisation	La modification d'une décision suite à un conflit de décisions (F3.1.2.2) permet de détecter un effet de polarisation.
F3.2 : Suggérer	F3.2.1 : Attributs		Les détections d'attributs, de conflits et d'effets de groupe (F3.1) permettent à l'agent de suggérer des attributs que le décideur devrait observer en priorité.
	F3.2.2 : Décision		Ces mêmes détections, croisées avec les données observées de l'environnement (F1.1.1) permettent à l'agent de suggérer des décisions que le décideur devrait envisager.
F3.3 : Expliciter	F3.3.1 : Historique des décisions		Le système enregistre l'intégralité des événements constituant chaque prise de décision (c'est-à-dire concernant une piste donnée)
	F3.3.2 : Stratégies individuelles		Chaque décideur peut interroger son agent pour qu'il lui retrace son processus individuel de décision, en vis-à-vis des données qu'il a, ou non, utilisées, de celles que possédait ses coéquipiers. Une attention particulière sera donné à l'explicitement des effets de groupe.
	F3.3.3 : Stratégies collectives		

TAB. 7.3 – Spécifications de la fonction F3 : *Aide aux décideurs*

structuration : la fonction d'aide nécessite que le système permette la structuration et l'affichage des règles de décision de chaque décideur, pour lui-même ainsi que pour les autres membres de l'équipe.

adaptation : comme pour tout processus d'apprentissage à partir d'une quantité limitée de données, les résultats de la première phase doivent être considérés comme une approximation des stratégies réelles du décideur. De plus, les experts sont supposés évoluer avec le temps, en fonction des changements de contexte, et de leurs propres changements, pour permettre à leurs compétences d'être toujours au même niveau de performance. Un processus d'adaptation est donc nécessaire pour maintenir la cohérence des règles de décision avec les décideurs.

exploration : en parallèle des capacités de structuration et d'affichage des règles de décision, le système doit permettre l'exploration, si nécessaire hors-ligne lors de debriefing, de l'espace de décision de chaque décideur, et de la façon dont ses règles de décision le structure. Cette exploration doit également avoir une dimension collective, pour permettre de reconstruire la dynamique d'établissement de consensus au sein de l'équipe.

7.3.1 Apprentissage des modèles de décision

Cette première phase consiste, vis-à-vis de la terminologie de la théorie de l'activité, en l'extraction des *schémas d'utilisation* auprès des décideurs experts. Toutefois, l'apprentissage de ce type de connaissance, notamment en environnement bruité, est un problème délicat, et deux approches sont possibles.

La première consiste à imposer une représentation structurelle des connaissances. Elle doit être choisie et constituée pour être cognitivement valide, mais également pour permettre des raisonnements artificiels d'agrégation de décisions, tel que le calcul de consensus. Nous avons présenté un exem-
ple de cette approche au paragraphe 6.1, avec le projet SMA2 (Coppin & Skrzyniarz, 2003 ; Skrzyniarz, 2003), qui utilisait des arbres de décision pour représenter l'expertise des décideurs, et autoriser des algorithmes de consensus par négociation.

La seconde s'appuie sur une observation non intrusive des décideurs telle que nous l'avons décrite ci-dessus, à partir des traces informatiques des interactions homme-machine. Avec cette approche, l'adaptation (éventuellement continue) d'un modèle générique de décision, tel que celui que nous avons développé, est possible. Elle permet de plus d'éviter le biais

classique de verbalisation de leurs compétences par les experts (cf. paragraphe 3.3.1), et d'améliorer le dialogue homme-machine en donnant le « bon vocabulaire » au système informatique (Le Saux, Lenca, & Picouet, 2002 ; Le Saux, Lenca, Barthélemy, & Picouet, 1998).

Le système d'aide aux décideurs doit donc intégrer des fonctions d'apprentissage, spécifiques au modèle de décision choisi. Dans notre cas, l'apprentissage des règles de décisions est possible à l'aide d'algorithmes et d'outils dédiés (Pichon, Lenca, Guillet, & Wang, 1994 ; Lenca, 1995, 1997), basé sur le principe de monoticité de notre modèle (cf. paragraphe 1.3.3). Ces outils ont montré, lors de précédents projets, leur capacité à extraire un ensemble de règles de dominance *satisfaisant* (Lenca, 1997 ; Le Saux *et al.*, 1998) :

- du point de vue du *pouvoir prédictif* du modèle, par comparaison des hypothèses du modèle avec les décisions réellement prises par les décideurs experts,
- et du point de vue de l'acceptation du modèle par le décideur.

Au niveau collectif, nous avons proposé la modélisation des interactions inter-décideurs par le biais d'un modèle d'influence. Les paramètres de ce modèle peuvent également être appris. Néanmoins, les techniques d'apprentissage automatisées ne seront pas aisément applicables, et une approche supervisée donnera de meilleurs résultats, en évitant que des cas particuliers de processus distribué ne viennent perturber l'apprentissage. Par exemple, il est courant en patrouille maritime que l'identification de piste ne requièrent pas l'intervention de tous les décideurs, et ces situations ne constituent pas pour autant des cas de censures, ou des effets de minorités actives.

7.3.2 Structuration des stratégies...

La deuxième phase consiste en l'implémentation de capacité de structuration et d'affichage des modèles extraits précédemment.

... guidée par des intérêts individuels

Individuellement, chaque décideur doit disposer d'outils d'affichage des suggestions que l'agent, qui lui est affecté, est capable de construire. Rappelons que ces suggestions peuvent prendre différentes formes :

- des dimensions d'observation qui ont été détectées comme pertinentes,

- des identifications possibles, obtenues par abduction sur la représentation de la situation.

La suggestion de dimensions d'observation pourra être effectuée de deux façons : soit par la mise en évidence des attributs concernés, soit, à l'opposé, en masquant les informations sur lesquelles le décideur est en train de travailler, comme le proposent certaines études sur le syndrome de persévération (Le Blaye *et al.*, 1999 ; Dehais, 2004 ; Dehais, Goudou, Lesire, & Tessier, 2005).

La présentation des hypothèses d'identifications nécessitera quant à elle un affichage direct, si possible intégré à la schématisation existante du système informatique. Cette approche a été par exemple utilisée pour l'implémentation du prototype SMA2 (cf. paragraphe 6.1), et présente l'avantage d'être peu perturbant pour les décideurs, qui n'ont pas à apprendre une nouvelle symbolique pour travailler de paire avec l'outil d'aide.

Dans les deux cas, il doit être possible, à la demande du décideur, d'afficher les règles de décision qui ont menées à ces suggestions, ainsi que les données sur lesquelles l'agent a construit sa représentation de la situation. Le décideur peut alors, s'il le souhaite, modifier les données sur lesquelles son assistant travaille, pour obtenir de nouvelles suggestions.

... guidée par des comportements collectifs

Au niveau collectif, une fonction attendue du système, et décrite ci-dessus, est la capacité à utiliser les hypothèses générées par un agent affecté à un décideur, pour aider d'autres décideurs. La mise en œuvre est toutefois délicate, puisqu'il s'agit de faire coopérer des agents, ou des décideurs, qui n'ont pas les mêmes domaines d'expertise. Ceci se traduit, dans le cas de nos modèles, par des interactions entre des espaces de représentation qui n'ont pas nécessairement d'intersection, et qui devront donc se baser sur des informations différentes. Notons que ces influences ne doivent d'ailleurs pas être sous-estimées, comme le suggère notre simulation d'un consensus extrême (cf. paragraphe 6.3.3), qui fait clairement apparaître l'influence d'une information sur la neutralité présumée du contact.

Pour parvenir à ces « traductions », le système doit être capable de faire appel à un ensemble de connaissances dites de *haut niveau*, en référence à leur caractère plus symbolique que les données liées aux échelles d'attractivité, à partir desquelles elles vont être obtenues. Dans notre exemple simulé de consensus extrême, il a été nécessaire, par l'intermédiaire d'une base de données, d'obtenir des informations sur les différents niveaux de classification OTAN de la piste pour que l'interaction soit possible.

La deuxième fonction attendue au niveau collectif est la capacité à informer chaque décideur de son implication, ou non, dans un effet de groupe. Le système comportera donc des moyens d'informer chaque décideur, le cas échéant, qu'il est censuré, ou qu'il censure, qu'il est en dehors de, ou qu'il participe à une minorité active, etc.

Cette structuration, au niveau collective, offrira ainsi aux décideurs la possibilité de mieux gérer leurs comportements de groupe.

7.3.3 Adaptation aux comportements individuels

Les bases de règles de décision extraites n'ont qu'une validité limitée dans le temps. Le système doit donc intégrer des fonctions d'adaptation et de mise à jour des connaissances.

Cette fonction, au même titre que la fonction d'apprentissage, et pour les mêmes raisons, doit être envisagée de façon non intrusive, par le biais des interactions homme-machine, et des incohérence détectées entre les hypothèses obtenues par abduction et les décisions finales du décideur.

Une attention particulière sera donnée à la conservation de la cohérence de la base de règles, durant sa mise à jour, sans quoi l'adaptation ne consisterait qu'en une extension. Heureusement, le principe de monotonicité nous permet une fois encore d'envisager cette fonction sereinement, par le biais de deux sous-fonctions (Le Saux, 2000) :

- mise à jour d'une règle existante en fonction de nouvelles informations,
- suppression d'une règle obsolète.

De la même façon, au niveau du modèle d'interaction, le système devra mettre en œuvre des fonctions d'adaptation, en fonction des phénomènes observés et des résultats obtenus par l'équipe. Notons que, comme pour l'apprentissage, il sera bon que la mise à jour du modèle d'interaction soit supervisée.

7.3.4 Exploration de l'espace de décision

Cette phase de conception subit moins de contraintes, puisque les fonctions d'exploration seront exploitées hors ligne, lors de debriefing visant à expliciter les décisions individuelles et collectives qui ont été prises.

Le système devra ainsi, simplement, être capable d'enregistrer un historique complet des décisions et des données les ayant amenées. Il permettra également de croiser chacun de ces événements, d'une part avec les

bases de règles de chaque décideur, et d'autre part avec les phénomènes de groupe qui auront été identifié.

Chapitre 8

Bilan et perspectives

En conclusion de ce document, nous souhaitons présenter une synthèse de nos travaux, mais également y distinguer des éléments de perspectives sur lesquels il nous semble pertinent de compléter, ou poursuivre, l'étude.

8.1 Bilan

Nous avons présenté et soutenu une vision particulière des *systèmes d'aide aux décideurs* qui s'appuie sur une modélisation cognitive et psychosociale de la décision distribuée. Cette approche a pour objectif de replacer les équipes de décideurs experts dans la boucle de conception et d'utilisation des systèmes informatiques, à une époque où la *technique* s'immisce dans tous les domaines, et s'impose peu à peu pour elle-même, et non comme un outil.

Il s'agit alors de rétablir l'équilibre dans les *interactions* homme-machine : l'effort d'adaptation ne doit pas se résumer à celui du décideur envers la machine, et la *coopération* homme-machine n'est envisageable que si les outils informatiques, par le biais de systèmes d'aide, sont capables de comportements pro-actifs envers les décideurs, pour leur fournir une aide appropriée et adaptée.

En nous appuyant sur la théorie de l'activité présentée au paragraphe 3.3.2, nous avons pu identifier une approche pour cet objectif : il s'agit d'identifier les *schémas d'utilisation* de l'artefact par les décideurs, et de donner les moyens à l'outil informatique d'utiliser cette nouvelle connaissance pour améliorer son dialogue avec ses utilisateurs.

En nous appuyant, essentiellement, sur les travaux de Barthélemy et

Mullet (1986) et Klein (1989), nous avons développé au chapitre 4 des modèles cognitifs de décision qui permettent de décrire :

- le processus de décision distribuée d'un expert comme la *recherche d'une bonne règle de décision* par ecphorie distinctive,
- et les interactions au sein de l'équipe sous la forme d'*influences inter-décideurs* sur ce processus.

Ces modèles nous ont alors permis d'identifier les *schémas* dont nous avions besoin, sous la forme des règles de décision propres à chaque décideur expert. Nos simulations en patrouille maritime (cf. paragraphe 6.2) ayant validé ces modèles, notamment vis-à-vis des situations étudiées dans le domaine de la prise décision dite « écologique », nous avons pu au chapitre 7 spécifier un système d'aide aux décideurs et proposer une méthodologie de conception basée sur un système multi-agents :

- Chaque décideur se voit affecter un assistant sous la forme d'un agent autonome dont le rôle est de l'aider dans sa tâche de décision.
- Des algorithmes et outils dédiés permettent l'extraction des règles de décision de cet expert, ainsi que leur mise à jour régulière (voire continue) pour rester en cohérence avec l'expertise du décideur.
- Notre modèle cognitif de décision permet l'implémentation des fonctions d'aide proposées au paragraphe 7.2 au sein des agents autonomes :
    - ils observent les décideurs auxquels ils sont affectés, et construisent des représentations de la situation à l'aide de ces observations,
    - ils raisonnement par abduction (suivant notre modèle de décision) sur l'ensemble des règles, à partir de leur représentation de la situation pour construire des hypothèses,
    - ils utilisent ces hypothèses et leurs observations du décideur pour lui suggérer des attributs d'observation et des décisions pertinentes.
- Enfin, notre modèle d'interaction permet aux différents agents de coopérer de façon autonome, pour améliorer la coopération au sein de l'équipe en favorisant la dynamique inter-décideurs, et aider les décideurs à replacer leurs comportements dans une logique de groupe plus globale.

8.2 Perspectives

8.2.1 Prototype et intégration à AMASCOS

Nos modèles ont été *confrontées* à des simulations informatiques. Néanmoins, nous avons supposé que notre système d'aide tirera son efficacité de l'interaction des agents avec les décideurs. Moyennant quoi, seules des expérimentations avec une équipe opérationnelle de décideurs experts pourront *valider* notre approche :

- le modèle cognitif de décision : des projets tels que COMAPS (Le Saux *et al.*, 1998) ont permis de valider des modèles de décision proches du nôtres, mais il ne faut pas pour autant négliger cette validation qui passera par des tests qualitatifs sur les algorithmes de raisonnement des agents,
- le modèle d'interaction : ce modèle est sensé apporter au système d'aide une maîtrise de la dynamique inter-décideurs, mais son instanciation sera délicate puisque l'apprentissage des paramètres de ce modèle ne pourra se faire sans une supervision, et donc un biais,
- le système d'aide : des tests avec et sans le système d'aide aux décideurs doit montrer que les performances de l'équipe s'améliorent lorsque les décideurs sont assister de leurs agents informatiques.

La perspective associée à cette remarque présente un triple objectif :

- faire préalablement évoluer notre outil de simulation pour être capable de le connecter au démonstrateur AMASCOS,
- développer un prototype de système d'aide aux décideurs sur nos spécifications, également connecté au démonstrateur,
- et enfin, mener des expérimentations en conditions réelles avec un équipage de patrouille maritime opérationnel, seul à même de confirmer, ou d'infirmer notre approche.

8.2.2 Faire coopérer différents modèles de décision

Nous avons évoqué la possibilité théorique de faire « cohabiter » différents modèles de décision dans notre système d'aide aux décideurs (cf. paragraphe 6.1.3). Cette possibilité est ouverte par le fait que notre postulat de coopération entre les décideurs, c.-à-d. la dynamique inter-décideurs, repose sur l'existence d'échanges d'informations et de leurs implications sur les processus décisionnels des individus.

Ainsi, nous avons proposé un modèle de décision cognitif basé sur le traitement d'information et l'activation de règles de décision par ecphorie distinctive. Néanmoins, dans d'autres situations que celles de la décision « écologique » que nous avons souhaité traiter, d'autres modèles de décision peuvent s'avérer plus adaptés : modèles multi-critères pour les tâches de choix, à la charge de décideur professionnel (le choix d'emplacement d'une centrale nucléaire en est un exemple classique, modèles de fusion de classifieurs pour certaines tâches de classification ou de reconnaissance (Ruta & Gabrys, 2000), arbres de décision pour la catégorisation comme dans le projet SMA2 (Skrzyniarz, 2003), etc.

L'interaction entre ces différents modèles offrirait alors la possibilité de construire des systèmes d'aide aux décideurs, quand bien même leurs tâches seraient très hétérogènes. Le système multi-agents de SMA2 s'est avéré efficace dans sa capacité à proposer des identifications au TACCO d'une équipe de patrouille maritime, et nos modèles devraient permettre d'améliorer la dynamique d'établissement d'une identification entre des opérateurs-capteur. Il serait alors intéressant de construire un pont entre ces modèles.

8.2.3 Pouvons-nous faire quelque chose pour les novices ?

Notre approche de conception des systèmes d'aide aux décideurs est fondée sur la notion d'expertise dans la décision, qu'elle soit individuelle ou collective. La notion même de *règle de décision* est remise en question dès lors que le décideur est un novice. Nous aimerions néanmoins aborder deux problématiques :

- le système d'aide aux décideurs que nous avons constitué peut-il servir d'outil de formation aux novices ?
- la connaissance des processus cognitifs de la prise de décision experte apporte-t-elle des indices sur la décision néophyte ?

Des expérimentations lors du projet COMAPS (Le Saux *et al.*, 1998), dans un contexte mono-opérateur, apportent un premier élément de réponse à la première question. Nous souhaiterions donc pouvoir suivre la même voie sur notre système collectif. Cela nécessitera de disposer au sein du système d'aide, d'un mode de fonctionnement dit *prescriptif* dans lequel les agents, au lieu de simplement suggérer lorsque le décideur est expert, pourra bloquer les décisions du novice lorsqu'elles sont en désaccord avec la base de règles extraites préalablement auprès d'un expert.

Les fonctions de retour sur expérience prendront également une autre dimension en permettant au décideur novice de comprendre ce qui caractérise ses erreurs par rapport à ce qu'un expert aurait pu faire.

En revanche, la deuxième problématique est, à notre connaissance, ouverte. Néanmoins, comme nous en avions pris note en introduction, l'approche descriptive de la décision experte à travers des modèles d'activation de règles de décision permet une approche du problème. En effet, si ce qui différencie un expert d'un novice est l'existence et la stabilité des règles de décision chez l'un, et leur absence chez l'autre, il paraîtrait pertinent d'étudier le processus de construction et de stabilisation de ces règles de décision pendant l'acquisition de l'expertise.

Annexes et références

Annexe A

L'incident du *Vincennes*

(Texte traduit de Klein (1998, chap. 6))

Le matin du 3 juillet 1988, le *Vincennes*, navire de guerre de l'armée des États-Unis, a tiré deux missiles sur un Airbus iranien A300, le vol 655, qui avait décollé de l'aéroport de Bandar Abbas. L'heure de départ était 10h17, heure locale. Les missiles ont été tirés à 10h24. Le vol a duré sept minutes et huit secondes. Approximativement trois minutes et neuf secondes se sont écoulées entre l'instant où la piste radar a été jugée tactiquement significative par l'équipage tactique du *Vincennes*, et l'instant où les missiles ont été lancés. Peu après, le *Vincennes* et le reste du monde apprenaient que la *piste radar* était un vol commercial, sur un horaire régulier entre Bandar Abbas et Dubaï, dans les Émirats Arabes.

A.1 Événements antérieurs

Les hostilités entre les militaires iraniens et la flotte américaine s'étaient progressivement, mais fortement, aggravées. En plus d'un incident impliquant le *Vincennes* et des F-4 iraniens venus le provoquer le 18 avril 1988, une bataille avait eu lieu dans la même zone du golfe persique, impliquant un autre navire américain, le *Wainwright*. Durant cet incident, des missiles avaient été tirés, endommageant un F-4 iranien. Mi-juin 1988, les iraniens avaient transféré des F-14 à l'aéroport de Bandar Abbas, qui était dès lors utilisé conjointement pour des activités militaires et civiles. Une fois, un F-14 iranien, volant en direction d'un croiseur américain, avait reçu des avertissements, et avait finalement interrompu son vol vers le navire après avoir été verrouillé par le radar de contrôle de feu. Lors d'un autre incident, un vol commercial avait décollé depuis Bandar Abbas, accompagné d'un F-4 iranien volant juste sous lui, pour éviter les radars. La flotte améri-

caine avait finalement modifié ses règles d'engagement après qu'un navire américain *Shark* eut été frappé par un tir d'avion de combat iranien. Les nouvelles règles donnaient plus de liberté aux commandants pour prendre des mesures de défense, même en dehors de tirs ennemis.

Une autre issue possible lors d'un incident est l'utilisation d'un système d'Identification Ami ou Ennemi (IAE) pour distinguer les avions. Les avions commerciaux et militaires embarquent des équipements électroniques destinés à signaler leurs caractéristiques. Si un autre appareil envoie une requête, l'avion répondra. Aux États-Unis, si le type de la réponse est un Mode IV, cela indique que l'avion est militaire et ami, configuré préalablement avec le mot de code du jour. Les avions commerciaux sont équipés pour renvoyer des signaux en Mode III. Un avion militaire d'un autre pays doit renvoyer un signal en Mode II. Néanmoins, dans le passé, la flotte américaine avait pu observer des avions militaires iraniens renvoyer des signaux en Mode III, prétendant donc être commerciaux.

De plus, il y avait eu de récentes opérations américaines envers les iraniens, les irakiens avaient enregistré quelques succès militaires, et les services de renseignement indiquaient que les iraniens pourraient engager quelques actions provocatrices pendant le week-end du 4 juillet, peut-être des attaques de type kamikaze envers les navires. Le Corps de Garde Révolutionnaire iranien avait commencé une série d'attaques contre des navires commerciaux dans la soirée du 2 juillet 1988, laissant présager des actions de plus grande envergure. La situation était en place.

Le 3 juillet 1988, le navire américain *Elmer Montgomery* s'est trouvé entouré et attaqué par treize navires de type canonnier appartenant à la flotte iraniennes. À 10h00, le *Vincennes* se trouvait à une distance de 35 à 40 milles marins du *Montgomery*. Il mit le cap vers ce dernier pour l'aider, et envoya un hélicoptère en avant pour inspecter la situation. L'hélicoptère essuya des tirs, et le *Vincennes*, en entrant dans la zone des combats, fut également attaqué par les navires iraniens. Ceux-ci se divisèrent en deux groupes et un combat de surface débuta.

Il peut sembler étrange que le *Vincennes*, un grand croiseur, puisse être inquiété par de petits canonniers, mais sa tâche est la guerre anti-aérienne. Il n'a pas été construit pour de petites et rapides cibles de surface ; le feu des canonniers pouvaient endommager sa superstructure et blesser des marins. Le *Vincennes* n'avait que deux canons utilisables pour faire feu sur les navires iraniens. De plus, l'un des deux s'enraya, obligeant le navire à manœuvrer pour mettre l'autre en position de tir. Voila la situation de surface vers laquelle l'Airbus volait.

A.2 Le vol de l'Airbus

L'Airbus iranien décolla à 10h17, heure locale, vingt-sept minutes après son heure de départ prévue. Son plan de vol l'a mené directement sur le *Vincennes*. Le vol 655 a poursuivi son ascension jusqu'à 12 000 pieds, en chemin vers l'altitude de 14 000 pieds, quand il a été abattu. Voici la chronologie des événements de ce matin là.

10h17 Le système informatique embarqué du *Vincennes* classa la piste radar comme « inconnu, présumé ennemi », parce que l'avion décollait d'un aéroport iranien à usage mixte. Le système du *Vincennes* lui attribua le numéro de piste 4474. (Chaque objet dans le système informatique – que ce soit un avion, un navire de surface ou un sous-marin – se voit attribuer un numéro, qui lui sert de nom. Ce numéro permet aux différents membres d'équipage de savoir qu'ils parlent du même objet.)

10h18 Un second navire dans la zone, le *Sides*, attrapa la piste radar, et lui assigna un numéro différent, le 4131. Le système informatique en réseau jugea que les pistes 4474 et 4131 représentaient le même avion. Le système lui assigna le numéro 4131, celui attribué par le *Sides*, plutôt que celui que le *Vincennes* utilisait. Il n'est pas certain que cette modification de numéro ait été annoncé via le réseau de communication interne du *Vincennes*. Dans le même temps, l'un des membres du *Vincennes* vérifia les horaires de vols commerciaux et nota que le vol 655 était supposé décoller à 9h50. Aucun avion de ligne n'était programmé pour partir de Bandar Abbas à 10h17. Également pendant ce laps de temps d'une minute, le *Vincennes* nota la présence dans la zone d'un avion iranien P-3. Les P-3 ont des fonctions de surveillance et peuvent être utilisé pour diriger d'autres avions en cours de mission. L'Airbus était alors à 40 milles marins du *Vincennes*.

10h19 Le *Vincennes* fit sa première sommation à l'avion inconnu, l'avertissant d'éviter la zone. Durant les minutes suivantes, il le somma plusieurs fois, utilisant des fréquences radio militaires et civiles. La piste radar n'a jamais répondu à ses sommations. Le capitaine Rogers du *Vincennes* jugea cela inhabituel. Dans le passé, il avait averti par deux fois des avions commerciaux, et avait pour chacun reçu une réponse. Il supposait que les pilotes de vols commerciaux surveillaient régulièrement la fréquence internationale de détresse, comme ils sont supposés le faire. Le *Vincennes* aurait pu essayé d'appeler le contrôle du trafic aérien, mais il n'avait pas à bord de radio supplémentaire lui permettant de l'appeler en même temps que la piste radar incriminée.

10h20 A cet instant, plusieurs membres d'équipage dans le Centre Informatique de Combat (CIC) du *Vincennes* indiquèrent avoir vu un signal de Mode II en provenance de l'IAE, laissant supposer qu'ils avaient à faire

à un avion militaire iranien, probablement un F-14. Cette identification fut également communiquée à travers le réseau vocal interne. La décision d'engagement aérien débuta véritablement à cet instant, avec l'idée que le *Vincennes* était confronté directement à un F-14 ignorant ses avertissements radio. Tout le monde n'a pas accepté ce jugement. Un membre d'équipage a dit au capitaine Rogers qu'il pensait que la piste était un avion de ligne commercial, en se basant sur un signal en Mode III qu'il aurait vu.

L'officier d'action tactique en charge de la gestion de la guerre aérienne demanda à ce que le *Vincennes* se défende en lançant des missiles sur la piste radar quand celle-ci s'approcherait à moins de 20 milles marins. Le capitaine rejeta la requête. L'avion n'utilisait aucun des systèmes associés habituellement à des actions agressives, tels que des radars de recherche ou de contrôle de feu. La mission de Rogers était de réduire les conflits, pas de les aggraver. Il voulait plus d'informations avant de faire feu, même si cela signifiait ajouter des risques. Il avait confiance dans le système informatique. De plus, il ne croyait pas qu'un pilote de chasse puisse attaquer un navire aussi sophistiqué que le *Vincennes* avec autant d'insouciance. Le *Vincennes* tourna son radar de contrôle de feu, pour se préparer, au besoin, à faire feu sur l'avion, mais aussi pour avertir le pilote qu'il était dans la ligne de mire du *Vincennes*. L'avion ne répondait toujours pas aux avertissements radio. Plus encore, il s'écartait du centre du corridor aérien commercial. Le corridor est large de 10 milles marins et la piste radar était dans cet espace, mais en règle générale un avion commercial vole parfaitement sur la ligne centrale « comme un insecte sur un fil », décrivit le capitaine Rogers. À l'instant où il a été frappé par les missiles, l'avion était à $3,35$ milles marins du centre, donc toujours dans le corridor aérien, en direction du *Vincennes*.

10h22 Le capitaine Rogers demanda, « Qu'est-ce que 4474 est en train de faire ? » Plusieurs membres d'équipage à bord du *Vincennes* reportèrent que l'avion perdait maintenant de l'altitude, un mauvais signe, tandis qu'un vol commercial aurait dû continuer à monter. Selon ces membres d'équipage, la piste adoptait un profil classique d'attaque, accroissant sa vitesse, diminuant son altitude, et se rapprochant. Néanmoins, quelques membres d'équipage virent la piste encore accroître son altitude. En tout cas, le *Vincennes* était à présent dans le rayon d'action de missiles air-mer que l'avion aurait pu transporter.

10h24 Le capitaine Rogers ne put plus attendre. Ses propres armements deviendraient inefficaces si l'avion se rapprochait encore. Il avait attendu jusqu'au dernier moment possible. Il ordonna que les missiles soient à présent tirés. L'Airbus fut frappé à 13 500 pieds, à huit milles marins de distance.

A.3 Ce que l'on apprit plus tard

Le *Vincennes* travaillait avec deux informations erronées : le vol 655 n'a jamais envoyé de signal IAE en Mode II, et il n'est jamais descendu. Le *Sides*, non loin de là, ne s'est d'ailleurs pas trompé, et a correctement identifié l'avion comme étant un vol commercial régulier.

La première erreur est facile à expliquer. L'un des membres d'équipage du CIC du *Vincennes* a pour charge d'identifier les pistes radar. Il utilise son pointeur télécommandé pour questionner le transpondeur de l'avion, via le système IAE. Il accrocha le vol 655 à son départ de Bandar Abbas, mais le laissa accroché pendant presque 90 secondes. Vu le fonctionnement du système, le pointeur resta positionné sur la fin de la piste d'envol de l'aéroport de Bandar Abbas, même si l'Airbus se dirigeait vers le *Vincennes*. Durant ce temps, les avions au sol pouvaient être interrogés par le système IAE. Si un avion militaire s'est trouvé positionné dans la zone de vision du système, il pouvait répondre avec un signal en Mode II. Par coïncidence, un avion militaire iranien décolla de Bandar Abbas juste au moment où le *Vincennes* reçut sa réponse en Mode II. L'avion militaire était bien l'origine de ce signal.

La seconde erreur est plus complexe à appréhender : juger que l'Airbus descendait. En fait, il a pris de l'altitude pendant toute la durée de son vol, avant d'être frappé par les missiles. Le système informatique reporta une ascension continue, et c'est ce que vit le *Sides*. La réponse semble être qu'un second avion vint causer la confusion. Rappelons que lorsque le *Sides* détecta lui aussi la piste radar de l'Airbus, il lui assigna le numéro 4131, alors que le *Vincennes* lui avait attribué le 4474. Dans un cas comme celui-ci, le système informatique *recycle* le numéro non utilisé pour d'autres identifications. Par malchance, il semble qu'un A-6 américain, à plusieurs centaines de milles marins de là, en pleine descente et accélération, se vit attribuer le numéro 4474. Ainsi, lorsque le capitaine Rogers demanda ce que 4474 faisait, il descendait. Mais ce n'était pas l'Airbus. Il faut de plus ajouter à cela la piètre qualité des affichages du système informatique du CIC, ou l'altitude n'était affichée que sur quatre digits (« 13 000 pieds » était donc affiché 1300), perdue dans une longue liste d'information descriptive.

Une autre question importante est celle du silence de l'avion face aux avertissements. Une hypothèse est que sur un vol si court, le pilote ait gardé une oreille de son casque branché sur le contrôle aérien de l'aéroport de départ, Bandar Abbas, et l'autre sur le contrôle aérien d'arrivée, Dubaï. Ceci l'aurait empêché de vérifier la fréquence de détresse internationale, et de répondre aux sommations.

Annexe B

Le simulateur

Le simulateur développé durant nos travaux est basé sur une approche générique permettant la simulation de *tout système d'agents autonomes dont les interactions autour d'une tâche distribuée s'effectuent par échanges de messages*.

Cette annexe en propose une description technique, ainsi que de l'exemple d'implémentation que nous avons utilisé pour nos simulations de la tâche d'identification en patrouille maritime.

B.1 Architecture

Quatre classes ont été nécessaire à l'implémentation de notre simulateur (cf. figure B.1 pour les trois classes présentées au paragraphe 6.2.2) :

Agent cette classe permet la définition d'un agent par le biais d'un diagramme de flux ;

System cette classe donne accès à l'environnement aux agents, et gère les échanges de messages ;

Environment cette classe contient les accès aux données qui seront manipulées par les agents, et implémentent les méthodes permettant au système d'y accéder ;

Controller cette classe contient le point d'entrée du simulateur, construit l'environnement, le système et les agents à partir d'un fichier d'initialisation, et propose l'interaction avec l'utilisateur.

Les descriptions se limitent aux éléments concernant la simulation. D'autres attributs et méthodes de classes ont évidemment été nécessaires à l'implémentation de l'outil. Néanmoins, il ne nous a pas semblé opportun de surcharger ici les diagrammes.

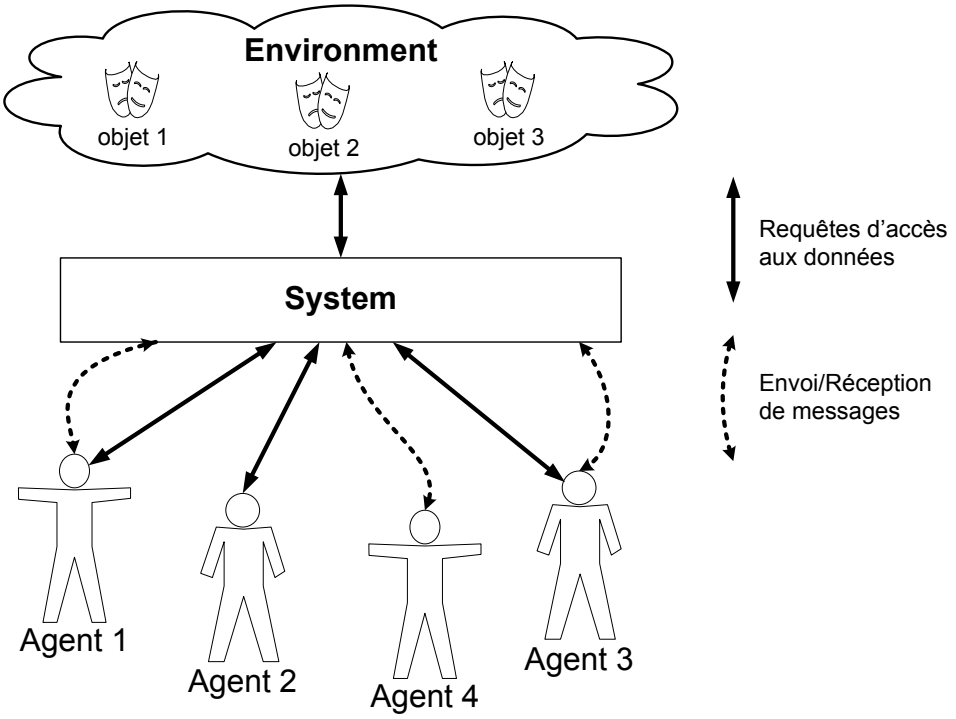

FIG. B.1 – Exemple d'interactions des classes Agent, System et Environment

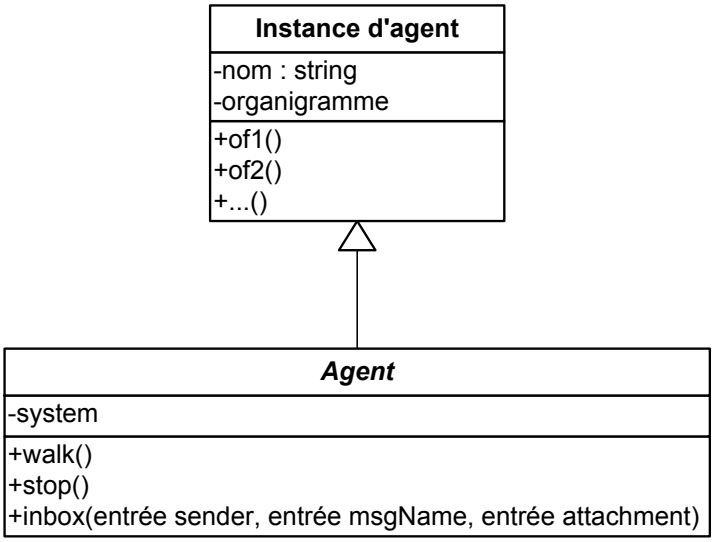

FIG. B.2 – Diagramme UML de la classe Agent

La programmation du prototype a été effectué dans le language Python (version 2.5), choisi pour sa simplicité syntaxique qui permet aux moins aguerris de l'utiliser, et dont les performances restent très bonnes bien qu'il soit interprété, et non compilé.

B.1.1 Classe Agent

Cette classe abstraite (doit être instanciée) est représentée figure B.2. Elle encapsule deux thread :

- le premier implémente le processus de décision ;
- le deuxième gère la réception de message.

Thread de décision

Pour être instancié, ce thread a besoin :

- du nom de l'agent : chaîne de caractère identifiant l'agent de façon unique ;
- du diagramme de flux de décision et des méthodes associées (notée of*i*() sur le schéma B.2) : le processus de décision de l'agent est codé sous la forme d'un diagramme de flux contenant deux types de nœuds (cf. figure B.9 pour un exemple) :

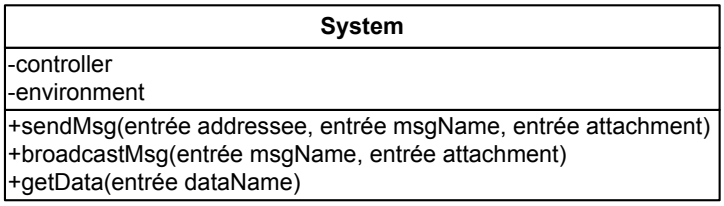

FIG. B.3 – Diagramme UML de la classe System

action : ce nœud possède un (ou zéro pour le nœud de départ) prédécesseur et un (ou zéro pour le nœud de fin) successeur, et se destine à un traitement sur les données ;

décision : ce nœud possède un prédécesseur et deux successeurs, et implémente une fonction de choix du successeur.

L'interface de contrôle de l'agent utilisée par le contrôleur est défini par deux méthodes :

walk() qui provoque l'exécution du prochain nœud ;

stop() qui provoque l'arrêt du processus de décision.

L'agent possède enfin un attribut system qui est une référence vers une instance de la classe System, qui lui permettra l'envoi de messages, et des requêtes de données destinées à l'environnement.

Thread de réception de message

Grâce à ce thread, les messages sont reçus de façon asynchrones vis-à-vis du processus de décision, via la fonction suivante appelée par l'instance de la classe System donnée par l'attribut system :

inbox() qui reçoit en argument le nom de l'agent qui a émis le message, le nom de ce message et une pièce jointe. Pour que l'agent associe un comportement à la réception de ces messages, cette méthode devra être surchargée.

B.1.2 Classe System

Cette classe (cf. figure B.3) est l'interface :

- des agents entre eux, en offrant des possibilités d'envoi de messages, et en assurant leur distribution ;
- des agents avec l'environnement en transférant les requêtes de lecture de données des agents vers l'environnement.

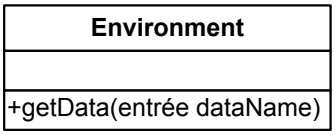

FIG. B.4 – Diagramme UML de la classe Environment

Gestion des messages

Le système possède deux méthodes d'envoi de messages qui peuvent être appelées par un agent :

sendMsg() qui permet l'envoi d'un message nommé, accompagné d'une pièce jointe, à *un autre* agent spécifié par son nom ;

broadcatMsg() qui permet l'envoi d'un message nommé, accompagné d'une pièce jointe, à *tous* les autres agents de l'équipe.

Lorsqu'un agent demande l'envoi d'un message par l'intermédiaire de l'une de ces méthodes, le système interroge le contrôleur pour connaître la liste des agents présents via la méthode getAgent(), et obtenir une référence vers le (ou les) destinataire(s) dont il appellera la méthode inbox().

Requête de données

Lorsqu'un agent souhaite « faire une observation » dans l'environnement, c.-à-d. obtenir la valeur d'un attribut, il s'adresse au système par l'intermédiaire de cette fonction :

getData() qui prend en argument le nom de l'attribut dont la valeur est requise.

B.1.3 Classe Environment

Lors de son instanciation, cette classe (cf. figure B.4) reçoit l'intégralité des données permettant la description de tous les objets attendus dans l'environnement.

La classe implémentant l'environnement traite les requêtes de données de la part du système. Cette donnée sera, en pratique, lue depuis un fichier, ou acquise via une base de données...

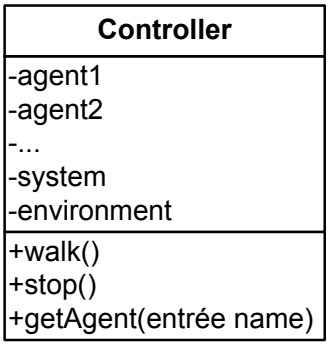

FIG. B.5 – Diagramme UML de la classe Environment

B.1.4 Classe Controller

Cette classe est chargée d'instancier les classes Environment, System et Agent en fonction d'une description contenu dans un fichier qui contient :

- la liste des données (types et valeurs) nécessaires à la création de l'environnement ;
- la liste des agents (nom et fichier de description du diagramme de flux), le système et l'environnement à instancier.

Elle constitue également le point d'entrée du simulateur, et permet son exécution pas à pas via les méthodes :

walk() entraîne l'exécution de la méthode walk() de chaque agent ;

stop() entraîne l'exécution de la méthode stop() de chaque agent. Quand tous les agents sont terminés (volontairement ou en réponse à cette méthode), le contrôleur provoque la fin du programme.

Après chaque exécution de la méthode walk(), le contrôleur se met en attente de fin d'exécution des méthodes équivalentes des agents. Ainsi, lorsque l'utilisateur récupère la main, tous les threads en cours sont en attente.

Le diagramme UML intégrant les quatres classes décrites ci-dessus est donné figure B.6.

B.2 Pattern observer

Notons qu'une architecture d'enregistrement des traces informatiques de l'exécution des simulations a été mise en œuvre par le biais d'un *pattern observer*.

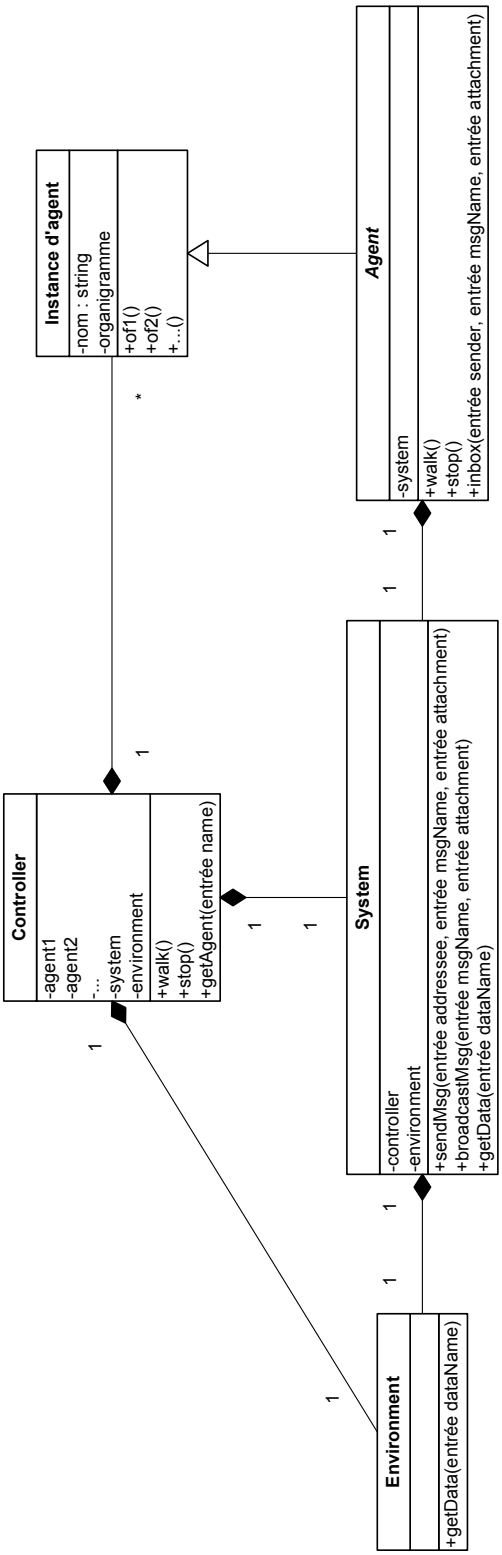

FIG. B.6 – Diagramme UML du simulateur

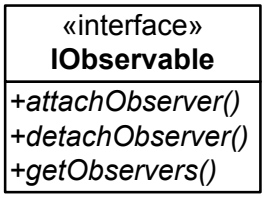

FIG. B.7 – Diagramme UML de l'interface IObservable

Pour cela, une interface dite *observable* a été créée et toute les classes du simulateur, et classes de données l'ont implémentée (cf. figure B.7). Cette interface propose les méthodes suivantes :

attachObserver() ajoute une instance d'un *observateur*, et renvoie un identifiant unique ;

detachObserver() utilise l'identifiant précédent pour supprimer un *observateur*

getObservers() est appelé automatiquement par toute classe observée, pour transmettre à ces observateurs les éléments descriptifs de l'événement.

Un ensemble de classes *observateur* ont donc été écrite pour fournir une architecture transparente pour l'utilisateur souhaitant créer une instance du simulateur : les agents possèdent leurs observateurs, de même que le système, l'environnement et toutes les données descriptives des objets.

B.3 Implémentation en patrouille maritime

Détaillons à présent notre implémentation en patrouille maritime qui contient :

- une classe Environnent,
- une classe System
- 2 type d'agents :
  - TACCO : il donne les « ordres d'identification » aux autres agents, c.-à-d. un nom de piste à identifier, attends que le processus distribué se termine, et recommence tant qu'il a des pistes à identifier. Il n'intervient donc pas proprement dit dans le processus de décision ;
  - opérateur capteur : il reçoit ses ordres du TACCO, est en charge de l'identification par l'implémentation de notre modèle de dé-

cision, et interagit dans le cadre autorisé par notre modèle d'interaction.

B.3.1 Environnement

La classe d'environnement de notre simulation de patrouille maritime est triviale, et se contente, à l'initialisation, de charger un fichier XML contenant les valeurs de tous les attributs susceptibles d'être requis par les agents. Ces valeurs sont fournies à chaque appel de la méthode getData().

B.3.2 Système

Nous aurions pu (ou dû) instancier notre modèle d'interaction dans cette classe. Néanmoins, il nous a paru plus simple de déporter les éléments de ce modèle dans les méthodes inbox() des agents.

Alors, la classe système de notre simulation de patrouille maritime est triviale, et ne surcharge pas la classe System.

B.3.3 TACCO

Le diagramme de flux de l'agent TACCO est donné à la figure B.8.

L'initialisation doit fournir à l'agent une liste de noms de piste qu'il soumettra ensuite à l'équipe d'agents décideurs pour identification.

Give order

L'agent sélectionne une piste dans la liste et l'envoi aux agents opérateur pour qu'ils l'identifient via le message IDENTIFY (cf. paragraphe B.3.5).

Is identification obtained ?

À chaque proposition d'identification, les agents opérateurs envoient le message EUREKA accompagné de l'identification (cf. paragraphe B.3.4). Le TACCO attend tant que :

- au moins un agent est en train de raisonnement ;
- un timeout (exprimé en itérations dans l'HBM des agents) n'est pas atteints.

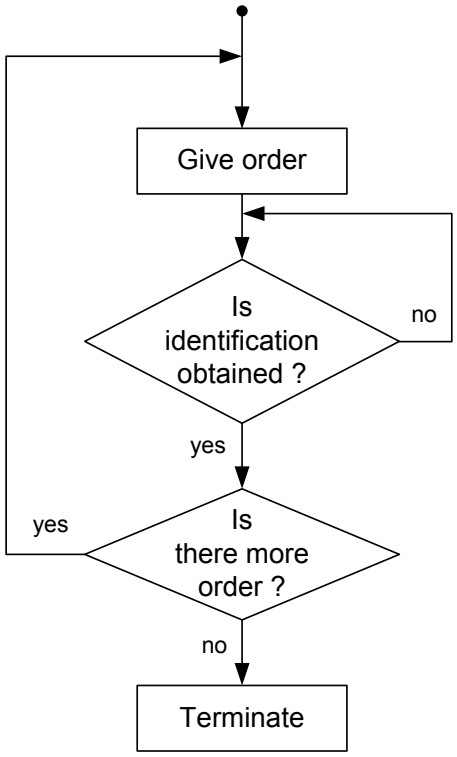

FIG. B.8 – Diagramme de flux — TACCO

Is there more order ?

Teste simplement s'il reste des pistes à identifier.

Terminate

Le TACCO envoie le message FINISH à tous les agents, leur ordonnant de terminer, et termine ensuite. Le contrôleur provoque la fin du programme.

B.3.4 Opérateur capteur

Le processus de l'agent est décrit par la figure B.9.

À l'initialisation, une « mémoire à long terme » est créée et remplie avec les règles de décision associées à l'agent, des préférences sont fournies par le contrôleur (qui les tient du fichier d'initialisation) et des structures temporaires vides sont créées.

Order received or conflict detected ?

Cet état permet à l'agent d'attendre :

- un message IDENTIFY d'ordre d'identification de la part du TACCO,
- ou la détection d'un conflit après la réception d'un message EUREKA ou HINTS ATTRIBUTES de la part d'un autre agent

Cet état est atteint :

- lorsque l'agent débute son processus,
- après une identification/décision (cf. paragraphe B.3.4).

L'agent sort de cet état avec le choix yes s'il :

- reçoit un ordre d'identification provenant d'un agent TACCO (cf. paragraphe B.3.5),
- détecte un conflit avec l'identification d'un autre agent (cf. paragraphe B.3.5).

Select attributes :

À cette étape, l'agent choisit les attributs qu'il utilisera dans son processus, et demande les données au système par la méthode getData().

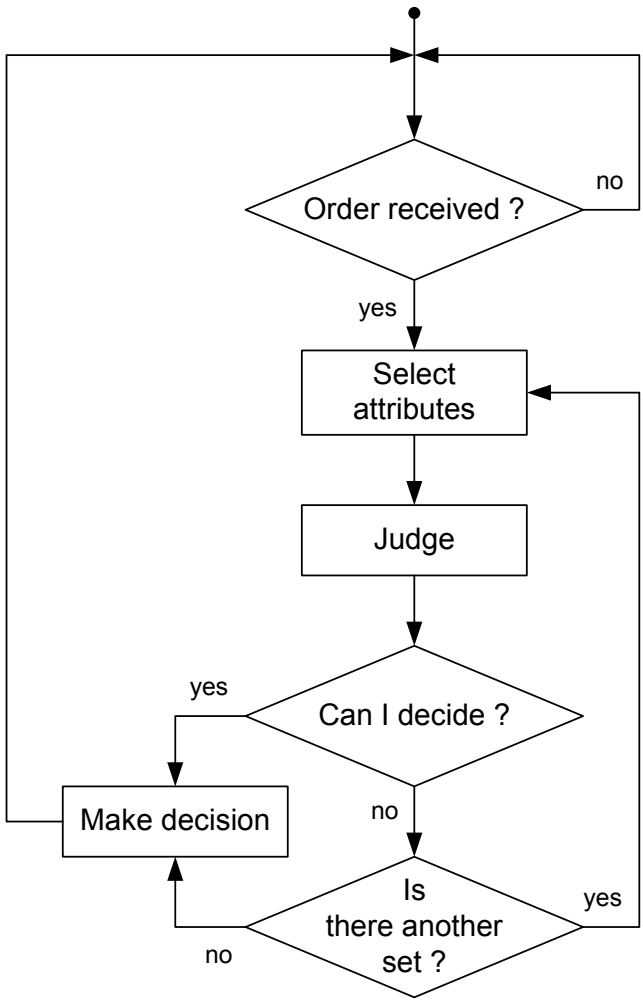

FIG. B.9 – Diagramme de flux - opérateur capteur

Cet état est atteint :

- lorsque l'agent a reçu un ordre d'identification, ou qu'un conflit a été détecté.

L'agent sort de cet état :

- après avoir sélectionné des attributs.

Cette sélection est transmise au reste de l'équipe sous forme d'un message HINTS ATTRIBUTES.

Judge :

À cette étape, l'agent effectue son raisonnement abductif à partir de la représentation de la situation construite à l'étape précédente, et de l'ensemble de règles de décision (cf. paragraphe 4.2.3).

Cet état est atteint :

- lorsque l'agent a sélectionné des attributs.

L'agent sort de cet état :

- après avoir effectué son raisonnement, noté les alternatives et calculé les stimuli discriminants et les expectatives.

La construction des alternatives est donc effectuée en 3 étapes :

- Rappel en mémoire de toutes les règles de décision ayant *au moins* un aspect *satisfait* par l'observation actuelle de la situation (activation partielle ou totale de règles de décision),
- Attribution à chaque structure de dominance d'un niveau d'activation,
- Calcul des expectatives et stimuli critiques.

Can I decide ? :

Cet état permet à l'agent, en fonction des alternatives, de déterminer si une décision est possible, ou non.

Cet état est atteint :

- après l'obtention de la liste d'alternatives *notées*.

L'agent sort de cet état :

- après la comparaison des niveaux d'activation de chaque alternative par rapport à un seuil de préférence de l'agent.

Make decision :

Lors de cet état, l'agent donne son identification pour la piste en cours de traitement.

Cet état est atteint :

- si l'agent peut décider,
- s'il n'a plus d'ensemble d'attributs à sélectionner.

L'agent sort de cet état :

- après que l'opérateur a donné son identification au reste de l'équipe par un message EUREKA.

L'identification fournie est :

- soit l'alternative correspondant à la règle de décision totalement activée,
- soit l'alternative ayant le niveau d'activation le plus élevé,
- soit 'unknown', si l'état a été atteint après l'état « Is there another set ? », indiquant qu'aucune identification n'a pu être obtenue.

Is there another set ? :

Cet état permet à l'agent de déterminer s'il reste des attributs non observés.

Cet état est atteint :

- si aucune décision n'a pu être dégagée.

L'agent sort de cet état :

- après l'étude des attributs restants.

B.3.5 Processus de réception et traitement des messages

Voici la liste des messages pouvant être envoyés et reçus par les agents, et les traitements effectués pour chacun.

Différentes opérations de modifications de poids (*préférences*) sont appliquées, selon les données du modèle d'interactions.

Message IDENTIFY :

Intitulé : IDENTIFY

Pièce jointe : le nom de la piste à identifier

Traitement : l'état (au sens informatique) de l'agent est ré-initialisé (« mémoire à court terme vidée », préférences réinitialisées et structures temporaires vidées), et l'agent commence son identification.

Message EUREKA :

Intitulé : EUREKA

Pièce jointe : l'identification obtenue par l'agent

Traitement : trois traitements sont effectués :

1. mise à jour des préférences sur les attributs : l'agent détermine les attributs qu'il associe à l'identification reçue (via ses règles de décision), et incrémente leurs préférences.
2. mise à jour des préférences sur les alternatives : l'agent incrémente les préférences des règles de décision liées à l'identification [1], et celles des identifications de même catégorie (neutre, hostile ou amie).
3. détection de conflit : si l'identification reçue n'est pas compatible avec celle que l'agent a déjà obtenue, il relance son processus pour essayer de clarifier ce conflit.

Message HINTS ATTRIBUTES :

Intitulé : HINTS ATTRIBUTES

Pièce jointe : la liste des attributs que l'agent va utiliser dans son pattern matching

Traitement : au sein de cette liste, l'agent sélectionne les attributs qu'il manipule également, et incrémente ses préférences à leur égard.

Message FINISH :

Intitulé : FINISH

Pièce jointe : -

[1] Il peut y en avoir plusieurs lors d'une identification peu précise (par exemple, l'identification 'cargo' correspond aux acteurs TM1, TM2, TM3 ou TM4).

Traitement : ce message est envoyé par un agent TACCO lorsqu'il n'y a plus de piste à identifier, pour demander aux agents de se terminer.

Références

Alter, S. L. (1980). *Decision support systems : Current practice and continuing challenges*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co. *(réf. p. 62)*

Anderson, J. R. (1983). *The architecture of cognition*. Harvard University Press. *(réf. p. 78)*

Anderson, J. R. (1996). Act : A simple theory of complex cognition. *American Psychologist*, *51*, 355–365. *(réf. p. 78)*

Anderson, J. R. (1997). *Learning and memory : An integrated approach*. Wiley. *(réf. p. 31)*

Anderson, N. H. (1981). *Foundations of information integration theory*. New York: Academic Press. *(réf. p. 21)*

Anzieu, D., & Martin, J.-Y. (2003). *La dynamique des groupes restreints* (13e éd.). Presses Universitaires de France - PUF. *(réf. pp. 46, 47 et 48)*

Barthélemy, J.-P. (1997). *Le sauvetage de l'âne - introduction aux sciences et techniques de la décision.* (Document de cours) *(réf. pp. 28, 39 et 64)*

Barthélemy, J.-P., Bisdorff, R., & Coppin, G. (2002). Human centered processes and decision support systems. *European Journal of Operational Research*, *136*(2), 233–252. (feature issue Human Centered Processes) *(réf. p. 65)*

Barthélemy, J.-P., Coppin, G., & Lenca, P. (2006, May). Cognitive approach to decision making and practical tools. Dans *9th IFAC Symposium on Automated Systems Based on Human Skill And Knowledge.* Nancy, France. *(réf. p. 65)*

Barthélemy, J.-P., & Lapébie, C. (1995). Individual decision analysis strategies for binary choice tasks. Dans *International Conference on Information & Knowledge Engineering* (pp. 1538–1556). *(réf. p. 39)*

Barthélemy, J.-P., & Mullet, E. (1986). Choice basis : A model for multi-attribute preference. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*(39), 106–124. *(réf. pp. 15, 41, 44, 77, 84, 151 et 152)*

Barthélemy, J.-P., & Mullet, E. (1987). A polynomial model for expert categorical judgment. Dans E. E. Roskam & R. Suck (Éds.), *Progress in mathematical psychology* (pp. 419–437). Amsterdam, North-Holland: Elsevier Science. *(réf. p. 41)*

Barthélemy, J.-P., & Mullet, E. (1992). A model of selection by aspects. *Acta Psychologica*(79), 1–19. *(réf. pp. 41 et 42)*

Barthélemy, J.-P., & Mullet, E. (1994). *Expert individal decision : The moving basis heuristics* (Rapport technique No. RR-94006-IASC). ENST Bretagne. *(réf. pp. 29, 68 et 141)*

Barthélemy, J.-P., & Mullet, E. (1996). Information processing in similarity judgments. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, *49*, 225–240. *(réf. pp. 41 et 84)*

Bennani, Y. (Éd.). (2006). *Apprentissage connexionniste*. Hermes Lavoisier. *(réf. p. 90)*

Berthoz, A. (2003). *La décision*. Odile Jacob. *(réf. pp. 40, 65 et 66)*

Bisdorff, R. (1999). Cognitive support methods for multi-criteria expert decision making. *European Journal Of Operational Reasearch*(119), 379–387. *(réf. p. 65)*

Bouyssou, D., Dubois, D., Pirlot, M., & Prade, H. (Éds.). (2006). *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision* (Vol. 1). Hermes Science. *(réf. p. 63)*

Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Perny, P., Tsoukiàs, A., & Vincke, P. (2000). *Evaluation and decision models - a critical perspective* (1st éd., Vol. 32). Springer. *(réf. p. 63)*

Brezillon, P., & Pomerol, J.-C. (1997, April). Joint cognitive systems, cooperative systems and decision support systems : a cooperation in context. Dans *Proceedings of the european conference on cognitive science* (pp. 129–139). *(réf. p. 68)*

Cohen, M. S., Freeman, J. T., & Wolf, S. P. (1996). Meta-recognition in time stressed decision making : recognizing, critiquing and correcting. *Human Factors*, *38*, 206–219. *(réf. pp. 34 et 37)*

Collins, A. M., & Quillian, M. R. (1969). Retieval time from semantic me-

mory. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, *8*, 240–247. *(réf. p. 24)*

Coppin, G. (1999). *Pour une contribution à l'analyse anthropocentrée des systèmes d'action*. Mémoire de doctorat (non publié), École Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne. *(réf. pp. 9, 29 et 67)*

Coppin, G. (2002). *Coopération homme-machine.* (Document de cours) *(réf. p. 70)*

Coppin, G., Cadier, F., & Lenca, P. (2007, January). Some considerations of cognitive modeling for collective decision support. Dans *40th hawaii international international conference on systems science.* Waikoloa, Big Island, HI, USA: IEEE Computer Society. *(réf. p. 142)*

Coppin, G., & Skrzyniarz, A. (2003). Human-centered processes : Individual and distributed decision support. *IEEE Intelligent Systems*, *18*, 27–33. *(réf. p. 145)*

Cordier, F., & Dubois, D. (1981). Typicalité et représentation cognitive. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, *1*, 299–333. *(réf. p. 25)*

Cornuèjols, A., & Miclet, L. (2003). L'apprentissage de Modèles de Markov Cachés. Dans *Apprentissage Artificiel* (2nd éd., chap. 13). Eyrolles. *(réf. p. 64)*

Crevits, I. (1996). *Répartition dynamique des tâches dans les systèmes complexes - Modélisation de la répartition anticipée - Application au contrôle de trafic aérien (Dynamic repartition of tasks in complex systems - Modelisation of anticipated repartition - Application to air traffic management)*. Mémoire de doctorat (non publié), Université de Valenciennes. *(réf. p. 108)*

Damas, L. (2003). *Étude théorique et pratique de la production d'effets d'amorçage de la mémoire : Application à l'assistance à la remémoration chez l'utilisateur d'un système informatique pour une tâche d'apprentissage*. Mémoire de doctorat (non publié), Université Claude Bernard, Lyon 1. *(réf. p. 137)*

Damas, L., Mille, A., & Versace, R. (2004, March). Assistance informatisée à la remémoration : le cycle ràpc revisité dans un cadre particulier. Dans *12ème atelier de raisonnement à partir de cas.* *(réf. pp. 79 et 137)*

Degenne, A., & Forsé, M. (1994). *Les réseaux sociaux*. Armand Colin. *(réf. p. 91)*

Dehais, F. (2004). *Conflits dans les activités de pilotage*. Mémoire de docto-

rat (non publié), École nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace (SupAéro). *(réf. p. 147)*

Dehais, F., Goudou, A., Lesire, C., & Tessier, C. (2005, November). Towards an anticipatory agent to help pilots. Dans *Aaai 2005 fall symposium "from reactive to anticipatory cognitive embodied systems"*. Arlington, Virginia. *(réf. p. 147)*

Favier, M. (1996). Performance des décisions de groupe assistées par un collecticiel : groupes en face-à-face versus groupes distribués. *Systèmes d'Information et Management*, *1*(3), 29–56. *(réf. p. 65)*

Ferber, J. (1995). *Les systèmes multi-agents : Vers une intelligence collective*. Paris, France: InterEditions. *(réf. pp. 111, 125 et 137)*

Flanagan, J. C. (1954, July). The critical incident technique. *Psychological Bulletin*, *51*(4), 327–358. *(réf. p. 66)*

Flavell, J. H. (1976). Metacognitive aspects of problem solving. Dans L. B. Resnick (Éd.), *The nature of intelligence* (pp. 231–235). Lawrence Erlbaum Associates. *(réf. p. 32)*

Freud, S. (1926). *L'interprétation des rèves*. Presses Universitaires de France. *(réf. pp. 50 et 51)*

Gassemi, K. (2005). L'impact des systèmes d'aide à la décision de groupe sur la définition des besoins en systèmes d'information. *Systèmes d'Information et Management*, *10*(2), 107–131. *(réf. p. 65)*

Gulliksen, J., Göransson, B., Boivie, I., Blomkvist, S., Persson, J., & Cajander, Å. (2005). Key principles for user-centred systems design. Dans A. Seffah, J. Gulliksen, & M. C. Desmarais (Éds.), *Human-centered software engineering - integrating usability in the software development lifecycle* (Vol. 8). Springer. *(réf. p. 66)*

Hall, N. G. (1994). A cognitively based taxonomy of fuzzy decision support systems. Dans *Nafips/ifis/nasa '94. proceedings of the first international joint conference of the north american fuzzy information processing society biannual conference. the industrial fuzzy control and intelligent systems conference, and the nasa joint technolo* (pp. 157–158). San Antonio, TX. Disponible sur `http://ieeexplore.ieee.org/iel5/3014/8563/00375109.pdf` *(réf. p. 62)*

Hayashi, M. (2003). Hidden Markov Models as a Tool to Measure Pilot Attention Switching During Simulated ILS Approaches. Dans *12th*

International Symposium on Aviation Psychology. Dayton, OH. *(réf. p. 138)*

Hintzman, D. L. (1986). "Schema abstraction" in a multiple-trace memory model. *Psychological Review*, *93*(4), 411–428. *(réf. pp. 28 et 78)*

Hoffman, R. R., Hayes, P. J., & Ford, K. M. (2001, September). Human-centered computing : thinking in and out of the box. *IEEE Intelligent Systems*, *16*(5), 76–78. *(réf. p. 66)*

Hoffman, R. R., Roesler, A., & Moon, B. M. (2004, July). What is design in the context of human-centered computing ? *IEEE Intelligent Systems*, *19*(4), 89–95. *(réf. p. 68)*

Hollnagel, E. (2005). *Joint cognitive systems : foundations of cognitive systems engineering*. Boca Raton FL: Taylor & Francis. *(réf. p. 68)*

Janis, I. L. (1972). *Victims of groupthink*. Houghton Mifflin. *(réf. pp. 55 et 56)*

Kahneman, D., Slovic, P., & Tversky, A. (1982). *Judgement under uncertainty : heuristics and biaises*. Cambridge : Cambridge University Press. *(réf. p. 64)*

Kant, J.-D. (1996). *Modélisation et mise en øeuvre de processus cognitifs de catégorisation à l'aide d'un réseau connexionniste*. Mémoire de doctorat (non publié), Université de Rennes I. *(réf. pp. 41, 84 et 90)*

Klein, G. A. (1989). Recognition-primed decisions. *Advances in Man-Machine System Research*, *5*, 47–92. *(réf. pp. 15, 34, 35 et 152)*

Klein, G. A. (1998). *Sources of Power : How People Make Decisions*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press. *(réf. pp. 35, 50, 52, 66, 103, 136 et 159)*

Klein, G. A. (2004). *The power of intuition : How to use your gut feelings to make better decisions at work.* Currency. *(réf. p. 33)*

Klein, G. A., Calderwood, R., & Clinton-Cirocco, A. (1986). Rapid decision making on the fire ground. Dans *Proceedings of the human factors society 30th annual meeting* (Vol. 1, pp. 576–580). *(réf. p. 34)*

Klein, G. A., Orasanu, J., Calderwood, R., & Zsambok, C. E. (Éds.). (1993). *Decision making in action : Models and methods*. Nordwood, New Jersey: Ablex Publishing Corporation. *(réf. p. 33)*

Klein, G. A., Zsambok, C. E., & Thordsen, M. L. (1993, April). Team decision training : Five myths and a model. *Military Review*, 36–42. *(réf. p. 52)*

Kottemann, J. E., & Davis, F. D. (1991). Decisional conflict and user acceptance of multicriteria decision-making aids. *Decision Sciences*, *22*, 918–926. Disponible sur `http://www.blackwell-synergy.com/doi/abs/10.1111/j.1540-5915.1991.tb00371.x` *(réf. p. 65)*

Kraemer, K. L., & King, J. L. (1988). Computer-based systems for cooperative work and group decision making. , 115–146. *(réf. p. 62)*

Lamarche, L., Gascon, J., & Thibault, H. W. (1980). La pensée sociale dans une perspective de traitement de l'information. *Recherches de Psychologie Sociale*(2), 115–126. *(réf. pp. 47 et 48)*

Lapébie, C. (1995). *Implémentation et optimisation de stratégies de décision*. Mémoire de doctorat (non publié), École Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne, Université de Rennes I. *(réf. p. 40)*

Le Blaye, P., Wioland, L., Chaudron, L., Dehais, F., Grau, J. Y., & Pénelaud, O. (1999). Modelling Human Activity for the Purpose of Flight Analysis. Dans *International Conference on Human Centered Processes, HCT'99.* Brest, France. *(réf. p. 147)*

Lebraty, J.-F. (2006, December). Les systèmes décisionnels. Dans J. Akoka & I. Comyn-Wattiau (Éds.), *Encyclopédie de l'informatique et des systèmes d'information* (pp. 1338–1349). Vuibert. *(réf. p. 62)*

Lebraty, J.-F., & Pastorelli-Negre, I. (2004). Biais cognitifs : quel statut dans la prise de décision assistée ? *Systèmes d'Information et de Management*, *9*(3). *(réf. p. 64)*

Lee, W. (1971). *Decision theory and human behavior*. New York: John Wiley & Sons. *(réf. p. 40)*

Legras, F. (2007). *Connaissance et interaction homme-système* (Rapport de recherche No. RR-2007003-LUSSI). École Nationale Supérieure Des Télécommnunications De Bretagne. *(réf. pp. 68 et 71)*

Lenca, P. (1995, February). Application of expertise acquisition in savings plans. Dans *Gronics'95* (pp. 85–92). Groningen, Netherlands. *(réf. p. 146)*

Lenca, P. (1997). *Acquisition automatique et analyse de processus de décision. application au domaine bancaire*. Mémoire de doctorat (non publié), École Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne, Université de Rennes I. *(réf. pp. 15 et 146)*

Le Ny, J. F. (1979). *La sémantique psychologique*. Paris, France: PUF. *(réf. p.*

26)

Leontiev, A. N. (1981, October). The problem of activity in psychology. Dans *The concept of activity in soviet psychology.* M.E. Sharpe. (traduction) *(réf. pp. 68 et 69)*

Leplat, J. (1997). *Regards sur l'activité en situation de travail - contribution à la psychologie ergonomique*. Paris, France: PUF. *(réf. p. 70)*

Le Saux, E. (2000). *Extraction et implémentation de stratégies expertes. Application au contrôle de processus industriels (Extraction and implementation of expert decision strategies. Application to industrial processes control)*. Mémoire de doctorat (non publié), E.H.E.S.S. *(réf. pp. 15, 137, 141 et 148)*

Le Saux, E., Lenca, P., Barthélemy, J.-P., & Picouet, P. (1998). Updating a rule basis under cognitive constraints : the COMAPS tool. Dans *The Seventeenth European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control. (réf. pp. 146, 153 et 154)*

Le Saux, E., Lenca, P., & Picouet, P. (2002). Dynamic adaptation of rules bases under cognitive constraints. *European Journal of Operational Research*, *136*(2), 299–309. ((feature issue Human Centered Processes)) *(réf. p. 146)*

Le Saux, E., Lenca, P., Picouet, P., & Barthélemy, J.-P. (1999). An anthropocentric tool for decision support. Dans *The Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'99)* (pp. 338–343). *(réf. p. 141)*

Lindsay, P. H., & Norman, D. A. (1980). *Traitement de l'information et comportement humain - Une introducion à la psychologie*. Montréal: Études Vivantes. *(réf. pp. 15 et 21)*

Lipshitz, R., Klein, G. A., Orasanu, J., & Salas, E. (2001). Taking stock of naturalistic decision making. *Journal of Behavioral Decision Making*, *14*, 331–352. *(réf. p. 34)*

Mille, A. (2006, October). From case-based reasoning to traces-based reasoning. *Annual Reviews in Control*, *30*(2), 223–232. Disponible sur `http://liris.cnrs.fr/publis/?id=2627` (Journal of IFAC) *(réf. p. 138)*

Mille, A., Caplat, G., & Philippon, M. (2006, December). Faciliter les activités des utilisateurs d'environnements informatiques : quoi, quand, comment ? *INTELLECTICA*, *2*(44), 121–143. Disponible sur `http://liris.cnrs.fr/publis/?id=2789` *(réf. p. 137)*

Montgomery, H. (1983). Decision rules and the search for a dominance structure : toward a process model of decision making. Dans *Analysis and Aiding Decision Processes* (pp. 343–369). Amsterdam North-Holland. *(réf. pp. 40, 41 et 78)*

Montgomery, H., & Svenson, O. (1976). On decision rules and information processing strategies for choices among multi-attribute alternatives. *Scandinavian Journal of Psychology*(17), 283–291. *(réf. pp. 39 et 40)*

Montgomery, H., & Willén, H. (1999). Decision making and action : the search for a good structure. Dans P. Juslin & H. Montgomery (Éds.), *Judgement and decision making : Neo-brunswikian and process-tracing approaches* (pp. 147–174). London: Lawrence Erlbaum Associates. *(réf. pp. 40 et 77)*

Morel, C. (2002). *Les décisions absurdes*. Gallimard. *(réf. p. 54)*

Morrison, J. G., Kelly, R. T., Moore, R. A., & Hutchins, S. G. (1997, April). Tactical Decision Making Under Stress (TADMUS) Decision Support System. Dans *Iris national symposium on sensor and data fusion.* MIT Lincoln Laboratory. *(réf. pp. 65 et 66)*

Moscovici, S. (1984). *Psychologie sociale*. PUF. *(réf. p. 56)*

Moscovici, S., & Zavalloni, M. (1969). The group as a polarizer of attitudes. *Personality and Social Psychology*, *12*, 124–135. *(réf. p. 129)*

Mullet, E., Barthélemy, J.-P., Duponchelle, L., Sastre, M. T. Muñoz, & Neto, F. (1996). Décision, choix, jugement, orientation. *L'orientation scolaire et professionnelle*, 169–192. *(réf. p. 28)*

Norman, D. A. (1986). Cognitive engineering. Dans D. A. Norman & S. W. Draper (Éds.), *User centered system design : New perspectives on human-computer interaction* (pp. 31–61). Hillsdale, NJ: Erlbaum. *(réf. p. 66)*

Norman, D. A. (1998). *The invisible computer*. Cambridge MA: MIT Press. *(réf. p. 61)*

Ossowski, S. (1999). *Co-ordination in artificial agent societies : Social structures and its implications for autonomous problem-solving agents* (1st éd., Vol. 1535). Springer. *(réf. pp. 114 et 123)*

Otelli, J.-P. (2003). *Erreurs de pilotage*. Altipresse. *(réf. p. 103)*

Papy, F., Folcher, V., Sidir, M., & Cerratto Pargman, T. (2004, November).

E-learning et technologies pour la coopération : inadéquations artefactuelles et logiques des activités instrumentées. Dans *Actes ergo'ia 2004*. *(réf. p. 66)*

Pavlov, I. P. (1927). *Conditioned reflexes*. London, England: Oxford University Press. (Translated by Gleb Vassilievitch von Anrep) *(réf. p. 22)*

Piaget, J. (1987). *Six études de psychologie*. Gallimard. *(réf. pp. 52 et 70)*

Pichon, E., Lenca, P., Guillet, F., & Wang, J.-W. (1994). Un algorithme de partition d'un produit direct d'ordres totaux en un nombre minimum de chaînes. *Mathématique Informatique et Sciences Humaines*, *32*(125), 5–15. *(réf. p. 146)*

Pomerol, J.-C. (2006, June). La décision humaine : reconnaissance plus raisonnement. Dans D. Bouyssou, D. Dubois, M. Pirlot, & H. Prade (Éds.), *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision* (Vol. 1, chap. 4). Hermes Science. *(réf. pp. 63 et 65)*

Power, D. J. (2002). *Decision support systems : Concepts and resources for managers*. Quorum Books. *(réf. p. 62)*

Power, D. J. (2007, March). *A brief history of decision support systems.* DSSResources.COM, World Wide Web. Disponible sur `http://DSSResources.COM/history/dsshistory.html` (version 4.0) *(réf. p. 62)*

Power, D. J., & Sharda, R. (2007, April). Model-driven decision support systems : Concepts and research directions. *Decision Support Systems*, *43*(3), 1044–1061. *(réf. p. 62)*

Rabardel, P. (1995). *Les hommes & les technologies : Approche cognitive des instruments contemporains*. Armand Colin. *(réf. pp. 66, 69 et 70)*

Rabardel, P. (1997). Des instruments et des hommes : propositions pour une conception centrée utilisateur. *International Journal of Design and Innovation Research*, *10*, 7–20. *(réf. p. 72)*

Rasmussen, J. (1983, May). Skills, rules, and knowledge ; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, *SMC-13*(3), 257–266. *(réf. pp. 30, 31 et 53)*

Reason, J. (1993). *L'erreur humaine* (No. 1). Paris, France: PUF. *(réf. p. 65)*

Reix, R. (2002). *Systèmes d'information et management des organisatinos* (4th

éd.). Librairie Vuibert. *(réf. p. 62)*

Reuchlin, M. (2000). *Psychologie* (15e éd.). Presses Universitaires de France. *(réf. p. 21)*

Richard, J.-F. (2004). *Les activités mentales : Comprendre, raisonner, trouver des solutions* (3rd éd.). Paris, France: Armand Colin. (1ere édition : 1990) *(réf. pp. 22, 24, 25, 26 et 32)*

Rosch, E., & Mervis, C. B. (1975). Family resemblances : Studies in the internal structure of categories. *Cognitive Psychology*, *7*, 573–605. *(réf. p. 25)*

Rousset, S. (2000). Les conceptions « système unique » de la mémoire : aspects théoriques. *Revue de Neuropsychologie*, *10*(1), 27–51. *(réf. p. 28)*

Roy, B. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris, France: Economica. *(réf. p. 63)*

Ruta, D., & Gabrys, B. (2000). An overview of classifier fusion methods. *Computing and Information Systems*, *7*, 1–10. *(réf. pp. 64 et 154)*

Schmidt, K. (1991). Cooperative Work : A Conceptual Framework. Dans J. Rasmussen, B. Brehmer, & J. Leplat (Éds.), *Distributed Decision Making : Cognitive Models for Cooperative Work* (pp. 75–110). Chichester, England: John Wiley and Sons, Inc. *(réf. p. 140)*

Seffah, A., Gulliksen, J., & Desmarais, M. C. (Éds.). (2005). *Human-centered software engineering - integrating usability in the software development lifecycle* (Vol. 8). Springer. *(réf. p. 66)*

Semon, R. W. (1904). *Die mneme als erhaltendes prinzip im weschel des organischen geschehens*. Leipzig: Wilhelm Engelmann. (Traduction anglaise de L. Simon, The Mneme. London, George Allen & Unwin, 1921) *(réf. p. 27)*

Semon, R. W. (1909). *Die mnemischen empfindungen. leipzig, wilhelm engelmann*. Leipzig: Wilhelm Engelmann. (Traduction anglaise de B. Duffy, Mnemic psychology. London, George Allen & Unwin, 1923) *(réf. p. 27)*

Shanteau, J. (1988). Psychological characteristics of expert decision makers. *Acta Psychologica*, *68*(1-3), 203–215. *(réf. pp. 30, 68 et 141)*

Shanteau, J. (1992). How Much Information Does An Expert Use ? Is It Relevant ? *Acta Psychologica*, *81*(1), 75–86. *(réf. p. 29)*

Simon, H. A. (1955, February). A behavioral model of rational choice. *The Quarterly Journal of Economics*, *69*(1), 99–118. *(réf. p. 35)*

Simon, H. A. (1957). *Models of Man*. Wiley. *(réf. pp. 22, 41 et 81)*

Skrzyniarz, A. (2003). *Analyse de problèmes de décision distribuée et conception d'heuristiques de résolution (Analysis of distributed decision problems and heuristics of resolution)*. Mémoire de doctorat (non publié), ENST Bretagne, E.H.E.S.S. *(réf. pp. 9, 47, 102, 107, 112, 113, 125, 145 et 154)*

Smith, E. E., Shoben, E. J., & Rips, L. J. (1974). Structure and process in semantic memory : A featural model of semantic decisions. *Psychological Review*, *81*, 214–241. *(réf. p. 25)*

Stratulat, A.-M. (2007). *Simulation and evaluation of an information system using a multi-agent system*. Rapport de stage, École Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne. *(réf. p. 118)*

Svenson, O. (1979). Process description of decision making. *Organizational behavior and human performance*(23), 86–112. *(réf. p. 39)*

Thordsen, M. L., & Klein, G. A. (1989). Cognitive processes of the team mind. Dans IEEE (Éd.), *International conference on sytems, man, and cybernetics proceedings* (pp. 46–49). Cambridge, MA: IEEE. *(réf. p. 50)*

Thordsen, M. L., Kyne, M. M., & Klein, G. A. (1994, September). *A model of advanced team decision making and performance* (Contract for the U.S. Army Research Institute, Presidio-Monterey, CA No. MDA903-92-C-0098). Fairborn, OH: Klein Associates Inc. *(réf. p. 52)*

Tulving, E. (1983, August). Ecphoric processes in episodic memory. *Royal Society of London Philosophical Transactions. Series B, Biological Sciences*, *302*(1110), 361–370. *(réf. pp. 15, 27 et 78)*

Tversky, A. (1969). Intransitivity of preferences. *Psychological Review*, *76*, 31–48. *(réf. p. 40)*

Tversky, A. (1977). Features of similarity. *Psychological Review*, *84*, 327–352. *(réf. p. 24)*

Vanderhaegen, F., Crevits, I., Debernard, S., & Millot, P. (1994). Men-machines cooperation : toward an activity regulation assistance for different air traffic control levels. *Computer Interaction*, *6(1)*, 65–104. *(réf. p. 108)*

Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1944). *Theory of Games and Economic*

Behavior. Princeton University Press. *(réf. p. 64)*

Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society : The development of higher psychological processes*. Harvard University Press. (traduction) *(réf. pp. 68 et 69)*

Vygotsky, L. S. (1981, October). The genesis of higher mental functions. Dans *The concept of activity in soviet psychology.* M.E. Sharpe. (traduction) *(réf. p. 69)*

Wertsch, J. V. (1981). *The concept of activity in soviet psychology*. M.E. Sharpe. *(réf. pp.)*

Wolf, S. P., Klein, G. A., & Thordsen, M. L. (1991). Decision-centered design requirements. Dans *Proceedings of the IEEE 1991 National Aerospace and Electronics Conference, NAECON 1991* (Vol. 2, pp. 800–805). *(réf. p. 66)*

Wong, W. (1999, November). The cognitive engineering – design gap. Dans *9th annual conference of the australian computer-human interaction special interest group.* Wagga Wagga, New South Wales, Australia. *(réf. p. 67)*

Woods, D. D., Roth, E. M., & Bennett, K. B. (1990). Explorations in joint human-machine cognitive systems. Dans S. P. Robertson, W. W. Zachary, & J. B. Black (Éds.), *Cognition, computing, and cooperation* (pp. 123–158). Ablex Publishing Corp. *(réf. p. 68)*

Wooldridge, M., & Jennings, N. (1995). Intelligent agents : theory and practice. *Knowledge engineering Review*, *10*(2). *(réf. p. 111)*

Yvon, Y. (2003, June). *Validation et réception du logiciel d'assistance à la classification de plate-formes SMA2* (Rapport de stage). Brest, France: IUP Ingénierie Informatique. *(réf. p. 99)*

Zachary, W. W. (1986). A cognitively based functional taxonomy of decision support techniques. *Human-Computer Interaction*, *2*(1), 25–63. *(réf. p. 62)*

Zsambok, C. E., & Klein, G. A. (Éds.). (1997). *Naturalistic decision making*. Lawrence Erlbaum Associates. *(réf. pp. 14 et 105)*

Résumé

Les situations de décision nécessitant l'intervention de plusieurs experts autour d'un même objet sont le lieu de dynamiques d'interactions complexes. Lorsque le contexte est délicat en termes de risque, de temps imparti ou d'incertitude quant à l'environnement et aux conséquences de la décision, la gestion de ces dynamiques devient l'élément central du bon déroulement du processus de décision.

Le travail présenté s'attache à la description d'une tâche de catégorisation distribuée, lorsqu'elle est prise en charge par une équipe d'experts ayant des compétences distinctes, et subissant des contraintes nécessitant une décision rapide et sûre. L'approche retenue est celle d'une étude anthropocentrée, plaçant les décideurs au centre du système, et basée sur des modèles cognitifs de décision experte et d'interaction sociale. Le modèle que nous avons développé permet l'expression des dynamiques complexes qui apparaissent au sein de l'équipe, durant le processus distribué.

Les résultats obtenus par simulation multi-agents, autour du cadre applicatif de la patrouille maritime, illustrent notamment des comportements classiques de groupe tels que la polarisation et le consensus extrême. Ils nous autorisent également la spécification des fonctions centrales qu'un système d'aide aux décideurs devrait implémenter.

Mots-clés : modèles cognitifs de décision, psychologie sociale, système anthropocentré, systèmes d'aide aux décideurs, simulations multi-agents