Defence Research and Development Canada
Recherche et développement pour la défense Canada

DEFENCE R&D DÉFENSE

Présentation d'un cadre formel pour l'analyse de situation

Application à la décision collaborative dans le cadre d'une coalition

Anne-Laure Jousselme
Patrick Maupin
Valcartier

Defence Research and Development Canada – Valcartier

Technical Report
DRDC Valcartier TR 2007-003
May 2014

Canada

Présentation d'un cadre formel pour l'analyse de situation

Application à la décision collaborative dans le cadre d'une coalition

Anne-Laure Jousselme
Patrick Maupin
Valcartier

Defence Research and Development Canada – Valcartier

Technical Report
DRDC Valcartier TR 2007-003
May 2014

© Her Majesty the Queen in Right of Canada, as represented by the Minister of National Defence, 2014

© Sa Majesté la Reine (en droit du Canada), telle que représentée par le ministre de la Défense nationale, 2014

Abstract

The general problem addressed in this work [1] is the formalization of the analysis of a coalition. We proposed a formal model of coalition analysis, relying on the capacity of a coalition to achieve a mission. The achievement of a mission implies on the one hand, a *planning* task through the definition of a sequence of joint actions to be performed, and on the other hand, the *situation analysis* that the coalition faces. These two tasks are in general regarded as distinct and the mathematical tools to treat them, different. The originality of the approach suggested in order to tackle the problem of analysis of coalition rests on a general language used at the same time for the problems of planning and analysis of situation. Thanks to this approach, the process of planning can be founded on the effects while accounting for the mental states of the agents required as pre-conditions to actions. The generality of the formal language proposed makes it possible to bind the concepts of capacity and situation awareness, often considered and defined separately mainly because of the limitations of the tools used.

The specific problem approached in this report is that of the formalization of the process of situation analysis. Formal definitions of *situation*, *situational awareness*, *situation analysis* are given. The modeling and the evolution of beliefs and knowledge as well as the associated uncertainty are defined in the network of agents which form a coali-tion. The concepts of group epistemic states, of conflict management, aggregation of information, of belief revision or update are thus approached .

Résumé

Le problème général de travail [2] est celui de la formalisation de l'analyse d'une coalition. Nous avons donc proposé un modèle formel d'analyse de coalition reposant sur la capacité d'une coalition à mener à bien une mission. L'accomplissement d'une mission implique d'une part une *planification* de celle-ci par la définition d'une séquence d'actions conjointes à réaliser et, d'autre part, l'*analyse de la situation* à laquelle fait face la coalition. Ces deux tâches sont en général considérées comme distinctes et les outils mathématiques pour les traiter, différents. L'originalité de l'approche proposée pour aborder le problème d'analyse de coalition repose sur un langage général utilisé à la fois pour les problèmes de planification et d'analyse de situation. Grâce à cette approche, le processus de planification peut être fondé sur les effets tout en tenant compte des états mentaux des agents requis comme préconditions aux actions. La généralité du langage formel proposé permet de lier les concepts de capacité et d'éveil situationnel, souvent considérés et définis séparément principalement à cause

1. Specific Arrangement 23 on the subject of *collaborative decision making in a coalition context.*
2. Arrangement Spécifique 23 sur le sujet de *Décision collaborative dans le cadre d'une coalition.*

des limitations des outils utilisés.

La problématique spécifique abordée dans ce rapport est celle de la formalisation du processus d'analyse de situation. Des définitions formelles de *situation*, d'*éveil situationnel*, d'*analyse de situation* sont données. La modélisation et l'évolution des croyances et connaissances ainsi que l'incertitude associée sont définies dans le réseau d'agents que forme une coalition. Ainsi sont abordées les notions d'états épistémiques de groupe, de gestion de conflit, d'agrégation d'information, de révision ou de mise à jour de croyances.

Executive summary

Présentation d'un cadre formel pour l'analyse de situation: Application à la décision collaborative dans le cadre d'une coalition

Anne-Laure Jousselme, Patrick Maupin; DRDC Valcartier TR 2007-003; Defence Research and Development Canada – Valcartier; May 2014.

Background: Situation analysis (SA) aims at providing situation awareness to the agents involved in a coalition. It appears crucial that at least some key agents of a coalition have a common understanding of the situation on which they will later base their decisions and build their joint strategies to achieve the allocated mission. Situation awareness relies, on the one hand, on some individual (local) understandings of the agents and on the (global) information shared among the agents, on the other hand. The SA task of the coalition implies a joint *perception* of the situation, a common or shared *comprehension* as well as a *projection* on future states to be better predict possible threats. The information gathered must also be combined while managing the underlying uncertainty and possible conflicts. Pieces of information are exchanged or shared on the basis of their relevance or uncertainty while accounting for the sharing policies (information security). The product of SA is materialized, for example, in a Recognized Air Picture (RAP) or a Recognized Maritime Picture (RMP).

Through a collaboration with the ONERA (Information Processing and Modelization Department - DTIM) of Toulouse (France) on the problem of collaborative decision making in a coalition context (Specific Arrangement 23 between Canada and France (AS23)), we developed a formal model of coalition analysis. Our main concerns were (1) the formalization of situation analysis as well as (2) the compatibility of this formal model with the planning model. The planning problem has been treated within the situation calculus framework by the ONERA team, a logical language to reason on actions.

We propose here a formal model for coalition analysis relying on the ability of a coalition to achieve a mission. The achievement of a mission relies, on one hand, on its *planning i.e.* the selection of courses of joint actions and, on the other hand, on the *analysis of the situation* that the coalition faces. These two tasks are in general considered as distinct, and their respective mathematical or logical tools different. The originality of the proposed approach relies on a general language used for both the planning and situation analysis problems. The planning process is then seen as *effect-based* (accounting for post-conditions of actions) while taking into account

the mental states of the agents, which is required as a precondition for acting. The richness of the language proposed allows one to formally link the two concepts of *ability* and *awareness*, often considered separately due to the limitation of mathematical languages. More details can be found in [1].

Principal results: The main contribution of this work is the formalization of the situation analysis problem for a coalition, in a hybrid language allowing both numerical and symbolic information to be processed in a consistent manner. The main subjects tackled are:

- the functional model of agents inside a communication network, implying the characterization of actions and protocols;
- the representation of individual and group epistemic states;
- the evolution of beliefs and knowledge of agents (revision, update, learning, information sharing).

The language suggested for the formalization of the situation analysis problem is that of *interpreted systems*. This general formal framework makes it possible to represent and analyze distributed systems, whose coalition is an example. Moreover, it allows us to (1) represent and reason about mental states such as belief or knowledge, a nec-essary task to reach situational awareness, (2) analyze dynamic systems in terms of strategies, a task close to mission planning, (3) represent and quantify uncertainty by means of traditional numerical approaches (*e.g.* probability). In particular, tech-niques of combination of uncertain information traditionally used at level 1 of JDL (Joined Directors of Laboratory) model of Data Fusion are valid within the proposed framework. In addition to the apparatus of systems analysis based on transition states, this formal framework reconciles modal logic approaches (epistemic, temporal or deontic) and numerical approaches (probabilities or belief functions).

Significance of results: In this work, the coalition is seen as a network of agents whose characteristics are primarily related to the individual and sometimes divergent goals of the agents. Certain actors can combine for a common goal even if some of their interests diverge. The method of coalition analysis suggested is general and can be applied to any type of network of agents, *i.e.* human or artificial. This approach has been applied to the air compilation picture (*Recognized Air Picture - RAP*) in the 13dy project, and is currently used for the modelization of the surveillance problem in the project 13qd and for the tasks of detection and identification in a network of sensors in the TDP project 12pk (SASNet). Moreover, this approach is the theoretical support to the Situation Analysis Toolbox (SAT) developed within a DIR project on the coastal surveillance problem [2].

Future work: The main effort provided so far has been focused on theoretical aspects which represented a rather important challenge. Although much research remains to be achieved in this domain, the continuation of this work will concentrate on a software implementation of the approach. The challenge relies on the use of efficient data structures to be able to tackle real size problems. Preliminary results reported in the literature for equivalent implementations are encouraging since very large transition state systems (around 10^{32} states) can be checked.

Another aspect that will be covered in future works is the measurement of the performances of a coalition. This requires methods allowing a body of command to (1) appreciate a coalition with respect to its mission and the associated environment,(2) compare several coalitions under consideration for a given mission, or (3) modify certain attributes of a coalition or of its mission, in order to make it more effective. Preliminary results are provided in [3].

Sommaire

Présentation d'un cadre formel pour l'analyse de situation : Application à la décision collaborative dans le cadre d'une coalition

Anne-Laure Jousselme, Patrick Maupin ; DRDC Valcartier TR 2007-003 ;
Recherche et développement pour la défense Canada – Valcartier ; mai 2014.

Contexte : L'analyse de la situation a pour but de fournir un certain éveil situationnel aux agents de la coalition. Au sein d'une coalition, il apparaît fondamental qu'au moins certains agents clé aient une compréhension commune de la situation sur laquelle ils vont baser leurs décisions et stratégies conjointes pour mener à bien la mission qui leur a été confiée. Cet état d'éveil situationnel repose, d'une part, sur des compréhensions individuelles des agents au sein de la coalition et d'autre part, sur le partage des informations relatives à cette compréhension individuelle. La tâche d'analyse de la situation à laquelle est confrontée une coalition implique donc une *perception* conjointe de la situation, une *compréhension* partagée ou commune et une *projection* de ce que pourrait être la situation dans un futur proche afin de mieux l'appréhender. Les informations récoltées doivent alors être combinées en gérant l'incertitude et les conflits éventuels. Les informations doivent être échangées sur la base de leur pertinence ou incertitude et tenir compte des politiques de partage (sécurité des informations). Le produit de l'analyse de situation se matérialise alors en une image aérienne (*RAP - Recognized Air Picture* ou maritime *RMP - Recognized Maritime Picture*).

Grâce à la collaboration avec l'ONERA (Département de Traitement de l'Information et Modélisation - DTIM) de Toulouse (France) sur le problème de décision collaborative dans le cadre d'une coalition, (Arrangement Spécifique 23 entre le Canada et la France (AS23)), nous avons développé un modèle formel d'analyse de coalition. Nos principales préoccupations sont (1) la formalisation de l'analyse de situation ainsi que (2) la compatibilité avec le modèle de planification développé par l'équipe de l'ONERA. Le problème de planification a été modélisé avec le langage du calcul des situations par l'équipe d'ONERA, un langage logique pour raisonner sur les actions.

Nous proposons ici un modèle formel d'analyse de coalition reposant sur la capacité d'une coalition à mener à bien une mission. La réalisation d'une mission implique d'une part sa *planification*, *i.e.* la définition d'une séquence d'actions conjointes à réaliser par un groupe d'agents et, d'autre part, l'*analyse de la situation* à laquelle fait face la coalition. Ces deux tâches sont, en général, considérées comme distinctes et les outils mathématiques pour les traiter, différents. L'originalité de l'approche proposée

repose sur un langage général utilisé à la fois pour les problèmes de planification et d'analyse de situation. Grâce à cette approche, le processus de planification peut être basé sur les effets tout en tenant compte des états mentaux des agents requis comme préconditions aux actions. La richesse du langage proposé permet de lier formellement les concepts de *capacité* et d'*éveil situationnel*, souvent considérés et définis séparément principalement à cause des limitations des outils utilisés. Plus de détails sont donnés dans [1].

Principaux résultats : La principale contribution de ce travail est la formalisation du problème d'analyse de situation pour une coalition dans un langage hybride permettant de traiter à la fois des données numériques et des informations symboliques, de façon consistante. Les principaux thèmes abordés sont :

- le modèle fonctionnel des agents à l'intérieur d'un réseau de communication, *i.e.* caractérisation des actions et protocoles ;
- les états épistémiques individuels et de groupe,
- l'évolution des croyances (révision et mise à jour, apprentissage, échanges d'informations).

Le langage proposé pour la formalisation du problème d'analyse de situation est celui des *systèmes interprétés*. Ce cadre formel général permet de représenter et d'analyser des systèmes distribués dont la coalition est un exemple. Il permet de (1) représenter et raisonner sur les états mentaux des agents tels que la croyance ou la connaissance, une tâche nécessaire pour atteindre un éveil situationnel, (2) analyser la dynamique d'un système en matière de stratégies, une tâche proche de la planification de mission, (3) représenter et quantifier l'incertitude à l'aide des théories classiques. Ainsi, les techniques de combinaison d'information incertaine ou imprécise traditionnellement utilisées au niveau 1 du modèle JDL (Joint Directors of Laboratory) de Fusion de Données sont valides dans ce modèle. En plus de l'appareil d'analyse de systèmes basé sur des transitions d'états, ce cadre formel concilie les approches de logiques modales (épistémiques, temporelles, ou déontiques) et numériques (probabilités ou fonctions de croyance).

Importance des résultats : Dans ce travail, la coalition est vue comme un réseau d'agents dont les caractéristiques sont liées essentiellement aux buts individuels et parfois divergents des agents. Certains acteurs s'allient pour un but commun même si certains de leurs intérêts divergent. La méthode d'analyse de coalition proposée est générale et peut être appliquée à tout autre réseau de n'importe quel type d'agents, humains ou artificiels. En particulier, cette approche, appliquée pour la construction de l'image aérienne (RAP) dans le projet 13dy, est actuellement utilisée pour la

modélisation du problème de surveillance incluant les tâches de détection et d'identification dans un réseau de capteurs dans le projet 13qd et le projet de démonstration technologique 12pk (SASNet). De plus, cette approche est le support théorique du Situation Analysis Toolbox (SAT) développé dans le cadre d'un DIR portant sur le problème de surveillance côtière [2].

Travaux futurs : Jusqu'à présent, l'essentiel de l'effort a été concentré sur l'aspect théorique qui présentait un défi assez important. Bien que de nombreuses recherches restent à accomplir dans ce sens, la poursuite de ces travaux sera axée sur l'implémentation logicielle de l'approche, *i.e.* poursuite du développement de SAT. Le principal défi à ce niveau repose sur l'utilisation de structures de données efficaces permettant de traiter des problèmes de tailles réelles. Les résultats préliminaires rapportés dans la littérature sont encourageants, puisque des systèmes de transitions d'états très grands (environ 10^{32} états) peuvent être vérifiés.

Nous comptons d'autre part étudier la façon dont on peut mesurer les performances *a priori* d'une coalition. Cette étude a pour but de définir des méthodes permettant à un organe de commandement (1) d'apprécier une coalition vis-à-vis de sa mission et de l'environnement associé, (2) de comparer plusieurs coalitions envisagées pour une mission donnée, (3) ou encore de modifier certains attributs caractéristiques d'une coalition ou de sa mission, afin de la rendre plus efficace. Des résultats préliminaires ont été rapportés dans [3].

Table des matières

Abstract i

Résumé i

Executive summary iii

Sommaire vi

Table des matières ix

Liste des figures xii

Liste des tableaux xiii

1 Introduction 1

1.1 Schéma général d'analyse 1

1.2 Problématique spécifique 3

1.3 Approche proposée 3

1.4 Structure du document 6

2 Éléments théoriques 9

2.1 Capacité et engagement d'une coalition 9

2.2 Systèmes interprétés 11

2.2.1 Les éléments du modèle 12

2.2.2 Systèmes interprétés et calcul des situations 21

3 Analyse de la situation 25

3.1 Fusion d'information de haut niveau 25

3.2 Une approche issue des sciences cognitives 26

3.3 Nécéssité d'un cadre théorique général 28

3.4 Modèle d'analyse de situation pour une coalition 29

3.5 Situation 31

3.5.1 État global et situation 32
3.5.2 Définition 32
3.6 Éveil situationnel 34
3.7 Retour sur les définitions de capacité, engagement et mission 35
3.7.1 Mission 36
3.7.2 Engagement 38
3.7.3 Capacité d'une coalition à réaliser une mission 39
3.8 Résumé 40
4 La coalition en tant que réseau d'agents 43
4.1 Description d'un agent 43
4.2 L'environnement 44
4.3 Les actions 45
4.4 Protocoles 48
4.5 Réseau d'agents 49
4.6 Modèle fonctionnel d'un agent 50
4.7 Interactions entre agents et environnement 51
5 Croyances, certitudes et connaissances 53
5.1 Niveau individuel 54
5.2 Niveau du groupe d'agents 56
6 Évolution des états épistémiques 59
6.1 Le statut des informations 59
6.1.1 Si l'agent i reçoit ϕ alors il connaît ϕ 60
6.1.2 Si l'agent i reçoit ϕ alors il croit ϕ 60
6.2 Apprentissage 61

6.3 Partage des informations 62
6.3.1 Échanges d'informations au sein d'une coalition 63
6.3.2 Communication /Diffusion 63
6.3.3 Politique de partage 64
6.3.4 Protocole de partage des informations 65
7 Conclusion et perspectives pour les travaux futurs 67
Références 71
Annexe A : Représentation d'états épistémiques 77
A.1 Connaissance et croyance 77
A.1.1 Système d'axiomes 78
A.1.2 Croyance 78
A.1.3 Illustrations 79
A.1.4 Connaissance de groupe 80
A.2 Protocoles à base de connaissance 80
A.3 Actions orientées par la connaissance 82
A.4 Partage de la connaissance et des croyances dans une coalition 83
A.4.1 Communication implicite 84
A.4.2 Annonces publiques 84
A.4.3 Transmission de message 86
Annexe B : Prise en compte de l'incertitude 89
B.1 Théorie des ensembles 90
B.2 Probabilités 90
B.3 Autres extensions 91
B.4 Incertitude et connaissance 91
Annexe C : Notations 93

Liste des figures

Figure 1 : Schéma général d'analyse de coalition 1

Figure 2 : Une exécution dans l'espace des états globaux possibles pour le système 14

Figure 3 : Arbre de probabilités pour un système synchrone 21

Figure 4 : Modèle de Fusion de Données JDL révisé et ses applications [4] 26

Figure 5 : Le modèle d'éveil situationnel d'Endsley et la prise de décision [5, 6] 27

Figure 6 : La situation comme système de transitions d'états 33

Figure 7 : Description d'un agent 43

Figure 8 : Différents types de protocoles selon les tests effectués et les actions impliquées 49

Figure 9 : Réseau d'agents évoluant dans un environnement 50

Figure 10 : Modèle d'un agent 50

Figure 11 : Interactions entre agents. 51

Figure 12 : Ensemble des croyances, certitudes et connaissances d'un agent 55

Figure A.1 : Représentation de la connaissance dans des systèmes synchrones ou asynchrones (adaptés de [7]) 79

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison entre les systèmes interprétés et le calcul des situations. Le symbole - signifie que le concept n'existe pas dans le cadre théorique concerné 22

Tableau 2 : Exemples d'actions épistémiques, ontologiques, internes et externes 47

Tableau 3 : Hiérarchie des états de connaissance de groupe [8] 57

Page laissée en blanc à dessein.

1 Introduction

Le travail présenté dans ce rapport est le produit d'une collaboration internationale entre RDDC Valcartier, Section systèmes d'aide à la décision pour le commandement et contrôle (SAD-C2) et l'ONERA (Office national d'études et de recherches aérospatiales) de Toulouse, Département de traitement de l'information et modélisation (DTIM) dans le cadre de l'Arrangement Spécifique 23 (AS23) signé entre la France et le Canada sur le sujet de *Décision collaborative dans le cadre d'une coalition.*

Il existe trois types de coalitions : la coalition militaire, la coalition d'agents et le partenariat multi-organisationnel [9]. Par example, une coalition militaire est un arrangement ad hoc entre deux nations ou plus pour un but commun, formée en réponse à une situation problématique (traduit de [9]). Dans tous les cas, la formation d'une coalition permet aux membres de combiner leurs ressources et de bénéficier d'une complémentarité qui accroît leurs capacités individuelles [9]. À un niveau très basique, la coalition militaire peut être vue simplement comme une coalition d'agents, c'est-à-dire un réseau d'agents devant mener à bien une mission et, par conséquent, interagir et coopérer. La formalisation proposée ici concerne donc un modèle assez général de coalition (c'est-à-dire de type réseau d'agents) qui pourra être enrichie au besoin.

1.1 Schéma général d'analyse

Le schéma général d'analyse de la coalition proposé est représenté à la figure 1. On suppose donc que la coalition $\mathcal{C} = (\mathcal{K}; \mathcal{M})$ est formée, que la mission $\mathcal{M}$ a été assignée à l'agent institutionnel $\mathcal{K}$ et qu'une certaine tâche de planification a permis de définir une série de protocoles (ou stratégies) pour chacun des acteurs de la coalition. D'autre part, on suppose que le contexte de l'opération γ a été défini, fixant en particulier les états initiaux possibles et le protocole de l'environnement. L'exécution du protocole joint P dans le contexte γ génère la situation que l'on veut analyser.

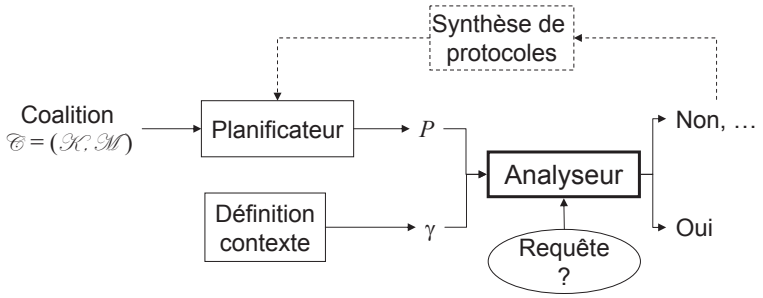


Figure 1 : *Schéma général d'analyse de coalition*

Les requêtes sont alors exprimées par des formules de logiques temporelles, épistémiques ou une combinaison des deux. Par exemple, on pourra ainsi demander si un agent particulier ou un groupe d'agents connaîtra toujours (tout au long de l'exécution de sa mission), ou éventuellement, ou à l'instant suivant, etc., la position des troupes ennemies. Dans le cas d'une réponse négative de l'analyseur, le protocole initial P pourra être modifié. On conçoit donc un processus itératif où les protocoles des agents sont modifiés jusqu'à ce que les propriétés désirées soient vérifiées, résultant ainsi en une meilleure planification tenant compte des connaissances ou croyances des agents lors de l'exécution de la mission.

Les stratégies auxquelles on fait référence dans ce schéma général peuvent tout aussi bien impliquer des actions physiques (amener des vivres, sécuriser une zone, évacuer la population, etc.) que des actions épistémiques, en particulier d'échange d'information (envoyer message m à l'agent i, etc.) ou de raisonnement (réviser ses croyances, combiner des informations, etc.). Ainsi, on peut connaître d'une part l'éveil situationnel des différents agents, de façon individuelle ou conjointe, en posant des requêtes du type "est-ce que le groupe d'agents G connaît la position de l'ennemi ?", "De façon distribuée ?", "Un seul le sait ?", "Tous la connaissent ?", "En ont-ils la connaissance commune ?", etc. On peut d'autre part analyser l'efficacité du processus de partage d'information au sein de la coalition, représenté par P.

Les échanges d'informations entre plusieurs agents sont régis sur la base de politiques de partage qui définissent qui doit, peut ou ne peut pas envoyer telle ou telle information et à qui, respectant la sécurité des informations. Dans le cas où l'agent a simplement le droit d'échanger l'information (c'est-à-dire qu'il n'est ni obligé ni n'a pas le droit de le faire), sur quelle base décidera-t-il d'envoyer ou non l'information ? Un critère important est celui de la pertinence de ladite information. En effet, dans des contextes ou la communication doit être minimisée, par crainte d'interception des messages par l'ennemi, par exemple, il devient très important de ne transmettre que les informations les plus pertinentes. Au sein d'une coalition, les mêmes remarques s'appliquent avec la particularité que les acteurs, souvent de nationalités différentes, peuvent ne vouloir partager que le minimum d'informations avec leurs alliés, c'est-à-dire celles qui vont permettre de mener à bien la mission.

En dehors du problème des échanges d'informations, reste celui de la représentation de l'incertitude et de la gestion des informations conflictuelles. La tâche de fusion d'information est par conséquent au cœur de l'analyse de situation. Elle permet aux agents d'une coalition d'évoluer de la connaissance distribuée d'une information (personne ne connaît cette information, mais le groupe a le potentiel de la connaître, moyennant une opération de fusion) vers la connaissance commune.

1.2 Problématique spécifique

Ce rapport conclut en particulier le travail du poste 2 *Prise en compte de la situation dans le cadre d'une coalition* de l'AS 23. Les points développés dans ce rapport concernent les notions d'analyse de situation, d'éveil situationnel, de partage de la connaissance ainsi que de la mise à jour des croyances et des connaissances dans le cadre d'une coalition. Les discussions qui y sont présentées se basent sur les travaux du poste 1 *Notion de coalition et position du problème*, travail rapporté dans les documents [10, 11, 12, 13] et résumé dans [14]. De plus, ce rapport s'appuie sur les rapports [15, 16] concernant les avancements du poste 2 sur les sujets respectifs de *partageabilité des informations au sein d'une coalition* et de *politiques de partage*.

La formalisation de la tâche d'analyse de situation dans une coalition est par conséquent l'objectif de ce rapport. L'analyse de situation a pour but de fournir un certain éveil situationnel pour les agents de la coalition. En effet, au sein d'une coalition, il apparaît fondamental qu'au moins certains agents clé aient une compréhension commune de la situation sur laquelle ils vont baser leurs décisions et stratégies conjointes pour mener à bien la mission qui leur a été confiée. Cet état d'éveil situationnel repose d'une part sur des compréhensions individuelles des acteurs au sein de la coalition, et d'autre part sur le partage des informations relatives à cette compréhension individuelle. La tâche d'analyse de la situation à laquelle doit faire face une coalition implique donc une perception conjointe de la situation, une compréhension partagée ou commune et une projection de ce que pourrait être la situation dans un futur proche afin de mieux l'appréhender. Les informations récoltées doivent alors être combinées en gérant l'incertitude et les conflits éventuels. Certaines informations devront être échangées entre certains agents de la coalition sur la base de leur pertinence ou incertitude, et tenant compte de politiques de partages propres aux membres de la coalition (sécurité des informations). Le produit de l'analyse de situation se matérialise alors en une image aérienne ou maritime (RAP ou RMP).

1.3 Approche proposée

Parmi les tâches de fusion de haut niveau, l'analyse de situation (AS) requiert qu'on soit capable de raisonner à propos des processus de décision des coalitions. Les sémantiques telles que celles proposées dans la communauté d'intelligence artificielle logique semblent être plus appropriées que les approches purement numériques, typiques des niveaux plus bas de fusion d'information. En effet, dans les niveaux les plus hauts de fusion d'information, on a non seulement besoin de savoir si une proposition donnée est vraie ou fausse (éventuellement avec un certain degré d'incertitude), mais surtout de modéliser les circonstances dans lesquelles cette validité réside ainsi que les propriétés des agents et leurs contraintes. Récemment, plusieurs formalismes ont été avancés comme candidats potentiels pour la formalisation unifiée de la fusion

d'information de haut niveau [17, 18, 19, 20].

Pour que des agents puissent coopérer, plusieurs tâches de coordination sont nécessaires. La coopération peut alors être vue comme un processus de coordination à l'intérieur d'un groupe d'agents engagés envers un ensemble de buts communs. Les agents forment alors une *coalition*. Cependant, il arrive parfois que les agents aient des intérêts incompatibles, de sorte que la formation autonome de coalition est difficile sans capacités de raisonnement et de délibération. Un moyen efficace pour allouer des tâches distribuées est la méthode dite du réseau de contact, où chaque agent Ag_i possède une *table de compétence* associant à chaque agent de la coalition $\mathsf{Ag}_1, \ldots, \mathsf{Ag}_n$ une liste de compétences $C_1 : [\mathsf{Ag}_{11}, \ldots, \mathsf{Ag}_{1k}]; \ldots; C_n : [\mathsf{Ag}_{n1}, \ldots, \mathsf{Ag}_{nm}]$. À l'aide de cette information, un agent donné peut alors contacter les agents compétents pour une tâche particulière ou bien répondre à une demande du même type provenant d'un autre agent.

Il est d'autre part nécessaire de savoir si les agents compétents ont la *capacité* d'exécuter les tâches faisant l'objet de la délibération, et peuvent ainsi s'*engager* à leur réalisation. Un problème général abordé dans ce travail est de montrer comment les notions de compétence, capacité et engagement sont liées à l'atteinte d'un certain éveil situationnel.

Deux approches ressortent de la littérature :

1. Une approche de *planification* où des séquences d'actions doivent être décrites et les tâches correspondantes allouées pour que la mission puisse être coordonnée et son exécution contrôlée (à l'écran) ;

2. Une approche d'*analyse de situation* où l'information recueillie par les agents de la coalition est compilée pour générer une image commune de la situation, qui sera utilisée pour évaluer les menaces potentielles ou autres comportements indésirables de l'ennemi.

Le problème spécifique abordé dans ce travail est la réconciliation des deux approches à travers un formalisme unifié.

En pratique, un plan est habituellement divisé en un *corps*, spécifiant une séquence d'actions et un *descripteur* établissant (1) l'état de la situation prérequis pour que le plan soit exécutable (les préconditions du plan), (2) quelles *intentions* le plan doit satisfaire et (3) quelles sont les conditions d'invocation pour ce plan (les événements déclencheurs). Les membres de la coalition sont des agents coopératifs dont les engagements ne sont ni contradictoires deux à deux ni envers le but global du groupe. Cette notion d'engagement est au cœur de la théorie des agents BDI (*Belief Desire Intention* - Croyance Désir Intention) [21, 22]. Dans la théorie BDI, les *Croyances* représentent l'information que l'agent possède à propos du monde extérieur, les *Désirs* sont les

tâches allouées aux agents et les *Intentions* sont les désirs que l'agent s'est engagé à atteindre ou à maintenir en allouant une certaine quantité d'effort et de ressources. Même si nous n'abordons pas directement ni la question ni la définition précise de l'engagement, ce travail pourra être utile pour clarifier le besoin de lier formellement le raisonnement à propos de l'éveil situationnel et l'exécution de plan.

Pour Rao et Georgeff [23], les engagements ont deux parties : (1) les intentions ou un ensemble de buts que l'agent s'est engagé à atteindre ou maintenir et (2) la condition permettant à l'agent de remplir son engagement. Les buts sont spécifiés soit en termes de valeurs de vérité de propositions soit en termes d'états à atteindre. Par conséquent, plutôt qu'une contrainte, l'utilisation d'engagements permet une plus grande flexibilité dans la modélisation des coalitions et en pratique, elle peut réduire le temps de calcul en particulier dans le cas d'environnements dynamiques. De façon implicite, la notion d'engagement est fortement bornée par l'éveil situationnel puisqu'il existe un lien étroit entre les conditions de terminaison des engagements pour les agents, les préconditions des plans et conditions d'invocation des plans. Cette relation fonctionnelle entre l'éveil situationnel et le processus de planification est la principale substance sur laquelle les membres de la coalition peuvent décider et modifier leur comportement lorsqu'ils exécutent des séquences d'actions dans un environnement dynamique.

La logique BDI de Rao et Georgeff est une extension de la logique temporelle CTL* [24] dont provient le cadre formel proposé pour l'analyse de situation (c'est-à-dire les systèmes interprétés présentés dans [20, 25]). Il semble donc naturel de fusionner la sémantique des *systèmes interprétés* avec un langage logique tel que le *calcul des situations* qui a jusqu'à présent été essentiellement utilisé pour raisonner au niveau des séquences d'actions.

Nous avons donc l'alternative suivante : (1) Introduire des notions de connaissance et d'incertitude dans le calcul des situations comme il est proposé par exemple dans [26], ou (2) faire cadrer la logique de l'action qu'est le calcul des situations dans la sémantique des systèmes interprétés spécialement conçue pour représenter la connaissance et étendue pour inclure des concepts d'incertitude quantitative et de théorie des jeux. Dans ce travail, nous avons suivi la seconde voie, par ailleurs déjà suivie par Wooldridge *et al.* , ce qui a conduit aux extensions des logiques ATL (*Alternating-time Temporal Logics*) [27, 28, 29], des logiques de coalition et de coopération.

L'approche proposée permet de tenir compte

1. conjointement des capacités des agents et d'analyser les effets de celle-ci sur l'exécution de cette stratégie (par exemple, un UAV (Unmanned Aerial Vehicle) effectuant un tâche de reconnaissance informe nécessairement l'ennemi de la présence des troupes alliées, ce qui modifiera peut-être leurs intentions) ;

2. des intérêts différents et des buts parfois divergents des membres d'une même coalition qui, à la différence d'une équipe, ont chacun une stratégie pour satisfaire un but commun et éventuellement des buts divergents ;

3. que l'incertitude est elle-même le résultat de l'exécution d'un protocole (de l'environnement), ce qui permet de mieux l'appréhender.

1.4 Structure du document

Les principales définitions et concepts pertinents au contenu de ce présent rapport et issus des travaux précédents sont rappelés dans le chapitre 2. Le modèle de coalition est tout d'abord présenté ainsi que les définitions de capacité et engagement (chapitre 2.1). Le choix du formalisme y est également justifié et détaillé (section 2.2). Le lien entre le langage des systèmes interprétés et celui du calcul des situations (logique de l'action) est abordé brièvement dans la sous-section 2.2.2.

Le problème d'analyse de situation est présenté au chapitre 3, selon un point de vue de fusion d'information (section 3.1) et de sciences cognitives (section 3.2). La section suivante (3.3) justifie la nécessité d'un cadre général dans lequel ces deux approches se retrouvent. Le modèle d'analyse de situation formalisé à l'aide des systèmes interprétés est alors proposé à la section 3.4. Sur la base de ce modèle, nous donnons par la suite des définitions formelles de situation (section 3.5) et d'éveil situationnel (section 3.6). Nous revenons enfin sur les notions de capacité, engagement et mission à la section 3.7.

Au chapitre 4, la coalition est vue comme un réseau d'agents. Les agents du modèle sont tout d'abord introduits, l'environnement étant vu comme un agent particulier sur lequel on possède peu d'information et pas (ou très peu) de contrôle (sections 4.1 et 4.2). Nous caractérisons ensuite les actions selon deux axes croisés, épistémiques vs ontologiques et interne vs externe, dans la section 4.3. Cette même distinction est appliquée aux protocoles à la section 4.4. Nous définissons alors les interactions entre agents et leur environnement (section 4.7) à travers un réseau d'agents (section 4.5). Un modèle fonctionnel d'agent est enfin présenté à la section 4.6.

Des modèles de croyance, certitude et connaissance sont proposés au chapitre 5, reposant sur une définition en termes de logiques modales épistémiques pour la connaissance. Une quantification permet de dériver les définitions de croyance et certitude. Nous abordons ces notions au niveau individuel (pour un seul agent) à la section 5.1 et au niveau d'un groupe d'agents à la section 5.2. Des compléments portant sur l'utilisation des logiques épistémiques pour représenter des états mentaux d'agents sont présentées à l'annexe A, et portant sur la représentation de l'incertitude, à l'annexe B.

Les évolutions des états épistémiques des agents sont enfin discutés au chapitre 6. Ce chapitre concerne tout d'abord les différents statuts des informations (section 6.1), la notion d'apprentissage (section 6.2) et enfin le partage des informations dans une coalition (section 6.3).

Le chapitre 7 conclut cette étude et ouvre la discussion sur de nouvelles perspectives pour les travaux futurs.

Page laissée en blanc à dessein.

2 Éléments théoriques

Les principaux concepts du modèle de coalition ont été introduits dans [14]. Nous rappelons à la section 2.1 les définitions qui nous serviront de base pour le modèle d'analyse de situation, c'est-à-dire les notions de coalition, d'engagement et de capacité. La définition d'un modèle de coalition vise à analyser les capacités de celle-ci à effectuer une mission donnée. Le langage choisi est celui du calcul des situations, une logique du premier ordre qui permet de modéliser et de raisonner à propos des actions et des capacités, introduite en 1969 par McCarthy et Hayes [30]. Dans ce langage, les changements du monde sont le résultat d'exécutions d'actions. Nous n'entrerons volontairement pas dans la description de cette logique et référons le lecteur aux travaux mentionnés ci-dessus pour plus de détails. Cependant, nous justifions à la sous-section 2.2.2 le choix du langage de modélisation pour le processus d'analyse de situation, c'est-à-dire le langage des systèmes interprétés, et établissons le lien entre ces deux approches logiques.

2.1 Capacité et engagement d'une coalition

Definition 2.1 (Coalition)
Une coalition *est représentée par un couple* $\mathcal{C} = (\mathcal{K}, \mathcal{M})$ *où :*

- $\mathcal{K}$ *est un agent institutionnel auquel est affectée la mission* $\mathcal{M}$*, avec*
  - $membres(\mathcal{K})$ *est l'ensemble des agents institutionnels jouant un rôle de* membre *dans* $\mathcal{K}$*,*
  - $acteurs(\mathcal{K})$ *est l'ensemble des agents (institutionnels ou pas) jouant un rôle d'*acteur *dans* $\mathcal{K}$*,*
  - $ordonnateur(\mathcal{K})$ *est l'agent institutionnel jouant un rôle de* mandataire *dans* $\mathcal{K}$*.*
- $\mathcal{M}$ *est une mission décrite par*
  - *Soit un ensemble* $\mathcal{E}$ *d'états à atteindre, soit directement une action complexe, définie par combinaison de constructeurs d'actions (séquence, choix non déterministe, etc.) au moyen*
    - *d'un ensemble Actions des actions possibles sur le monde, éventuellement muni d'un ensemble* $\mathcal{T}$ *de relations temporelles permettant d'ordonner des actions de Actions selon un plan temporel.*
    - *et d'un ensemble* $\mathcal{D}$ *de connaissances décrivant la dynamique du monde en terme d'actions et d'états, sous la forme*

$$\langle preconditions \rangle action \langle postconditions \rangle$$

où

  - *les préconditions sont les conditions nécessaires portant sur l'agent ou les agents en charge de l'action, sur les ressources nécessaires, ou sur l'environnement,*
  - *les post-conditions sont les propriétés sur l'agent ou les agents en charge de l'action, sur les ressources nécessaires, ou sur l'environnement, qui sont vérifiées après l'exécution de l'action.*
- *un ensemble Pr de préférences définies relativement à ces états : préférences temporelles (par exemple, pour exprimer un critère de réussite temporel sur la mission), préférence entre les états de $\mathcal{E}$ eux-mêmes, etc.*

La notion de capacité introduite ici est une notion **explicite**, basée sur les actions que sont capables de commettre collectivement les agents. On distingue deux dimensions : (1) une précondition au niveau de l'agent représentée par sa *compétence* et (2) une précondition au niveau des états représentée par sa *capacité*, la compétence étant une condition nécessaire mais pas suffisante pour être capable de réaliser une action.

Definition 2.2 (Compétence)
La notion de **compétence** *est une notion primitive définie pour un agent (ou un groupe d'agents, selon l'action envisagée). La compétence représente le savoir-faire concernant une action et peut être considérée comme pérenne ou non tout au long de la mission.*

Ainsi, en plus de devoir être compétent pour réaliser une action a, certaines conditions indépendantes de sa compétence et portant seulement sur l'état de l'agent i, des autres agents et de l'environnement doivent être vérifiées.

Definition 2.3 (Capacité d'un agent)
Soient i un agent, a une action primitive et s un état global du système ou situation. On dit que i est capable *de réaliser a dans la situation s si :*

- *i est* compétent *pour réaliser a dans s ;*
- *les conditions spécifiques à a, portant sur l'environnement et sur i sont vérifiées dans s.*

Les conditions liées à l'agent peuvent être, par exemple, son état de fatigue, et celles liées à l'environnement peuvent être par exemple la disponibilité de certaines ressources nécessaires pour réaliser a.

La capacité d'un groupe d'agents est alors déduite.

Definition 2.4 (Capacité d'un groupe d'agents)
Soit G un groupe d'agents, a une action primitive et s un état global du système ou situation. On dit que G est capable *de réaliser a dans la situation s si un des sous-groupes G' est capable de réaliser a dans s.*

2.2 Systèmes interprétés

Le formalisme utilisé pour la formalisation du problème d'analyse de situation est celui des *systèmes interprétés*, cadre formel introduit par Fagin, Halpern, Moses et Vardi [7] comme modèle d'analyse pour les systèmes distribués. Ce formalisme comme outil pour l'analyse de situation (niveaux supérieurs de fusion) a été introduit dans [20, 31].

D'une part, il nous semble un outil intéressant pour analyser une situation dans le cadre d'une coalition, puisque ce cadre général permet de :

1. représenter et analyser des systèmes distribués, dont la coalition est un exemple ;
2. représenter et raisonner sur les états mentaux des agents, tels que la croyance ou la connaissance, une tâche nécessaire pour atteindre un éveil situationnel ;
3. analyser la dynamique d'un système en terme de stratégies, une tâche proche de la planification de mission ;
4. représenter et quantifier l'incertitude à l'aide des théories classiques et, par conséquent d'utiliser toutes les techniques de combinaison d'information incertaine ou imprécise classiquement utilisées au niveau 1 du modèle JDL (Joint Directors of Laboratory) de fusion de données.

En plus de l'appareil d'analyse de systèmes basé sur des transitions d'états, ce cadre formel concilie approches de logiques modales (épistémiques, temporelles, ou déontiques) et numériques (probabilités ou fonctions de croyance). L'extension pour la représentation du vague et du flou est aussi possible mais ne sera pas abordée dans un premier temps.

D'autre part, il existe une connexion assez triviale entre ce langage et celui du *calcul des situations* utilisé dans les travaux [12] pour la formalisation de la notion de capacité, connexion que nous avons développée dans [1]. Selon l'application, il est plus judicieux de raisonner en terme d'états (systèmes interprétés) ou en terme d'actions (calcul des situations). Cependant, le passage d'un modèle à l'autre est trivial puisque les deux langages sont basés sur un graphe de transitions d'états, transitions étiquetées par des actions. Dans un cas, on considère plutôt des séquences d'états, alors que dans l'autre on parle de séquences d'actions. Dans un cas comme dans l'autre, ces séquences définissent des chemins à l'intérieur d'un graphe d'états. Une discussion à ce sujet a été initialement proposée dans [26].

Le groupe d'agents $\mathcal{A}$ auquel on fait référence dans la suite du document est défini à partir de l'agent institutionnel $\mathcal{K}$ et détaillé ci-dessous.

2.2.1 Les éléments du modèle

Agents et environnement

On considère un groupe de $n+1$ agents $\mathcal{A}$. La principale caractéristique d'un agent est de pouvoir agir. Ainsi, un robot, un classificateur, un processus, un agent humain sont des agents. Un bidon d'essence n'est pas un agent [3].

Un agent particulier de ce groupe est l'*environnement*, particulier au sens où on n'a pas (ou peu) de contrôle sur celui-ci. Cet agent pourrait par exemple tout aussi bien représenter le canal de communication, les conditions météorologiques, les forces ennemies (voir section 4.2).

Étant donnée une coalition $\mathcal{C} = (\mathcal{K}, \mathcal{M})$, le groupe d'agents auquel on fait référence sera défini par rapport à l'agent institutionnel $\mathcal{K}$ et ainsi selon le niveau de description du système on pourra avoir :

- $\mathcal{A} \subseteq Membres(\mathcal{K})$,
- $\mathcal{A} \subseteq Acteurs(\mathcal{K})$,
- $\mathcal{A} \subseteq Atouts(\mathcal{K})$.

Du point de vue de l'analyse de situation, la dernière définition de $\mathcal{A}$ comme sous-ensemble d'atouts est la plus adaptée au niveau de description de notre problème.

On ne se préoccupe pas ici de la structure sociale existant entre les agents, celle-ci étant une couche supplémentaire à rajouter au modèle. On peut noter cependant que celle-ci peut reposer sur différents aspects tels que la hiérarchie déontique entre agents, la proximité (physique, visuelle, de communication, etc.).

États locaux et état global

À chaque agent i de $\mathcal{A}$ est associé un *état local* l_i qui contient toute l'information à laquelle l'agent a accès. l_i appartient à un ensemble supposé fini L_i d'états possibles pour l'agent i. L'état de l'environnement $l_e \in L_e$ est défini comme étant toute l'information pertinente au système et qui n'est pas contenue dans les états locaux des autres agents.

On définit l'*état global* s du système comme un vecteur dont chaque composante est un état local d'un agent. S est un ensemble d'états globaux possibles pour le système. Ainsi, S est un sous-ensemble du produit cartésien des états locaux possibles des agents :

$$S \subseteq L_1 \times \ldots \times L_n \times L_e \tag{1}$$

3. À moins qu'il n'explose !

La modélisation d'un état local est souvent une tâche ardue. Par exemple, dans le cas de plusieurs acteurs de la coalition sélectionnés pour effectuer une mission, les états locaux de chacun des agents pourraient contenir :

- Leur localisation,
- La zone où doit se dérouler l'action,
- Les ressources et atouts dont ils disposent,
- La stratégie à suivre pour atteindre l'objectif,
- Les ressources supposées, estimées ou connues des troupes ennemies,
- Les informations sur les stratégies possiblement utilisées par l'ennemi,
- L'historique jusqu'à ce point,
- ...

Suivant le problème à étudier, l'état local de l'environnement pourrait contenir :

- La fiabilité de transmission du canal de communication,
- Les positions des troupes ennemies,
- Le matériel dont dispose l'ennemi,
- La séquence d'actions commises par tous les agents jusqu'à un instant donné,
- ...

Nous pensons que cette description distribuée est intéressante pour modéliser une coalition. En effet, chaque membre de la coalition a ses propres objectifs, ses propres ressources et atouts, ses propres stratégies, etc. Un membre de la coalition peut agir seul et réaliser certaines missions, et le fait d'appartenir à une coalition lui permet de profiter des ressources et connaissances des autres membres et d'accomplir des missions plus complexes.

Le système

Une *exécution* r sur S, l'ensemble des états globaux, est une fonction du temps vers S. C'est donc une séquence d'états globaux $r(0), r(1), \ldots$ dans lequel se trouve le système au cours du temps.

Un *point* est un couple (r, m) où r est une exécution et m un instant [4]. Si $r(m) = (l_e, l_1, \ldots l_n)$ est l'état global au point (r, m), alors on définit $r_e(m) = l_e$ et $r_i(m) = l_i$

4. Pour des raisons de simplicité uniquement, le temps évolue sur l'ensemble des entiers naturels.

pour $i = 1, \ldots, n$ qui représentent respectivement les états locaux de l'environnement et des autres agents au point (r, m). Un *round* m dans l'exécution r se situe entre l'instant $m-1$ et l'instant m. Ces concepts sont illustrés à la figure 2.

Un *système* $\mathcal{R}$ sur S est un ensemble d'exécutions sur S. On dit que (r, m) est un point dans le système $\mathcal{R}$ si $r \in \mathcal{R}$.

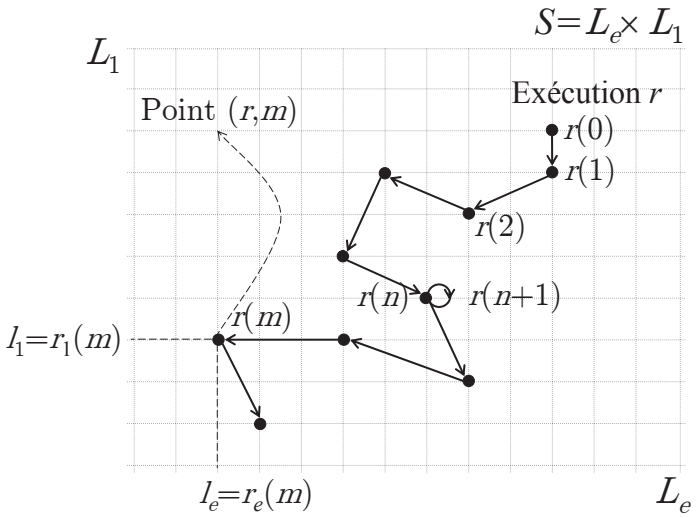


Figure 2 : *Une exécution dans l'espace des états globaux possibles pour le système*

Les actions

Les *actions* sont les causes de changements d'états du système et sont accomplies par les agents et l'environnement, lors d'un round. Ainsi, à chaque agent de $\mathcal{A}$ est associé un ensemble d'actions possibles ACT_i. L'action nulle Λ est incluse dans chaque ACT_i autorisant un agent à ne rien faire lors d'un incrément temporel. Chaque fois qu'une action est réalisée, le système change d'état et le temps est incrémenté.

Une *action conjointe* est un vecteur $\mathbf{a}$ de $ACT_i \times \ldots \times ACT_n \times ACT_e$ dont chaque composante est une action de l'agent i. Tout comme pour l'espace d'états S, on peut définir un espace ACT d'actions conjointes tel que $ACT \subseteq ACT_i \times \ldots \times ACT_n \times ACT_e$ réalisées possiblement conjointement par les agents.

Lors des travaux du poste 1, la notion d'action conjointe a été considérée comme primitive : Une action, notée précédemment α, est *a priori* conjointe, et le fait qu'elle soit exécutée par un seul agent est un cas particulier. Par conséquent, l'ensemble Var_A introduit lors de ces précédents travaux correspond donc à un ensemble d'actions conjointes possiblement exécutées par un ensemble d'agents G. Nous considérons cependant qu'une action conjointe peut être décomposée en actions élémentaires

exécutées individuellement par chacun des agents : $\mathbf{A} = [a_1 \dots a_n a_e]$ est un vecteur. Ce niveau de détail n'est cependant par toujours nécessaire et selon le cas, on peut considérer comme primitives des actions conjointes sans que la décomposition au niveau individuel de l'agent soit nécessaire. Cependant, notre formalisme nous impose d'expliciter cette décomposition individuelle, et ce, à travers la définition des ensembles ACT_i pour chacun des agents. Le fait de considérer des actions conjointes permet de représenter le fait que deux actions (ou plus) peuvent ou doivent être exécutées en même temps.

L'ensemble des actions élémentaires exécutées individuellement par les agents sera simplement $\mathbf{A} = ACT_1 \cup \dots ACT_n \cup ACT_e$.

On dira que ACT_i est l'ensemble d'actions pour lequel l'agent i est **compétent**, au sens de la définition 2.2 de compétence (page 10) :

$$ACT_i = \{a \in \mathbf{A} | i \text{ est compétent pour réaliser } a\} \tag{2}$$

Une exécution r du système $\mathcal{R}$ peut alors être décrite par :

$$(r, 0) \xrightarrow{\mathbf{a}_1} (r, 1) \xrightarrow{\mathbf{a}_2} \dots (r, m) \dots$$

où les $\mathbf{a}_k$ sont des actions conjointes de ACT.

La fonction de transition

On a donc défini un graphe d'états où les transitions sont étiquetées par des actions conjointes de ACT dans le cas général. La *fonction de transition* τ associe à chaque action conjointe $\mathbf{a}$ de ACT et pour chaque point $s = (r, m)$ du système $\mathcal{R}$, un autre point correspondant au nouvel état global obtenu après l'action $\mathbf{a}$ sur (r, m) :

$$\tau(\mathbf{a})(s) = s'$$

Les *préconditions* et *postconditions* de chacune des actions conjointes de ACT peuvent être décrites à l'aide de la fonction de transition. En effet, on a :

$$[\mathbf{a}]s = \tau(\mathbf{a})(s) \text{ est la post-condition de l'action } \mathbf{a}$$

D'après la définition 2.3 (page 10), un agent est *capable* de réaliser une action a_k s'il est compétent pour le faire et si les conditions spécifiques à l'action sont vérifiées. Comme il est mentionné plus haut, la première condition signifie simplement que $a_k \in ACT_i$. La deuxième condition signifie que a_k est une action possible pour i alors qu'il est dans un état donné, ce qui est décrit par la fonction de transition. Autrement dit, on traduit la définition 2.3 par :

Definition 2.5 (Capacité)
On dit qu'un agent i est capable *de réaliser l'action a_k dans la situation s si :*

- $a_k \in ACT_i$;
- $\exists s'; \tau(\mathbf{a})(s) = s'$ *où* $\mathbf{a}$ *est un vecteur dont la* $k^{\text{ème}}$ *composante est* a_k *et toutes les autres sont* Λ*, l'action nulle qui consiste à ne rien faire.*

Cette définition implique que l'agent évolue seul dans le système. Or, en pratique, on doit tenir compte de l'interaction avec les autres agents, d'où la définition plus utile de capacité pour un groupe d'agents. D'après la définition 2.4 (page 10), un groupe d'agents G est capable de réaliser une action conjointe $\mathbf{a}$ dans une situation s si un de ses sous-groupes G' est capable de réaliser cette action :

Definition 2.6 (Capacité d'un groupe d'agents)
On dit qu'un groupe d'agents G est capable *de réaliser l'action* $\mathbf{a}$ *dans la situation s si :*

- $\mathbf{a} \in ACT_G$;
- $\exists s'; \tau(\mathbf{a})(s) = s'$.

où ACT_G est le sous-espace de ACT à $|G|$ dimensions correspondant aux actions pour lesquelles le groupe d'agents G est compétent.

Les protocoles

Reste à présent à décrire le comportement des agents, leur manière de fonctionner, ce qu'ils doivent ou peuvent faire selon l'état dans lequel ils se trouvent. Ceci est décrit par leur protocole individuel.

Un *protocole* P_i pour un agent i de $\mathcal{A}$ est une fonction de l'ensemble de ses états locaux L_i vers un sous-ensemble non vide d'actions de ACT_i :

$$P_i : L_i \longrightarrow 2^{ACT_i} \backslash \{\varnothing\}$$

Ainsi, $P_i(l_i) \subseteq ACT_i$ est l'ensemble des actions possiblement accomplies par l'agent i lorsque celui-ci est dans l'état local l_i.

Notons que le protocole est propre à l'agent et est ainsi défini sur les états locaux plutôt que sur les états globaux, puisque l'agent ne peut baser son action que sur l'information à laquelle il a accès.

Le *protocole joint* est un vecteur $P = (P_1, \ldots, P_n)$ qui décrit le comportement global de tous les agents. On remarque que le protocole de l'environnement P_e n'est pas

inclus dans le protocole joint puisqu'il est en général inconnu. En fait, le couple (P, P_e) peut être vu comme des stratégies de joueurs opposés. En effet, en pratique on essaye d'adapter P à un protocole P_e estimé ou supposé de l'environnement.

Un protocole est donc une **stratégie** pour un agent, spécifiant ce que celui-ci doit (si le protocole est déterministe) ou peut (si le protocole n'est pas déterministe) faire suivant l'état dans lequel il se trouve. C'est par conséquent une série d'actions complexes du type **si** ϕ **alors** a_k, où l'agent i doit exécuter l'action a_k s'il peut vérifier que ϕ est vraie.

Un cas particulier est celui des *protocoles basés sur la connaissance* ("knowledge-based protocols") où la condition ϕ contient un opérateur de connaissance K_i. Ainsi, les actions posées par l'agent dépendent de sa connaissance de l'état du monde. Un exemple de ce type de protocole pourrait être "Si chaque membre de la coalition sait que l'ennemi planifie une attaque, alors la coalition doit attaquer elle aussi". Les protocoles basés sur la connaissance sont donc un moyen de relier la connaissance à l'action.

Un protocole P est décrit par un *programme* Pg, écrit dans un langage de programmation tel que le C ou le FORTRAN. Un programme standard pour un agent est de la forme :

case of
  if t_1 **do** a_1
  if t_2 **do** a_2
end case

où t_1 et t_2 sont des tests standard sous la forme d'une formule du langage propositionnel évaluée à l'aide la fonction d'interprétation π.

Le contexte

La notion de contexte est fondamentale. En effet, le contexte conditionne la modélisation et l'analyse du système de coalition. En d'autres mots, un protocole ne peut être exécuté qu'à l'intérieur d'un contexte. La notion de contexte a deux aspects :

1. D'une part, il y a l'idée de *partition* de l'information, basée souvent sur des contraintes de temps, d'espace, de caractéristiques structurelles ou fonctionnelles, dont le but est de représenter les limitations des agents intelligents. Par exemple, dans un contexte de surveillance, on délimite la zone à surveiller (rayon de 10 km autour du point de surveillance), on identifie la granularité des observations (objets de volume supérieur à 10 m^3, de vitesse supérieure à 10m/s, etc.). Cette notion de contexte est une notion de *bas niveau* qui peut être formalisée simplement par des relations d'équivalence ou des définitions plus élaborées de

seuillage. Ces types de contextes sont couramment évoqués dans la plupart des modèles d'analyse de situation.

2. Il existe une autre notion de contexte que l'on pourrait qualifier de *haut-niveau* qui relève d'un défi plus grand quant à sa formalisation. Cette notion concerne le *"setting"* dans lequel une situation donnée est observée, ses éléments mesurés, le comportement des agents évoluant dans cette situation identifié et étudié, les états psychologiques et physiques prédits. On parle par exemple de contexte de crise, contexte de recherche, contexte de maintien de la paix, ...

   Ainsi, selon le contexte de haut niveau, les actions et activités seront planifiées, programmées et exécutées différemment.

Se référant à la notion de haut niveau de contexte, le comportement d'un système est donc toujours contextuel et un protocole joint est toujours décrit dans un contexte γ. Le *contexte* γ est défini par un tuple :

$$\gamma = (P_e, S_0, \tau, \Psi)$$

où

- $P_e : L_e \rightarrow 2^{ACT_e}/\{\varnothing\}$ est le protocole pour l'environnement,
- S_0, est un sous-ensemble non vide de S correspondant aux états initiaux possibles du système,
- τ est la fonction de transition et
- Ψ est une condition d'admissibilité sur les exécutions.

Ψ spécifie quelles exécutions sont acceptables et lesquelles ne le sont pas. Formellement, Ψ est un ensemble d'exécutions et $r \in \Psi$ ssi r satisfait Ψ. La définition de contexte donnée dans le langage des systèmes interprétés implique donc :

- Une connaissance partielle ou une estimation de la manière dont fonctionne l'environnement, représentée par le protocole de l'environnement, P_e ;
- L'ensemble des états initiaux possibles pour le système S_0 ;
- Une connaissance des règles de fonctionnement du système, à savoir quels états peuvent être atteints après que telle ou telle action a été réalisée, représentée par la fonction de transition τ ;
- Une condition d'admissibilité sur les exécutions possibles du système, notée Ψ.

La condition d'admissibilité Ψ est souvent caractérisée par une formule temporelle et les exécutions dans Ψ sont celles qui satisfont cette formule. Par exemple, Ψ peut être utilisée pour spécifier la fiabilité du canal et on aurait :

$$\Psi_{fiab} = \{r \in \mathcal{R} | \phi_{fiab}\}$$

où ϕ_{fiab} = "Tous les messages envoyés dans r seront éventuellement reçus".

On ne souhaite pas tenir compte des exécutions dans lesquelles les messages ne seront pas reçus.

C'est seulement dans un contexte que le protocole joint décrit le comportement du système $\mathcal{R}$. La combinaison d'un contexte γ et d'un protocole joint P détermine de façon unique un ensemble d'exécutions. On note alors $\mathcal{R}^{rep}(P, \gamma)$, le système représentant le protocole P dans le contexte γ.

Interprétation

Jusqu'à présent, la description des éléments du modèle cadre facilement avec les concepts définis dans le cadre du calcul des situations, et l'essentiel ajout repose sur l'introduction d'une horloge. Cependant, notre intérêt dans ce modèle est principalement sa capacité à représenter des notions épistémiques, notions nécessaires pour l'analyse de situation comme il est détaillé au chapitre 3.

L'introduction des notions épistémiques et en particulier de la connaissance repose sur une approche de logique modale et, par conséquent sur une sémantique proche de celle des mondes possibles. Une étape clé à ce stade qui distinguera un système d'un système interprété est l'introduction de la fonction d'interprétation.

Nous considérons le langage propositionnel classique $\mathcal{L}_K$ introduit précédemment et construit à partir d'un ensemble fini de variables propositionnelles Var_K, des symboles $\bot$ et $\top$ et des connecteurs classiques $(\vee, \wedge, \rightarrow, \leftrightarrow, \neg)$.

Un *système interprété* $\mathcal{I}$ est un couple $(\mathcal{R}, \pi)$ où $\mathcal{R}$ est un système sur S et π est une fonction d'interprétation pour les propositions dans Var_K sur S qui assigne des valeurs de vérité aux propositions primitives pour chaque point (r, m) :

$$\pi : \mathcal{R} \times \mathbb{N} \longrightarrow Var_K \longrightarrow \{0; 1\}$$

Ainsi, $\pi(r, m)(p) = 1$ si la proposition p est vraie au point (r, m) de $\mathcal{I}$ et $\pi(r, m)(p) = 0$ si cette même proposition est fausse au point (r, m). Nous noterons aussi $||p||$, l'ensemble de points de $\mathcal{I}$ auxquels p est vraie (ensemble de vérité) :

$$||p|| = \{(r, m) \in \mathcal{I} | (\mathcal{I}, r, m) \vDash p\}$$

La vérité d'une formule ϕ de $\mathcal{L}_K$ au point $(\mathcal{I}, r, m)$ est alors définie par :

- $(\mathcal{I}, r, m) \models p$ ssi $\pi(r, m)(p) = 1$, pour une proposition élémentaire de Var_K,
- $(\mathcal{I}, r, m) \models \neg\phi$ ssi $(\mathcal{I}, r, m) \not\models \phi$
- $(\mathcal{I}, r, m) \models \phi \wedge \psi$ ssi $(\mathcal{I}, r, m) \models \phi$ et $(\mathcal{I}, r, m) \models \psi$

où $(\mathcal{I}, r, m) \models \phi$ se lit "ϕ est vraie au point (r, m) dans le système interprété $\mathcal{I}$".

Le couple (γ, π) est appelé *contexte interprété*.

La connaissance et les propriétés temporelles

Nous étendons le langage $\mathcal{L}_K$ pour que celui-ci inclue $n + 1$ opérateurs K_i où $K_i\phi$ signifie "L'agent i connaît ϕ" (ou encore "i sait que ϕ"). La vérité pour la formule $K_i\phi$ est alors définie par :

- $(\mathcal{I}, r, m) \models K_i\phi$ ssi $(\mathcal{I}, r', m') \models \phi$ pour tout point (r', m') de $\mathcal{R}$ tel que $(r, m) \sim_i (r', m')$

Ainsi, la connaissance de l'agent i au point (r, m) est complètement déterminée par la classe d'équivalence de (r, m). Par conséquent, i ne sait pas que ϕ à un point (r, m), exactement si ϕ est fausse à un point (r', m') considéré comme équivalent à (r, m) par i.

De plus, pour représenter et raisonner sur les propriétés temporelles du système, nous étendons encore $\mathcal{L}_K$ pour qu'il inclue les deux opérateurs $\bigcirc$ et U, où $\bigcirc\phi$ signifie "ϕ sera vraie à l'instant suivant" et $\phi U\psi$ signifie "ϕ est vraie tant que ψ est vraie". La satisfiabilité pour ces deux opérateurs dans un système interprété est alors définie par :

- $(\mathcal{I}, r, m) \models \bigcirc\phi$ ssi $(\mathcal{I}, r, m + 1) \models \phi$;
- $(\mathcal{I}, r, m) \models \phi U\psi$ ssi il existe $m' \geq m$ tel que $(\mathcal{I}, r, m') \models \psi$ et pour tout m'' tel que $m \leq m'' \leq m'$ on a $(\mathcal{I}, r, m'') \models \phi$;

Notons qu'il pourrait être utile d'inclure aussi l'opérateur $\diamond$ signifiant "éventuellement".

Ce que nous retenons

Étant donnés un protocole joint standard $P = (P_1, \ldots, P_n)$ regroupant les protocoles individuels des n agents, et un contexte γ (description de l'environnement), il existe un système unique $\mathcal{R}$ constitué des exécutions de P dans γ. De plus, pour une interprétation π de propositions primitives d'un ensemble Φ dans γ, il existe un système interprété unique, noté $\mathcal{I}$. On dit alors que $\mathcal{I}$ représente P dans le contexte interprété

(γ, π). On dira alors qu'un agent i connaît φ en un point donné (r, m) d'un système I, que l'on note $(\mathcal{I}, r, m) \vDash K_i\phi$.

Ainsi, l'ensemble S peut être visualisé par un diagramme de transitions d'états, où les nœuds sont les états globaux du système et les arcs orientés étiquetés par les actions conjointes de A qui permettent de passer d'un état à un autre.

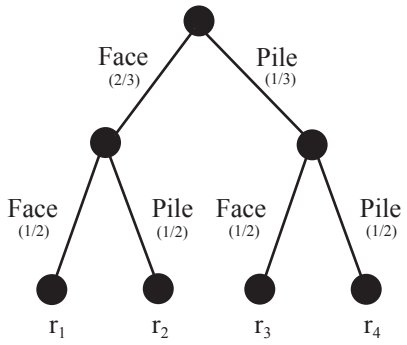


Figure 3 : *Arbre de probabilités pour un système synchrone*

La figure 2 est une représentation possible de l'espace d'états d'un système interprété, où seulement un agent et l'environnement sont considérés. Sur ce graphe, les nœuds sont les états. Cependant, en pratique, la représentation basée sur un produit cartésien est peu utilisée, car elle masque l'aspect temporel et le non-déterminisme est difficile à illustrer. Un système est plus souvent représenté par un arbre, auquel cas les nœuds représentent des points. Une exécution du système est alors un chemin partant de la racine de l'arbre aux feuilles. La figure 3 est un exemple de système non-déterministe illustrant les quatre possibilités sur deux lancers de pièces successifs. L'ensemble des exécutions possibles (toutes les branches de l'arbre) décrit complètement le système.

2.2.2 Systèmes interprétés et calcul des situations

Les détails concernant cette comparaison sont donnés dans [1], et nous résumons ici le parallèle entre les deux cadres théoriques au tableau 1.

Le calcul des situations a été choisi pour le modèle de planification, car c'est une théorie de l'action pour laquelle le problème de décor (*frame problem*) est résolu. Il n'existe cependant aucune incompatibilité entre le calcul des situations et les systèmes interprétés, ce dernier étant un cadre théorique plus large. Comme il est mentionné dans [26], le calcul des situations n'est pas fondamental et on peut établir un appariemment entre les notions d'état global et de situation pour que toute la théorie

développée dans le calcul des situations reste valide dans le cadre des systèmes interprétés.

En effet, les deux approches reposent sur un graphe de transitions d'états où les nœuds sont des états possibles pour le système et les arcs sont étiquetés par des actions. Tandis que le formalisme du calcul des situations est un langage d'actions, les états étant simplement considérés comme transitoires entre les actions, le formalisme des systèmes interprétés repose sur un langage propositionnel étendu à certains opérateurs modaux, les actions étant considérées comme des moyens pour changer d'état. Ces deux visions sont duales l'une de l'autre et en aucun cas incompatibles.

Tableau 1 : *Comparaison entre les systèmes interprétés et le calcul des situations. Le symbole - signifie que le concept n'existe pas dans le cadre théorique concerné*

Systèmes interprétés	Calcul des situations	Notation
Ensemble d'agents	Ensemble d'agents	$\mathcal{A}$
Agent	Singleton $\|\mathcal{A}\| = 1$	i
Environnement	-	e
État global	Situation	s
État local	-	l_i
État global initial	Situation initiale	s_0
Exécution	Situation	r
Système	Situation	$\mathcal{R}$
Point	-	(r, m)
Propositions de base	Propositions de base	Φ
Action conjointe	Action	$\mathbf{a}$
Protocole	-	P_i
Fonction de transition	Détermine les pré- et post-conditions	τ
-	Fluent	
Contexte	-	γ

Pour établir le lien entre les deux formalismes, il suffit d'associer la "situation" du calcul des situations à l'"état global" des systèmes interprétés :

$$s \longleftrightarrow (l_e, l_1, \ldots, l_n)$$

Comme état global initial s_0, on pourrait par exemple considérer que l_e contient les valeurs des *fluents* et que les l_i décrivent les croyances initiales des agents.

Notons que, même si nous avons considéré dans notre description un langage propositionnel classique, l'extension des systèmes interprétés à une logique du premier ordre est tout à fait réalisable comme expliqué dans [32].

Dans le cas général des actions conjointes, la définition du *do* se fait de la manière suivante :

$$do(\mathbf{a}, s) = s' \tag{3}$$

où $s = (l_1, \ldots, l_n, l_e)$ et $s' = (l'_1, \ldots, l'_n, l'_e)$, l'_i étant le résultat de la $i^{\text{ème}}$ composante de $\mathbf{a}$ sur l_i, $i \in \mathcal{A}$. La définition d'un protocole revient donc à une série de *do*.

La notion de connaissance peut également être introduite dans le calcul des situations, et ce, à l'aide de *fluents* binaires particuliers $\mathbf{R}_i$ où la proposition $\mathbf{R}_i(s, s')$ est vraie dans s si l'agent i considère que la situation s' est possible [33].

Dans [26], il est spécifié comment la solution du problème de décor peut être étendue pour des *fluents* de connaissance et de probabilités.

Page laissée en blanc à dessein.

3 Analyse de la situation

En analyse de situation, un groupe d'agents reçoit de l'information de sources hétérogènes incluant, par exemple des appareils de mesures tels que des radars, des imageurs, des rapports humains ou encore des bases de données. Le but, pour ce groupe d'agents, est d'atteindre un certain *éveil situationnel* (*"situation awareness"*) afin de pouvoir prendre des décisions et agir. Le défi est donc de transformer des informations brutes, imprécises, incertaines, conflictuelles et parfois paradoxales en déclarations compréhensibles à la fois par les humains et les machines afin d'en déduire une estimation des évolutions possibles de la situation et agir en conséquence. Ainsi, le traitement de l'information doit se faire à la fois de manière quantitative (mesures sur le monde), puisque la plupart des sources d'information fournissent des mesures, et qualitative (raisonnement à propos du monde) afin de tenir compte de sources telles que des experts humains mais aussi rester le plus proche possible du raisonnement humain et faciliter ainsi la compréhension du processus par les opérateurs.

Les intérêts pour le sujet grandissent à l'heure actuelle dans les domaines où les systèmes complexes fonctionnent en interaction avec l'humain, en particulier, la conduite d'un véhicule, les interfaces humain-machine, la météo, la médecine, la gestion des flottes d'urgence, les centrales nucléaires, le traitement du langage naturel, la théorie des bases de données, le contre-terrorisme, etc.

3.1 Fusion d'information de haut niveau

L'analyse de la situation correspond aux niveaux 2, 3 et 4 du modèle JDL de fusion de données [4]. Une version révisée du modèle est présentée à la figure 4, avec les applications classiques associées aux différents niveaux. Les niveaux 0 (association de données) et 1 (raffinement de l'objet) reposent déjà sur de solides bases formelles au moins en ce qui concerne le traitement de l'information (détection, pistage, association et identification), la représentation de l'incertitude et les processus d'agrégation. Cependant, les représentations formelles, pour les niveaux plus élevés, tels que le niveau 2 (évaluation de la situation), le niveau 3 (évaluation de l'impact) et le niveau 4 (raffinement du processus) ne sont toujours pas très développées à l'heure actuelle, bien que plusieurs travaux ont récemment été publiés à ce sujet.

L'intégration des éléments mis en évidence aux niveaux 0 et 1 dans une définition claire de la notion de situation est le défi que pose la formalisation des niveaux 2, 3 et 4. Cette formalisation de la notion de situation sert dans le présent travail d'assise à la définition des tâches des niveaux 2, 3 et 4. Les notions de contexte et de protocole sont intimement liées à celle de situation. Pour nous, une situation est un ensemble d'états et de transitions d'états qui correspondent à l'exécution du protocole (ou stratégie) de la coalition sous la contrainte d'un contexte particulier. Les protocoles

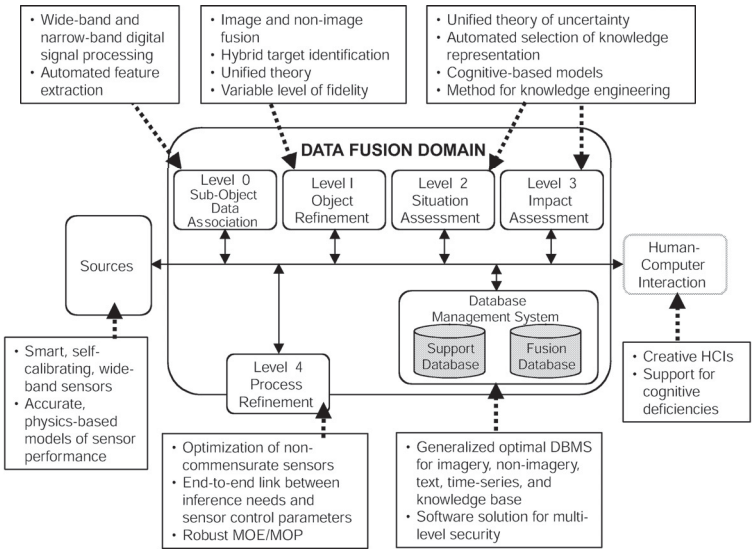


Figure 4 : *Modèle de Fusion de Données JDL révisé et ses applications [4]*

sont des fonctions liant les états locaux des agents à l'ensemble des actions possibles (voir section 3.4). Les tâches à réaliser par les agents composant la coalition sont ici décrites en termes de missions et de buts à atteindre à l'aide de protocoles individuels ou collectifs.

Les niveaux du modèle JDL, bien que cette hiérarchie des niveaux de fusion soit contestée par plusieurs auteurs [34], transmettent l'idée de traitements allant du numérique au qualitatif, de propositions au contenu sémantique faible à l'expression de propositions au contenu sémantique important, d'une quantité importante de données à traiter à un traitement plus global et plus abstrait de l'information où le raisonnement domine.

3.2 Une approche issue des sciences cognitives

Dans le domaine de la psychologie cognitive et de l'ergonomie, le modèle proposé par Endsley [5, 6] décrit l'état d'éveil situationnel dans un contexte de prise de décision. Dans ce modèle représenté à la figure 5, l'éveil situationnel est défini comme étant la *perception* des éléments dans l'environnement à l'intérieur d'un volume de temps et d'espace, la *compréhension* de leur signification et la *projection* de leur statut dans un futur proche. Ce modèle a eu beaucoup d'influence dans la communauté de fusion d'information et a généré de nombreuses discussions sur le concept d'éveil situationnel et ses liens avec le processus de prise de décision. Toutefois, l'éveil situationnel est en général supposé atteint à partir d'un certain niveau de compréhension de la situation, sans que ni l'éveil situationnel lui-même ni le processus menant à cet état (l'analyse

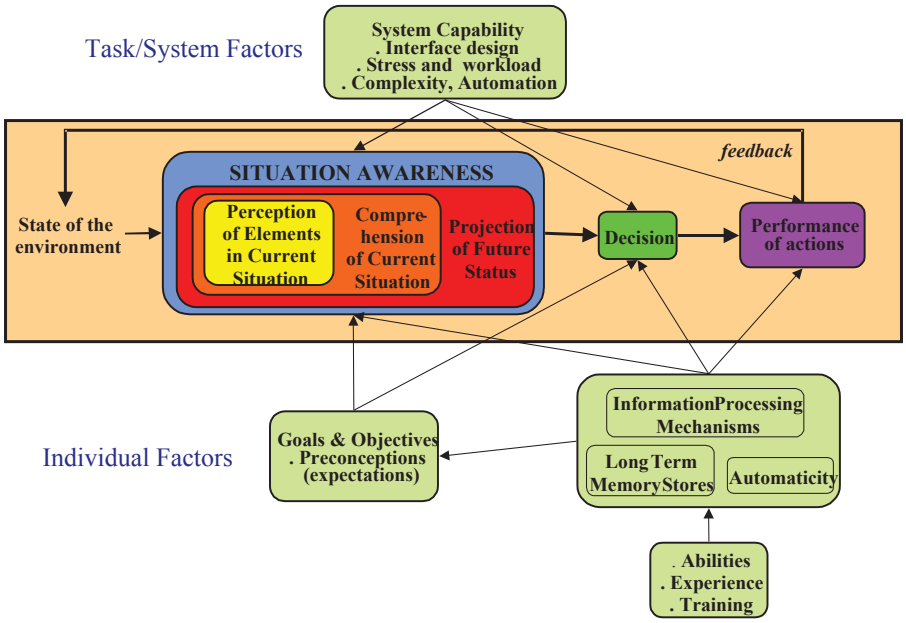


Figure 5 : *Le modèle d'éveil situationnel d'Endsley et la prise de décision [5, 6]*

de situation) ne soient précisément formalisés. Ce travail s'inscrit dans cet effort de formalisation, à travers une définition claire du processus de décision menant à l'état épistémique dit d'éveil situationnel.

L'imbrication de ces trois principales tâches donne une idée équivalente à celle modélisée par les niveaux 0 à 4 du modèle JDL. En effet, la tâche de perception correspond en réalité aux niveaux 0 et 1, la compréhension aux niveaux 2 et 3, alors que la projection s'effectue surtout au niveau 4. Ce parallèle ne doit pas être considéré de façon rigoureuse étant donnée la forte interdépendance des différents niveaux et tâches pour atteindre un éveil situationnel.

Pour atteindre cet état d'éveil situationnel, la situation doit être analysée, processus qui consiste à examiner la situation, ses éléments et leurs relations pour fournir et maintenir un état d'éveil situationnel pour le preneur de décision [35].

En d'autres termes,

1. Lors de la **perception**, les informations sont recueillies et modélisées dans le langage adéquat, tenant en particulier compte de l'incertitude qui lui est associée. La perception fait référence à tous les moyens dont disposent les agents comme des appareils numériques tels que des radars, des imageurs, des ESM (Electronic Support Measures), des IFF (Identification Friend or Foe), des détecteurs de mouvement, des capteurs sismiques, mais aussi les cinq sens dans

le cas d'agents humains.

2. Lors de la tâche de **compréhension**, les informations récoltées sont analysées de manière à en extraire leur signification. En particulier, les informations provenant des différentes sources sont combinées, agrégées, leurs corrélations et conflits éventuels évalués. De plus, les informations pertinentes sont échangées entre les agents pour améliorer la compréhension conjointe ou commune de la situation.

3. Enfin, la **projection** a pour but de prédire les évolutions futures de la situation afin de mieux l'appréhender et de permettre aux participants d'agir en conséquence.

3.3 Nécéssité d'un cadre théorique général

Étant données ces trois tâches, la conception d'un système d'analyse de situation doit reposer sur un formalisme mathématique et/ou logique capable de traduire les mécanismes du processus à un niveau compréhensible par l'humain. En particulier, ce formalisme doit permettre de :

1. Représenter des états mentaux tels que la connaissance, la croyance, l'incertitude ou l'éveil situationnel ;

2. Raisonner sur ces états mentaux ;

3. Représenter l'incertitude sous ses différentes formes incluant la non-spécificité, le flou, l'aléatoire ;

4. Agréger les informations provenant des diverses sources hétérogènes dans le cas général et gérer les éventuels conflits ;

et ce, dans un cadre dynamique, puisque la situation est en perpétuelle évolution, et multi-agents, puisque l'éveil situationnel peut être distribué parmi plusieurs agents, ce qui est particulièrement le cas dans une coalition.

Face à ce défi, le choix du formalisme est important. Devant la diversité des sources, leurs types d'incertitude et les tâches à réaliser, le processus complexe d'analyse de situation ne peut se modéliser dans une seule théorie simple telle que celle des probabilités, par exemple. En effet, d'une part cette théorie est limitée quant à sa représentation de l'incertitude (ni le flou ni la non-spécificité ne peuvent être représentés) et d'autre part, sa sémantique claire ce qui rend les résultats obtenus parfois difficile à interpréter.

Deux principales directions s'imposent alors quant au choix du formalisme :

1. Modéliser et traiter les informations dans la théorie qui leur convient le mieux et selon les différentes tâches du processus. On fait face alors à un problème de communication entre théories impliquant souvent une perte d'information.

2. Utiliser un seul formalisme suffisamment large pour tout le processus d'analyse de situation qui concilie les aspects mathématique et logique.

C'est pour cette seconde solution que nous optons. Le cadre général des *systèmes interprétés* proposé par Fagin, Halpern, Moses et Vardi en 1995 et mis à jour en 2003 [7], est une approche logique reposant sur une sémantique proche de celle des mondes possibles permettant de raisonner sur la connaissance mais aussi sur le temps. Cette approche, en plus d'être bâtie sur un cadre multiagent, est enrichie pour tenir compte de l'incertitude, en particulier probabiliste, ainsi que de la dynamique du système. Cette approche multimodale (dynamique épistémique) concilie dans un même cadre les approches dites "qualitatives" et "quantitatives". De plus, elle peut être vue comme une combinaison des propriétés des arbres de jeu et de la représentation d'espaces d'états (mondes possibles). Ce cadre théorique a fait l'objet d'une brève présentation à la section 2.2 où les éléments du modèle ont été introduits. La suite du document s'appuie sur ce cadre et les notions pertinentes à notre étude sont développées, en particulier la représentation de la connaissance et autres états mentaux individuels ou de groupe, mais aussi l'introduction de l'incertitude (chapitre 5 et annexe A).

Nous basant sur le modèle d'Endsley [5, 6], ainsi que sur la définition de Roy [35] et en accord avec le modèle JDL, nous proposons dans la section suivante des définitions formelles qui impliquent directement des notions d'états, de transitions entre états et de systèmes distribués.

3.4 Modèle d'analyse de situation pour une coalition

Soit une coalition $\mathcal{C} = (\mathcal{K}, \mathcal{M})$ au sens de la définition 2.1. Le modèle d'analyse de la situation visant à atteindre un état de compréhension commune de la situation au sein du groupe d'agents représenté par $\mathcal{K}$ (ou tout autre sous-groupe) est défini de la manière suivante :

$$\mathcal{M}_{AS}(\mathcal{C}) = \{\mathcal{A}, S, \{\mathsf{PL}_{i,s}\}, \pi, ACT, \tau, P, \gamma\} \tag{4}$$

où

– $\mathcal{A}$ est un ensemble d'agents tel que $\mathcal{A} \subseteq Membres(\mathcal{K})$, ou $\mathcal{A} \subseteq Acteurs(\mathcal{K})$, ou encore $\mathcal{A} \subseteq Atouts(\mathcal{K})$, $\mathcal{K}$ étant l'agent institutionnel de la coalition $\mathcal{C} = (\mathcal{K}, \mathcal{M})$.

  L'environnement est un agent particulier qui représente tous les éléments pertinents à l'analyse mais sur lesquels on a aucun contrôle (ou un contrôle limité), par exemple, les forces ennemies, la météo, etc.

– S est un ensemble d'états globaux pour le système distribué, où chaque élément de S est un vecteur de $n+1$ composantes représentant les états locaux des n agents de $\mathcal{A}$ et de l'environnement :

$$s = (l_1, \ldots, l_n, l_e) \in S \subseteq L_1 \times \ldots \times L_n \times L_e$$

où L_i est un ensemble d'états locaux possibles pour l'agent i. Un état local $l_i = r_i(m)$ à un instant m donné représente toute l'information à laquelle l'agent a accès.

À chaque élément de S correspondent plusieurs points (r, m) représentant l'état du système à l'instant m lors de l'exécution r. Une exécution est, par conséquent, une séquence d'états globaux $s_1, s_2, s_3, \ldots$.

– $\mathsf{PL}_{i,s}$ est un espace plausibiliste[5] représentant la croyance de l'agent i, étant dans l'état s, sur l'état actuel :

$$\mathsf{PL}_{i,s} = (S_i^s, \mathrm{PL}_i^s)$$

et satisfaisant les axiomes pour la mesure de plausibilité choisie et ceux de de consistance avec la connaissance.

– π est la fonction d'interprétation qui, pour chaque état de S, décrit les valeurs de vérité de chaque proposition primitive $p \in \Phi$, où $\pi(s)(p) = 1$ si p est vraie dans s. La vérité des formules de $\mathcal{L}_K$ est déduite. Le langage $\mathcal{L}_K$ est supposé être une connaissance commune de tous les agents.

– ACT un ensemble d'actions conjointes où chaque élément de ACT est un vecteur d'actions individuelles des agents :

$$\mathbf{a} = (a_1, \ldots, a_n, a_e) \in ACT_1 \times \ldots \times ACT_n \times ACT_e$$

où ACT_i est l'ensemble des actions pour lesquelles l'agent i est **compétent** (def. 2.2) :

$$ACT_i = \{a \in Var_A | i \text{ est compétent pour réaliser } a\} \tag{5}$$

De plus, on a $ACT_i \subseteq Var_A$, où Var_A est un ensemble d'actions élémentaires (On pourrait facilement étendre la définition aux actions composées).

– τ est la fonction de transition qui, à toute action conjointe $\mathbf{a}$, et pour chaque état s, associe l'état successeur :

$$\tau(\mathbf{a})(s) = s'$$

À travers τ sont définies les préconditions et post-conditions des actions :

$$[\mathbf{a}]s = \tau(\mathbf{a})(s) \text{ est la post-condition de l'action } \mathbf{a}$$

5. Des détails sont donnés au chapitre 5.

– P est le protocole joint des n agents (l'environnement est exclu) :

$$P = (P_1, \ldots, P_n)$$

P_i est le protocole (ou stratégie) de l'agent i, qui décrit donc son comportement, ses intentions, ses engagements. C'est une fonction de l'état local l_i de l'agent vers un sous-ensemble d'actions de ACT_i :

$$P_i : L_i \longrightarrow 2^{ACT_i} \backslash \{\varnothing\}$$

P_i est défini à partir de l'état local, car il contient toute l'information à laquelle l'agent a accès et un agent ne peut donc baser son action que sur son état local.

– $\gamma = (P_e, S_0, \tau, \Psi)$ est le contexte dans lequel est exécuté le protocole joint P, donc dans lequel est défini le système $\mathcal{R}$. S_0 est l'ensemble des états initiaux possibles pour le système et Ψ est une condition d'admissibilité sur les exécutions. P_e est le protocole de l'environnement, en général non déterministe, dont la définition représente une estimation des différentes actions que celui-ci peut effectuer.

Le protocole joint n'a de sens que lorsqu'il est exécuté dans un contexte. Il définit alors un système (de transitions d'états étiquetées par des actions) dont la situation est un sous-ensemble.

Remarque

Définir un état local pour chaque agent i induit une relation d'équivalence R_i sur les états globaux : La classe d'équivalence de l'état s est l'ensemble des états s' dans lesquels l'agent i est dans le même état local (*i.e.* possède la même information). Cette partition ainsi définie fournit la base pour la définition de la connaissance :

$$\phi \text{ est connue par l'agent } i \text{ dans l'état } s \text{ ssi } \phi \text{ est vraie} \quad \forall s' \mathsf{R}_i(s, s')$$

i.e. si ϕ est vraie dans tous les états considérés équivalents à celui dans lequel se trouve l'agent.

3.5 Situation

Le terme *situation* apparaît au milieu du XIV$^{\text{ème}}$ siècle, dérivé du latin médiéval *situatio* signifiant " être placé à un certain endroit". Au milieu du XVII$^{\text{ème}}$ siècle, le terme *situation* est utilisé pour discuter des dispositions morales d'une personne et plus spécifiquement de l'ensemble des circonstances liées à cette personne, des relations la liant à son environnement. Cette définition est proche de ce qu'il est entendu de nos jours dans la communauté de fusion d'information quant au terme de situation,

où un état mental d'*éveil situationnel* est étudié en interaction avec l'environnement. Des synonymes courants de situation sont : circonstance, cas, condition, scénario, état.

Bien que la notion de situation soit utilisée informellement dans le langage de tous les jours pour désigner un état donné des choses, une vue simplifiée du monde, et même la position de certains objets, la *situation* est aujourd'hui un concept central de la fusion d'information de haut-niveau (niveaux 2, 3 et 4 du modèle JDL [4], voir figure 4), domaine dans lequel des définitions plus ou moins formelles lui ont été données.

3.5.1 État global et situation

Pour Pew [36], une situation est un ensemble de conditions environnementales et d'états de système avec lesquels les participants interagissent et qui peuvent être caractérisés uniquement par un ensemble d'informations, de connaissances et d'options de réponses.

Cette définition est proche de la notion de situation utilisée dans le langage du calcul des situations : En effet, le calcul des situations est un langage pour modéliser les changements dynamiques du monde, ces changements étant les résultats d'actions. Les historiques (séquences de mondes possibles) sont des séquences d'actions représentées par les situations [33].

Dans le langage des systèmes interprétés, cette notion correspond à celle d'état global où, si les agents ont la propriété de mémoire parfaite, tous les états par lesquels ils sont passés avant d'arriver à un état particulier sont enregistrés dans leur état local à l'instant t. S'ils ont la propriété de rappel parfait, ils se rappellent tous les états mais aussi toutes les actions qui les ont menés à cet état local.

Ainsi, on peut donc égaler les notions de *situation* du calcul des situations et d'*état global* des systèmes interprétés.

3.5.2 Définition

Une composante essentielle dans l'analyse de la situation est l'évolution possible de cette dernière. En gros, l'historique correspond à la perception, l'état actuel (sans mémoire) à la compréhension, les différentes évolutions possibles correspondent à la projection, les trois tâches principales de l'éveil situationnel du modèle d'Endsley (décrit à la figure 5, page 27).

On conçoit donc la situation en terme de graphe de transitions d'états défini par l'exécution d'un protocole joint $P = (P_1, \ldots, P_n)$ par les agents en présence, exécuté dans un contexte donné γ. Deux points de vue différents peuvent être adoptés :

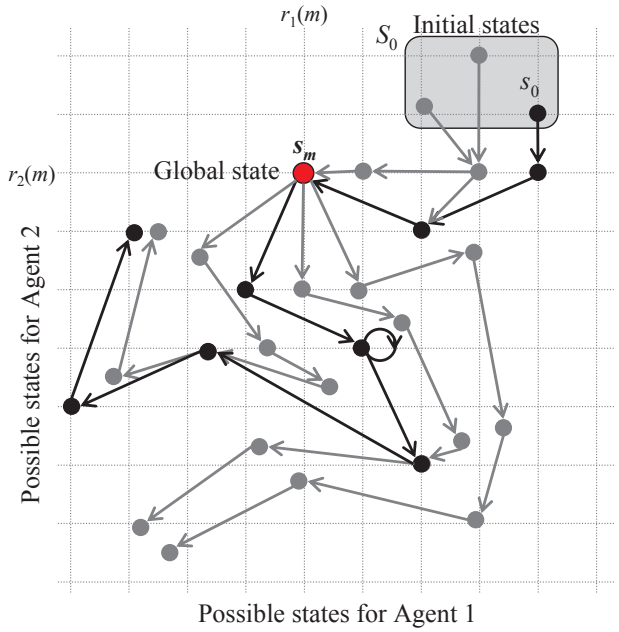


Figure 6 : *La situation comme système de transitions d'états*

– Le point de vue de l'agent qui a une vision locale de la situation, son éveil à celle-ci ne pouvant être basé que sur l'information à laquelle il a accès, c'est-à-dire son état local. Sa compréhension, connaissance ou croyance est contrainte par ses capacités limitées de calcul, de mémoire ou de raisonnement, par exemple.

– Le point de vue d'un observateur externe au système qui a une vue globale de la situation. Cet observateur externe pourrait être en réalité le concepteur du système qui, ayant modélisé les agents à travers notamment leur protocole, analyse la situation déduisant ce que connaissent ou non certains agents ou certains groupes d'agents. L'analyste ou concepteur de système peut-être considéré comme *omniscient* et raisonne sur la connaissance supposée des agents du système sans contrainte ou limitation.

On a donc deux types de situation : la *situation locale* et la *situation globale*.

Si on considère des agents suffisamment autonomes et intelligents, les tâches de fusion d'information de bas niveau pourront être effectuées au niveau local. Par exemple, une tâche d'identification correspond à des estimations d'attributs pour décider d'un état particulier s. Basé sur ses différents moyens de perception (ou sources d'information), un agent cherche donc à répondre aux questions du type "Est-ce que ϕ est vraie dans s ?" où s est l'état courant. Le résultat des différentes requêtes et leur combinaison conduit à identifier un certain état de connaissance (ou croyance) explicite à propos de s. De la même manière, une tâche de pistage consiste en l'estimation d'états futurs à partir d'un état initial $(r, 0)$. Dans cet exemple aussi, l'agent "pisteur" a simplement

une connaissance explicite de la position courante de la cible. Par conséquent, l'état local d'un agent représente son état subjectif ou état épistémique (cette notion sera détaillée au chapitre 5).

Cependant, pour les tâches de fusion de plus haut niveau, l'analyse de situation en particulier fait référence à la situation globale. En effet, à travers une vision globale de la situation (et par conséquent des agents qui la composent), l'analyste peut vérifier certaines propriétés épistémiques et temporelles d'un groupe d'agents par rapport à un fait donné. Par exemple, "Est-ce que le groupe d'agents G connaîtra éventuellement ϕ ?", ou encore "Est-ce que ϕ sera vraie à l'instant suivant ?", etc. Pour faire cette analyse, on suppose que les agents n'ont aucune limitation et sont omniscients.

Definition 3.1 (Situation)
Soit $\mathcal{A}$ un ensemble de $n+1$ agents incluant l'environnement et soit $\mathcal{I}$ le système interprété représentant l'exécution du protocole joint P des n agents dans le contexte interprété (γ, π). Une situation *est le sous-système $\mathcal{I}_{(r,m)}$ de $\mathcal{I}$, c'est-à-dire le système représentant P dans le contexte interprété $(\gamma_{(r,m)}, \pi)$ avec $\gamma_{(r,m)} = ((r,m), P_e, \Psi, \tau)$.*

Pour un agent donné, la situation (locale) est par conséquent la projection de $\mathcal{I}_{(r,m)}$ sur $r_i(m)$, l'état local de i au point (r,m), représentant ainsi une vue partielle de la situation. La figure 6 illustre les différents concepts avancés dans cette section : À partir d'un ensemble de plusieurs états initiaux possibles, le protocole joint des n agents exécutés dans un contexte donné définit une situation.

3.6 Éveil situationnel

Une notion qui semble intimement liée à celle de l'éveil situationnel, est la notion de *connaissance*. Ce terme couramment usité dans le domaine des systèmes d'information cache plusieurs questions souvent laissées sans réponse telles que "quel est le lien entre information et connaissance ?", "quelle est la différence entre croyance et connaissance ?", ou simplement "qu'est-ce que la connaissance ?".

Sans entrer dans des considérations philosophiques, une définition formelle de la connaissance nous semble incontournable si on veut justifier certaines des réponses aux questions ci-dessus. De plus, cette notion de connaissance peut servir de base à une définition de l'éveil situationnel.

Cela-dit, on peut distinguer deux types de connaissance [37] :

1. La *connaissance explicite*, qui correspond à ce que l'agent peut **calculer** à partir de l'information à laquelle il a accès. Cela peut correspondre à ses observations si ses sources sont fiables, être stocké dans une base de données, etc.

2. La *connaissance implicite*, qui correspond à ce qui est **attribué** à l'agent. Cette notion de connaissance est la vision de l'analyste du système et est plutôt utilisée pour vérifier si un système satisfait ou non certaines propriétés.

Il n'est pas requis pour les agents d'être au courant de leur connaissance implicite, cette notion étant plutôt utilisée pour abstraire certains détails. C'est ainsi qu'il est possible de parler de connaissance pour des agents simples tels que des radars. Cependant, les agents sont capables de calculer leur connaissance explicite selon leurs différentes capacités de raisonnement, calcul, mémoire, etc.

Suivant les travaux développés dans [38], nous considérons que chaque agent possède un algorithme local d'évaluation de la vérité qui, pour chaque état local l_i et chaque formule ϕ, renvoie "Oui" si ϕ est vraie, "Non" si ϕ est fausse et " ?" si l'agent ne peut pas calculer la valeur de vérité de ϕ.

Definition 3.2 (Éveil)
Soit $\mathcal{A}$ un groupe d'agents et soit $\mathcal{I}$ un système interprété représentant le protocole joint P des n agents dans le contexte interprété (γ, π). L'état local de chaque agent i au point (r, m) inclut à la fois un algorithme $\mathsf{alg}_i(r, m)$ et des données $\mathsf{obs}_i(r, m)$ provenant de ses observations. Un agent i de $\mathcal{A}$ est éveillé à ϕ *(ou au courant de) au point (r, m) dans $\mathcal{I}$, ce que nous notons $E_i\phi$, si et seulement si il est* **capable** *de calculer la valeur de vérité de ϕ :*

$$(\mathcal{I}, r, m) \vDash E_i\phi \text{ ssi } \mathsf{alg}_i(r, m)(\phi) \neq \text{“?”} \tag{6}$$

Qu'un agent soit au courant d'une formule ϕ ne signifie pas pour autant que celle-ci soit effectivement vraie c'est-à-dire que $(\mathcal{I}, r, m) \vDash E_i\phi$ est, bien entendu, différent de $\pi(r, m)(\phi)$. Une propriété souhaitable est que l'algorithme renvoie une réponse correcte dans tous les cas. Cette propriété est connue sous le nom de *soundness* en anglais et peut être vérifiée *a priori*. Dans ce cas, si $\mathsf{alg}_i(r, m) =$"Oui" alors i connaît explicitement que ϕ est vraie (et aussi implicitement).

3.7 Retour sur les définitions de capacité, engagement et mission

À la sous-section 2.2.1, lors de la définition de la fonction de transition page 10), nous avons reformulé les définitions de capacité individuelle et de capacité pour un groupe d'agents à réaliser une action.

Or, une des tâches d'analyse de situation à travers le modèle proposé consiste à déterminer ou analyser le protocole joint à base de connaissance (voir le rapport [39]) qui, exécuté dans le contexte γ permet de faire en sorte que la mission soit réalisée, d'où la définition suivante :

Definition 3.3 (Capacité d'une coalition)
Étant donnée une coalition $\mathcal{C} = (\mathcal{K}, \mathcal{M})$, on dit que l'agent institutionnel $\mathcal{K}$ est capable *de réaliser la mission $\mathcal{M}$ qui lui a été affectée si*

$$\mathcal{M}_{AS}(\mathcal{C}) \vDash \phi_M \tag{7}$$

où ϕ_M est la formule décrivant les buts associés à la mission[6]*.*

Le problème peut se décrire comme un jeu à deux adversaires, la coalition d'une part et l'environnement d'autre part. Notre but en tant que concepteur de système est de vérifier si notre joueur (la coalition) dispose d'une stratégie (son protocole joint) adéquate pour "battre" l'environnement et réaliser sa mission.

Savoir si un groupe d'agents (d'une manière générale) est capable de réaliser une action ou une séquence d'actions est intéressant. Cependant, à cause de l'incertitude sur les évolutions du système, il se peut que l'état désiré ne soit jamais atteint. Ainsi, il est d'autant plus intéressant de savoir si un état donné sera *toujours* atteint (étant donné un certain protocole). Vérifier une telle propriété temporelle garantit la réalisation de la mission.

3.7.1 Mission

Nous revenons sur la définition de mission rappelée en introduction à la définition 2.1, où la mission est un ensemble d'états à atteindre $\mathcal{E}$ ainsi que d'une relation de préférence $\mathcal{P}$ sur ceux-ci. Les éléments de $\mathcal{E}$ peuvent être ordonnés selon leur préférence, offrant ainsi à la coalition une ou plusieurs options pour réaliser la mission.

Comme on l'a mentionné dans les travaux du poste 1 [10, 11, 12, 14] "D'un point de vue théorique, les objectifs (ou les intérêts) des agents sont modélisés par des préférences et le problème de la formation d'une coalition est ramené à un problème d'agrégation de préférences individuelles."

Dans la définition 2.1, il est donc possible que les agents aient des intérêts et priorités individuels différents et donc leur propre mission $\mathcal{M}^i$. Ainsi, pour chaque agent i il existe un groupe d'états à atteindre $\mathcal{E}^i$ ainsi qu'une relation d'ordre entre ces états $\mathcal{P}^i$. La mission de la coalition est donc l'agrégation des missions individuelles, tant du point de vue des états à atteindre que des relations de préférence entre les états.

Notons que différentes manières sont alors disponibles pour définir la mission, les deux bornes étant une agrégation conjonctive, où $\mathcal{E} = \bigcap_{i=1}^{n} \mathcal{E}^i$ et une agrégation disjonctive où $\mathcal{E} = \bigcup_{i=1}^{n} \mathcal{E}^i$. Dans le premier cas, seul les intérêts communs seront satisfaits par la coalition, alors que dans le deuxième cas, tous les intérêts individuels des membres de

6. Notons qu'en pratique ϕ_M est composée d'opérateurs temporels.

la coalition seront satisfaits. En pratique, la réalité se situe entre ces deux bornes et différents compromis seront établis. Puisqu'il a été décidé que l'étude ne portait pas sur la formation de la coalition, nous ne nous attarderons pas à la manière dont seront prises les décisions pour arriver à définir la mission $\mathcal{M}$ de la coalition et considérons que celle-ci est donnée. Cela-dit, un travail futur pourrait porter sur les intérêts individuels basés sur cette décomposition en missions individuelles.

Modélisation de la mission

Considérons l'ensemble de propositions primitives suivant :

$$Var_K = \{p_{OM}, p_{AHB}, p_{EO}\} \tag{8}$$

où p_{OM}="`OrangeLand-Maîtrisé`", p_{AHB}="`Assistance-Humanitaire-BlueLand`" et p_{EO}="`Embargo-OrangeLand`". Pour le système à un seul agent, on a donc 2^3 états possibles (par exemple $Ordonnateur(\mathcal{K})$). La mission pourra être alors décrite par la formule suivante :

$$\phi_M = p_{OM} \wedge p_{AHB} \wedge p_{EO} \tag{9}$$

Ainsi l'ensemble de vérité de ϕ_M est $\mathcal{E}$:

$$\mathcal{E} = ||\phi_M|| = \{s \in S | s \vDash \phi_M\} \tag{10}$$

Dans cet exemple, $\mathcal{E}$ ne contient qu'un seul état et par conséquent la relation de préférence $\mathcal{P}$ n'est pas pertinente.

Rajoutons à présent deux autres propositions primitives, p_{PH}="`Perte-Humaine`" et p_{PM}="`Perte-Materielle`" dans Φ. Ainsi, nous avons 2^5 états possibles. La formule définissant la mission ne correspond alors plus à un seul état, mais à quatre :

$$\begin{aligned} s_1 &= \phi_M \wedge p_{PH} \wedge p_{PM} \\ s_2 &= \phi_M \wedge p_{PH} \wedge \neg p_{PM} \\ s_3 &= \phi_M \wedge \neg p_{PH} \wedge p_{PM} \\ s_4 &= \phi_M \wedge \neg p_{PH} \wedge \neg p_{PM} \end{aligned}$$

Ainsi, $\mathcal{E}$ contient quatre états et la relation de préférence pourrait être :

$$s_4 \succ s_3 \succ s_2 \succ s_1 \tag{11}$$

exprimant le fait que la mission réalisée sans perte humaine ni matérielle est préférée à celle réalisée sans perte humaine mais avec des pertes matérielles, qui elle-même est préférée à celle réalisée sans perte matérielle mais avec des pertes humaines, enfin elle-même préférée à celle réalisée avec les deux types de pertes.

On peut aussi vouloir spécifier dans la mission un ordre de préférence sur les "sous-missions" à réaliser. Par exemple, p_1 doit être vérifiée prioritairement à p_2 qui, elle-même doit être vérifiée prioritairement à p_3. Cela implique qu'on doive définir trois sous-ensembles $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$ et $\mathcal{E}_3$, tels que :

$$\mathcal{E}_i = \{s \in S | s \vDash p_i\}, i = 1, 2, 3 \tag{12}$$

et ainsi,

$$\mathcal{E} = \bigcap_{i=1}^{3} \mathcal{E}_i \tag{13}$$

On aurait alors une autre relation de préférence $\mathcal{P}'$ telle que :

$$p_1 \succ' p_2 \succ' p_3 \tag{14}$$

Notons qu'introduire un ordre temporel entre les sous-missions revient à définir une relation du type de $\mathcal{P}'$.

3.7.2 Engagement

Le problème général à résoudre consiste à "définir un plan de réalisation de la mission (affectation des actions à des agents) afin que la coalition soit **capable** de réaliser sa mission".

La capacité de la coalition à réaliser sa mission passe par les capacités individuelles et de groupe des agents (définitions 2.3 et 2.4). En plus de sa capacité à réaliser l'action α étant dans l'état s, l'agent i doit s'y être **engagé**, notion introduite dans les travaux précédents [12].

De la capacité d'un groupe d'agents, est déduite la capacité de la coalition où la notion d'engagement a été ajoutée. En effet, même si un groupe d'agents est capable de réaliser une action ou une série d'actions, rien ne dit qu'il le fera.

Dans notre modèle, affecter des actions à un agent revient à définir son protocole P_i, et affecter des actions à un groupe d'agents, revient à définir son protocole joint. Réciproquement, une action ne pourrait pas être accomplie si elle ne fait pas partie du protocole d'un agent. Si un agent s'engage à accomplir une action, alors celle-ci doit faire partie de son protocole, et si une action fait partie de son protocole, c'est qu'il s'est engagé à la réaliser. Ainsi, le protocole, qui décrit le comportement d'un agent, décrit aussi ses engagements. On pourrait alors définir les notions d'engagement sur les actions et sur les états pour un groupe d'agents de la manière suivante :

Definition 3.4 (Engagement sur les actions)
Soit $G \in \mathcal{A}$ un groupe d'agents, P^G le protocole joint pour ces agents et a une action. On dira que G s'est engagé à réaliser *a s'il existe un état local l_i pour un agent i tel que $P_i^G(l_i) = a$.*

Ainsi, un groupe d'agent s'est engagé à réaliser une action α si celle-ci apparaît dans son protocole joint.

De manière équivalente, si un groupe d'agents s'est engagé à ce qu'un état s soit atteint, alors le système $\mathcal{R}_P$ qui représente P doit contenir cet état. Ainsi,

Definition 3.5 (Engagement sur les états)
Soit $G \in \mathcal{A}$ un groupe d'agents, P^G le protocole joint pour ces agents et s un état global de S. On dira que G s'est engagé à atteindre *s s'il existe un point (r, m) du système $\mathcal{R}_{PG}$ tel que $s = (r, m)$, pour une exécution r et un instant m.*

Par contre, il faut noter que rien ne garantit que s sera atteint, car cela dépend du contexte, et donc de l'environnement.

La notion d'engagement est en réalité plus large et d'une autre nature que celle liée à l'exécution d'un protocole. Cependant, si un agent s'est engagé à réaliser une action, alors celle-ci doit faire partie de son protocole, et ce, de façon non déterministe. À l'inverse, si une action fait partie du protocole d'un agent alors il doit s'être engagé vis-à-vis de cette action. Il faudrait ajouter une condition qui spécifie que cet agent doit tout faire pour se trouver dans un état tel qu'il puisse réaliser l'action. Cette condition devient alors assez subjective.

3.7.3 Capacité d'une coalition à réaliser une mission

À présent que les agents sont capables de réaliser des actions et qu'ils se sont engagés à les réaliser, il reste à s'assurer que la mission puisse effectivement être réalisée. Pour cela, dans le modèle d'analyse de situation que nous proposons, la vérification de la capacité de la coalition à réaliser sa mission, la planification et l'exécution de celle-ci, passe par l'analyse où la détermination du protocole joint P pour les n agents participant à la coalition à l'intérieur d'un contexte γ qui décrit l'environnement. Ainsi, si face à P_e (le protocole de l'environnement), P permet de faire en sorte que ϕ_M soit vérifiée, alors la coalition est capable de réaliser sa mission.

La notion essentielle que nous souhaitons ajouter est celle de la connaissance puisque, comme nous l'avons mentionné, la plupart des agents humains agissent selon leur connaissance du monde. Par exemple, si un agent doit tirer si l'objet qu'il vise est un ennemi, il serait souhaitable qu'il ne le fasse que s'il **sait** que c'est un ennemi. D'après la sémantique de notre modèle, la définition de la connaissance repose sur une fonction d'interprétation π liant les états possibles du système à un ensemble de propositions primitives Φ. Ainsi, pour permettre aux agents d'agir selon leur connaissance des choses, le protocole joint (à base de connaissance) doit être exécuté dans un contexte interprété (γ, π).

Ainsi, nous proposons une définition de la capacité de coalition basée sur l'exécution du protocole joint dans le contexte γ :

Definition 3.6 (Capacité d'une coalition)
Soit $\mathcal{C} = (\mathcal{K}, \mathcal{M})$ une coalition, et soit $\mathcal{A}$ un groupe d'agents prenant part à cette coalition. Nous dirons que la coalition est capable de réaliser la mission $\mathcal{M} = (\mathcal{E}, \mathcal{P})$ *s'il existe au moins une exécution r du protocole joint P des agents de $\mathcal{A}$ à l'intérieur du contexte interprété (γ, π), qui passe par les états de $\mathcal{E}$. Le contexte γ est défini par des états initiaux S_0, la fonction de transition τ, le protocole de l'environnement P_e, ainsi qu'une condition d'admissibilité sur les exécutions Ψ.*

Formellement, on dira que $\mathcal{C} = (\mathcal{M}, \mathcal{K})$ est capable de réaliser la mission $\mathcal{M}$ si et seulement si

$$\exists(r, m); (\mathcal{I}, r, m) \vDash \phi_M \tag{15}$$

où $\mathcal{I}$ est le système interprété résultant de l'exécution de P dans le contexte interprété (γ, π), et ϕ_M est tel que $||\phi_M|| = \mathcal{E}$, la formule qui décrit la mission.

En pratique, le protocole joint est défini par les protocoles individuels des agents qui commettent des actions qu'ils sont capables de réaliser, étant donné l'état dans lequel ils se trouvent. La vérification de formules temporelles du type "ϕ_M sera éventuellement vraie" permet de déduire ou non la capacité d'une coalition.

Notons que des algorithmes de vérification de modèles ("model checking") existent pour vérifier les propriétés épistémiques et temporelles d'un système interprété.

3.8 Résumé

Le modèle d'analyse de situation proposé est un système interprété *algorithmique et observationnel* $\mathcal{I}$ généré par l'exécution d'un protocole joint P pour les n agents dans le contexte interprété (γ, π) [25]. Les états locaux des agents sont de la forme :

$$r_i(m) = \langle \mathsf{obs}_i(r, m); \mathsf{alg}_i(r, m); \mathsf{PL}_i(r, m) \rangle \tag{16}$$

où

- $\mathsf{obs}_i(r, m)$ est la séquence d'observations effectuées par l'agent i à l'instant m lors de l'exécution r du protocole P. Les observations sont des formules de $\mathcal{L}(\Phi)$. L'action d'observation est en réalité un "mapping" de l'état de l'environnement vers l'état local de l'agent.
- $\mathsf{alg}_i(r, m)$ est un algorithme d'évaluation de vérité pour toute formule du langage $\mathcal{L}(\Phi)$:

- $\mathsf{alg}_i(r,m)(\phi) =$"Oui" signifie que i est *capable* de calculer que ϕ est vraie à l'instant m dans r ;
- $\mathsf{alg}_i(r,m)(\phi) =$"Non" signifie que i est *capable* de calculer que ϕ est fausse à l'instant m dans r ;
- $\mathsf{alg}_i(r,m)(\phi) =$" ?" signifie que i n'est *pas capable* de calculer si ϕ est vraie ou fausse à l'instant m dans r.

– $\mathsf{PL}_i(r,m)$ est un espace de plausibilité pour l'agent i à l'instant m dans r, compatible avec l'état local $r_i(m)$, *i.e.* aucune mesure de plausibilité positive n'est accordée à un état global que i ne considère pas équivalent à $r_i(m)$. (r,m) est l'état global du système à l'instant m de l'exécution r du protocole P.

Analyser la situation revient donc à résoudre le problème suivant :

> Étant données n situations locales pour chacun des n agents et étant donnée la situation locale de l'environnement (correspondant en particulier aux états objectifs des différents objets et agents en présence), comment analyser la situation globale en terme de *perception* (collecte globale d'information), *compréhension* (échange et combinaison d'information entre agents) et *projection* (évolution future).

Dans le cas général, les agents eux-mêmes n'ont pas accès à la situation globale. Par contre, sur la base de son analyse, le concepteur du système (c'est-à-dire celui qui a donné l'ordre aux agents d'agir de telle ou telle manière, donc qui a défini leur protocole) saura si les agents pourront atteindre tel ou tel état, tant du point de vue ontologique, *i.e.* propriété des objets, que du point de vue épistémique, *i.e.* éveil situationnel (voir section 4.1) .

Le processus d'analyse de situation repose ainsi sur l'intégration des représentations internes (éveil de l'agent à propos de lui-même) et externes (éveil à propos de l'environnement ou des autres agents).

En pratique, l'éveil situationnel peut se représenter par une image commune de la situation matérialisée par un COP (*Common Operating Picture*), ou encore le RAP (*Recognized Air Picture*) comme dans le cas du scénario que nous avons décidé d'utiliser pour ce projet.

Page laissée en blanc à dessein.

4 La coalition en tant que réseau d'agents

En dehors de sa nature propre, qui la distingue d'une équipe ou d'un groupe par exemple (voir [40]), la coalition est avant tout un réseau d'agents ayant différents rôles ou attributs (position physique, identité, etc.). Ce chapitre introduit les concepts utiles pour décrire les agents, leur environnement et leurs interactions, lesquels serviront de base pour la représentation des états épistémiques et leur évolution, ainsi que pour le partage des informations entre agents, sujets qui seront traités respectivement aux chapitres 5 et 6.

4.1 Description d'un agent

De manière générale, l'état d'un agent i (à un instant donné) peut se décomposer en une partie épistémique (son état mental) que l'on peut noter $\mathcal{E}_i$ et une partie ontologique (sa façon d'exister) que l'on peut noter $\mathcal{O}_i$. Même si ces deux états sont continuellement en interaction, nous pouvons les distinguer (figure 7). D'une part,

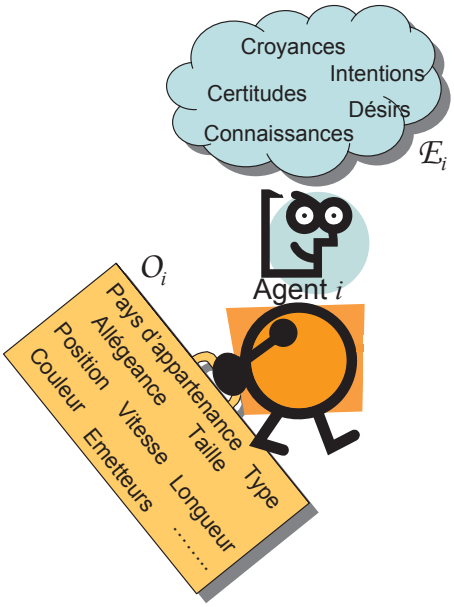


Figure 7 : *Description d'un agent*

l'état épistémique d'un agent est composé de toute l'information à laquelle il a accès sur laquelle il bâtit ses croyances, certitudes et connaissance, désirs, intentions à propos de lui-même ou des autres agents. D'autre part, l'état ontologique de l'agent comporte tout ce qui n'est pas épistémique et qui décrit sa manière d'exister. Par exemple, son pays d'appartenance, son type, sa position, sa vitesse, ses ressources, etc. Cette distinction est équivalente à distinguer état subjectif et état objectif.

Dans le langage des systèmes interprétés, l'état épistémique d'un agent correspond à son état local, alors que son état ontologique est inclus dans l'état de l'environnement. Ainsi, à un instant m donné, on a :

$$\mathcal{E}_i(m) = r_i(m) \text{ et } \mathcal{O}_i(m) \subseteq r_e(m), \text{ pour tout } i \in \mathcal{A}\backslash e \tag{17}$$

Par exemple, si l'agent ne connaît pas sa position, alors celle-ci ne fait pas partie de son état local : l'état local d'un agent contient ce qu'il croit ou connaît à propos de lui-même ou des autres agents. En pratique, l'état local d'un agent peut simplement contenir ses observations (voir section 6.1). À l'inverse, si on considère que l'agent a conscience de ce qu'il est, alors une estimation de son état ontologique fait partie de son état épistémique (par exemple, une estimation à propos de sa position, qui n'est pas la valeur réelle). La valeur réelle correspondant à cet état fera partie de l'état de l'environnement.

4.2 L'environnement

Le statut de l'environnement n'échappe pas *a priori* à la description ci-dessus et peut lui aussi être crédité d'un état épistémique. Dans un système complexe, déterminer ce qui est agent de ce qui est l'environnement lui-même est souvent difficile. Ce choix est bien souvent lié au niveau de détail que l'on veut considérer, contraint en pratique par les limitations de calcul, de mémoire, de temps, de priorité d'action. Étudier l'état épistémique de l'environnement peut permettre de déterminer ses intentions par exemple, c'est-à-dire les intentions de l'ennemi.

Ce qui distingue l'environnement d'un autre agent est notre connaissance limitée de son protocole. Du point de vue des autres agents, celui-ci est considéré comme non déterministe, et un des objectifs de l'analyse de situation consiste à l'évaluer afin de pouvoir déjouer d'éventuelles hostilités, de connaître les positions et identités des ennemis, etc. Ainsi, les forces ennemies avec les conditions météorologiques et de terrain, constituent l'environnement. Au besoin, un objet particulier pourrait en être extrait et considéré comme un agent à part entière. L'environnement représente donc le joueur P_e face à qui la coalition doit avoir une stratégie gagnante P.

L'environnement est aussi la principale source d'observations. À travers les différents moyens de perception dont ils disposent, les agents récoltent des informations qualifiées d'observations. On peut distinguer les propositions qui décrivent l'environnement par un ensemble de propositions élémentaires Φ_e où l'indice e représente l'environnement. Une observation sera donc caractérisée par une formule du langage $\mathcal{L}_e$ construit à partir de Φ_e et fermé sous les opérateurs $\neg$ et $\wedge$. Si nécessaire, on pourra ajouter les opérateurs modaux de connaissance K_e ou de croyance B_e représentant la connaissance ou la croyance de l'environnement.

4.3 Les actions

Nous caractérisons les actions commises par un agent donné selon l'impact qu'elles ont soit sur le monde extérieur (autres agents et environnement), soit sur l'agent lui-même. Ainsi, considérant les deux types d'états qui composent un agent (épistémique et ontologique), on distinguera :

1. Une action épistémique, qui vise à modifier l'état épistémique d'un agent, lui-même ou un autre ;
2. Une action ontologique, qui vise à modifier l'état ontologique d'un agent, lui-même ou un autre.

Une action épistémique consiste, par exemple, à regarder par la fenêtre pour savoir s'il fait beau (perception directe). Une action ontologique pourrait consister à ouvrir la fenêtre. Une action ontologique en général précède une action épistémique et, par conséquent, il devient important de définir les actions primitives que l'on désire prendre en compte afin d'avoir un langage suffisamment précis mais pas trop lourd à gérer. "`Regarder par la fenêtre`" pourrait être considéré comme une action primitive, que l'on qualifiera alors d'épistémique, peu importe les actions de moindre importance accomplies avant ("`se lever`", "`ouvrir la fenêtre`", etc.). Une distinction entre les actions épistémiques pures et parasites est proposée dans [41].

Definition 4.1 (Action épistémique)
Soit $\mathcal{A}$ un ensemble d'agents, soit ACT_i l'ensemble des actions pour lesquelles l'agent $i \in \mathcal{A}$ est compétent et soit $a_e \in ACT_i$ une de ces actions. On dira que a_e est une action épistémique *si a_e modifie l'état épistémique d'un agent de $\mathcal{A}$. Ainsi,*

$$[a_e]\mathcal{E}_j(m) = \mathcal{E}_j(m+1)$$

où $\mathcal{E}_j(m)$ est l'état épistémique de l'agent j à l'instant m, et $j \in \mathcal{A}$.

Definition 4.2 (Action ontologique)
Soit $\mathcal{A}$ un ensemble d'agents, soit ACT_i l'ensemble des actions pour lesquelles l'agent $i \in \mathcal{A}$ est compétent et soit $a_o \in ACT_i$ une de ces actions. On dira que a_o est une action ontologique *si a_o modifie l'état ontologique d'un agent de $\mathcal{A}$. Ainsi,*

$$[a_o]\mathcal{O}_j(m) = \mathcal{O}_j(m+1)$$

où $\mathcal{O}_j(m)$ est l'état ontologique de l'agent j à l'instant m, et $j \in \mathcal{A}$.

Notons que, dans ces deux définitions, j peut être ou non égal à i. Une action épistémique modifie nécessairement l'état local d'un agent, alors que ce n'est pas nécessairement le cas pour une action ontologique. En effet, si Pierre ne s'est pas rendu compte que je lui ai enlevé son chapeau, l'action ontologique "`Enlever le`

`chapeau de Pierre`" modifie son état ontologique, mais pas son état local, du moins jusqu'à ce qu'il pose sa main sur sa tête. Parmi les actions ontologiques, on aurait par exemple, "`Avancer de 1 mètre`", "`Envoyer un missile`", "`Accélérer`", etc.

Une autre distinction intéressante entre les actions peut être faite selon qu'elles modifient soit l'état local de l'agent qui commet l'action, soit l'état local d'un autre agent (environnement inclus). On parlera d'*action interne* dans le premier cas et d'*action externe* dans le second cas.

Definition 4.3 (Action interne)
Soit $\mathcal{A}$ un ensemble d'agents, soit ACT_i l'ensemble des actions pour lesquelles l'agent $i \in \mathcal{A}$ est compétent et soit $a^i \in ACT_i$ une de ces actions. On dira que a^i est une action interne *si a^i modifie l'état ontologique ou épistémique de l'agent i. Ainsi,*

$$[a^i]\mathcal{O}_i(m) = \mathcal{O}_i(m+1) \text{ ou } [a^i]\mathcal{E}_i(m) = \mathcal{E}_i(m+1)$$

où $\mathcal{O}_i(m)$ et $\mathcal{E}_i(m)$ sont les états ontologique et épistémique respectifs de l'agent i à l'instant m.

Une action interne pour un agent pourrait être "`Mettre à jour ses croyances`", "`Avancer de 1 mètre`", "`Accélérer`", etc. Notons qu'une action interne ne modifie pas forcément l'état épistémique de l'agent. En effet, on peut imaginer un pilote blessé qui se déplace machinalement d'un point à un autre sans avoir conscience de ce qu'il fait.

Definition 4.4 (Action externe)
Soit $\mathcal{A}$ un ensemble d'agents, et soit ACT_i l'ensemble des actions pour lesquelles l'agent $i \in \mathcal{A}$ est compétent et soit $a^e \in ACT_i$ une de ces actions. On dira que a^e est une action externe *si a^e modifie l'état ontologique ou épistémique d'un ou plusieurs autres agents de $\mathcal{A}$, différents de i. Ainsi,*

$$[a^e]\mathcal{O}_j(m) = \mathcal{O}_j(m+1), \text{ ou } \text{ ou } [a^e]\mathcal{E}_j(m) = \mathcal{E}_j(m+1) \text{ avec } i \neq j$$

où $\mathcal{O}_j(m)$ et $\mathcal{E}_j(m)$ sont les états ontologique et épistémiques respectifs de l'agent j à l'instant m.

Une action externe peut être par exemple "`Tirer sur l'ennemi`", "`Envoyer un message à` j", "`Éteindre la lumière`", etc.

On a donc quatre types d'actions possibles pour les agents selon ces deux critères croisés, et le tableau 4.3 donne des exemples :

1. Action *épistémique interne* qui consiste à mettre à jour ou réviser ses croyances (à raisonner de façon générale) ;

2. Action *épistémique externe* qui consiste à modifier l'état épistémique d'un ou de plusieurs autres agents, et ce, à travers une action de communication par exemple ;

3. Action *ontologique interne* qui consiste à modifier son état ontologique comme avancer ou reculer, changer de fréquence d'émission, etc. ;

4. Action *ontologique externe* qui consiste à modifier l'état ontologique d'un autre agent comme porter son sac-à-dos, lui donner une arme, etc.

Tableau 2 : *Exemples d'actions épistémiques, ontologiques, internes et externes*

	Action épistémique	Action ontologique
Action interne	`Réviser ses croyances`	`Changer de position`
Action externe	`Envoyer un message à` j	`Tirer sur l'agent` k

Sur la base de ces quatre distinctions entre les actions, quatre types de protocoles peuvent être définis tel qu'illustré à la figure 8 et détaillé à la section suivante.

Remarques

1. Une action telle que "`Envoyer l'information que` ϕ `à l'agent` j" peut être considérée comme épistémique si notre objectif est de modéliser la connaissance d'un agent après qu'il a reçu cette information. Mais elle pourrait être aussi considérée comme ontologique si on s'intéresse plutôt à la manière dont va être transmis le message et les différentes étapes nécessaires pour que le message soit envoyé. Qualifier une action d'épistémique est un moyen simple de faire abstraction d'une multitude d'actions nécessaires pour envoyer un message, mais inutile lorsqu'on veut raisonner sur l'état épistémique d'un agent. De même, qualifier une action d'ontologique est un moyen de faire abstraction des états mentaux d'un agent lorsque ce qui nous intéresse est l'effet de cette action sur un objet en particulier. Par exemple, si l'action est "`Sauter du pont`", peu importe l'état mental de l'agent après l'action ; ce qui importe c'est qu'après l'action l'agent sera physiquement sous le pont, disponible pour effectuer une action suivante (s'il n'est pas blessé).

2. Comme pour la distinction entre action épistémique et ontologique, la distinction entre action interne et externe est une question de contexte et d'objectif recherché. En effet, l'action "`Poser son arme`" est interne à l'agent si on étudie les ressources dont dispose l'agent : Après l'action, il n'a plus d'arme en sa possession, ce qui peut influencer sur la suite de la mission. Par contre, cette action modifie aussi l'environnement, puisqu'une arme est à présent disponible et qu'un autre agent peut la récupérer. Cette même action pourra alors aussi être considérée comme externe.

L'intérêt de distinguer les actions et de pouvoir faire **abstraction** *des détails inutiles et de mieux spécifier le problème que l'on cherche à étudier, c'est-à-dire définir la* **granularité** *avec laquelle on désire analyser la situation.*

3. Une autre façon de définir une action interne de l'agent i serait :

$$[a^i]r_i(m) = r_i(m+1) \text{ telle que } r_i(m) \neq r_i(m+1)$$

alors que pour une action externe on aurait simplement

$$[a^i]r_j(m) = r_j(m+1) \text{ telle que } r_j(m) \neq r_j(m+1) \text{ avec } i \neq j.$$

4. Dans un système interprété, les états globaux sont constitués de la concaténation des états épistémiques des agents et de l'état de l'environnement, état objectif qui contient les états ontologiques des agents. Par conséquent, une action est épistémique si elle modifie l'état local d'un agent ; elle est ontologique si elle modifie l'état de l'environnement.

4.4 Protocoles

Une conséquence de la distinction entre les actions internes et externes, est la distinction équivalente entre les protocoles : (1) les protocoles internes qui ne font appel qu'à des actions internes et (2) les protocoles externes qui ne font appel qu'à des actions externes.

On distingue aussi *protocole standard* de *protocole basé sur la connaissance*. Le premier type implique des tests standard ("**si** ϕ **alors** a), alors que le deuxième type implique des tests sur la connaissance ("**si** $K_i\phi$ **alors** a). Les différents types de protocoles décrits à la figure 8 correspondent à différents problèmes de fusion. Par exemple, les protocoles ontologiques internes correspondent à des problèmes de gestion de ressources ou de planification tels que "**si** ennemi détecté **alors** tourner le radar 2 dans cette direction", les protocoles ontologiques externes peuvent correspondre à des règles d'engagement "**si** ennemi détecté **alors** tirer". De notre point de vue, les problèmes liés à l'analyse de situation se représentent par des protocoles épistémiques où on s'intéresse d'une part au raisonnement (mise à jour, révision des croyances, agrégation) représenté par des protocoles épistémiques internes et d'autre part au partage d'information représenté par des protocoles épistémiques externes.

À la figure 10 de la section 4.6, les deux types de protocoles sont représentés, distingués dans la notation par l'exposant, i pour interne et e pour externe. P_i^i est le protocole interne pour l'agent i, et P_i^e est le protocole externe pour ce même agent.

Cependant, cette description permet de généraliser l'approche à des techniques de planification comme nous l'illustrons dans [42] à la section 4.2.

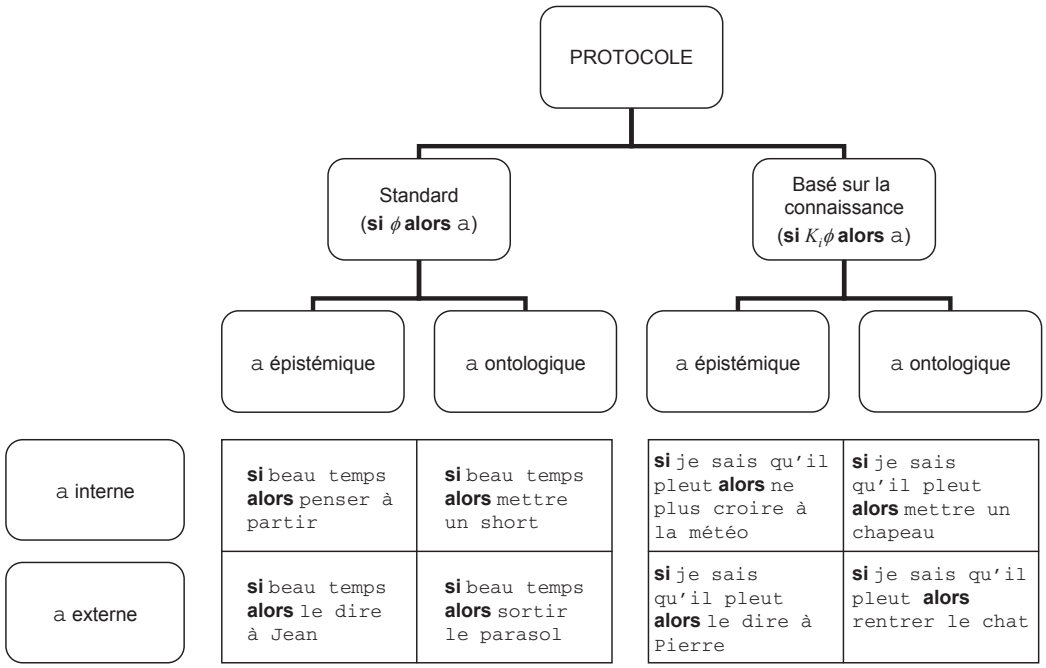


Figure 8 : *Différents types de protocoles selon les tests effectués et les actions impliquées*

4.5 Réseau d'agents

Dans une coalition, comme dans la plupart des systèmes d'ailleurs, les agents sont organisés selon un réseau, où les nœuds sont les agents eux-mêmes (figure 9). Les relations entre les agents peuvent être de différentes natures et, dans le cas d'une coalition, on imagine que de nombreuses relations peuvent être envisagées : liens de communications eux-mêmes pouvant être de différents types (voir section 6.3), relations de proximité, de hiérarchie, d'appartenance à une nation ou à un corps particulier, de confiance, d'allégeance, etc.

Il conviendrait donc d'enrichir le modèle de coalition proposé en introduisant une série de relations binaires $\mathcal{R}_k$ définies sur le groupe d'agents $\mathcal{A}$. Ainsi, $\mathcal{R}_1$ définirait, par exemple, le réseau de communication entre les agents (qui peut communiquer avec qui), $\mathcal{R}_2$ la hiérarchie entre les agents, $\mathcal{R}_3$ les proximités entre les agents, etc. On peut penser à des relations étiquetées par le type de communication par exemple, ou encore la distance physique entre agents.

Definition 4.5
Un réseau d'agents est défini par $R_a = \{\mathcal{A}, \mathcal{L}, \mathcal{F}_A, \mathcal{F}_L\}$ *où* $\mathcal{A}$ *est l'ensemble des nœuds*[7]*, chaque nœud représentant un agent, et* $\mathcal{L}$ *est l'ensemble des liens entre*

7. Encore une fois, $\mathcal{A}$ est défini à partir de l'agent institutionnel $\mathcal{K}$.

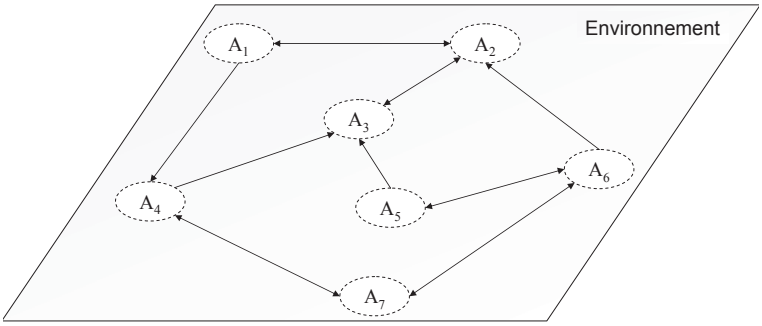


Figure 9 : *Réseau d'agents évoluant dans un environnement*

les nœuds. Les nœuds sont étiquetés par différents attributs définis par une fonction $f_A : \mathcal{A} \rightarrow X$ *et les liens sont étiquetés par différents attributs définis par une fonction* $f_L : \mathcal{L} \rightarrow Y$. X *et* Y *sont respectivement les ensembles de valeurs possibles pour les attributs d'agents et de liens.* $\mathcal{F}_A$ *et* $\mathcal{F}_L$ *sont respectivement les ensembles de fonctions* f_A *et* f_L.

La définition 4.5 représente la coalition comme un réseau social et pourra alors être analysée comme telle. Il s'agit là d'un point de départ pour des travaux futurs.

4.6 Modèle fonctionnel d'un agent

Le fonctionnement d'un agent peut être décrit par le schéma classique utilisé en contrôle et représenté à la figure 10. À l'instant m, l'agent i étant dans l'état local $r_i(m)$ reçoit une information $i(m)$ qui modifie son état local par une opération interne de raisonnement (voir chapitre 6) pour donner un nouvel état local $r_i(m+1)$. Sur la base de ce nouvel état local, l'agent i exécute l'action correspondante selon son protocole P_i.

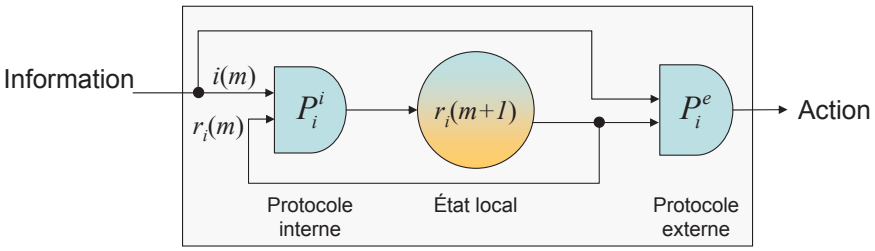


Figure 10 : *Modèle d'un agent*

Ce schéma général pour un agent peut se décomposer en deux autres schémas de base, le premier décrivant un agent sans mémoire, qui agit simplement selon la nouvelle information qu'il reçoit, et un deuxième modèle où l'agent i n'exécute aucune action externe, ses actions consistant simplement à mettre à jour ou réviser ses croyances.

Pour résumer : P_i^i est le protocole interne de l'agent i qui définit sa manière de raisonner et P_i^e est le protocole externe de l'agent i qui définit sa manière d'interagir avec les autres agents et l'environnement (voir sections 4.3 et 4.4).

4.7 Interactions entre agents et environnement

Les interactions entre les agents d'une part et entre les agents et l'environnement d'autre part se traduisent au niveau de l'agent par des informations que celui-ci reçoit et des actions qu'il commet. Bien qu'il existe plusieurs axes selon lesquels caractériser l'information que reçoit un agent, on peut déjà distinguer deux types de provenance :

1. L'information provenant de l'environnement, qui est issue d'une observation de la part de l'agent. Les principaux facteurs affectant la qualité de ces informations sont liés aux moyens de perception limités des agents.

2. L'information provenant d'un autre agent, diffusée dans le réseau de communication. Les principaux facteurs affectant la qualité de ces informations sont, d'une part (1) la fiabilité de l'agent émetteur (source) et, d'autre part, (2) la fiabilité du canal de communication.

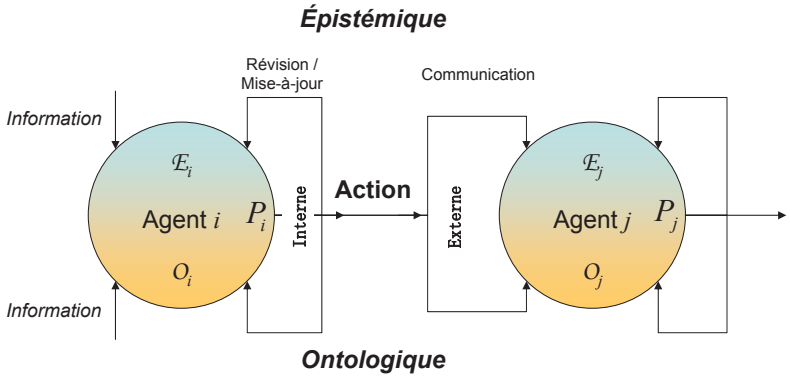


Figure 11 : *Interactions entre agents.*

Parmi les autres facteurs qui peuvent être utilisés pour caractériser une information on pourrait notamment considérer le fait que celle-ci est reçue à la suite d'une requête ou non de la part de l'agent ("Est-ce que quelqu'un connaît la réponse à cette question ?"). Dans le premier cas, le niveau de pertinence de l'information sera élevé, alors

qu'il sera *a priori* plus faible si l'information correspond à un envoi automatique. Cela suppose que l'agent évalue ses propres besoins en information.

Bien que ces notions soient d'un intérêt notable, elles ne feront pas ici l'objet d'un développement conséquent.

La figure 11 représente les interactions entre les agents, dans le cas de deux agents i et j, selon la base des actions que ceux-ci commettent. Bien entendu, cette distinction dépend de la granularité de la discussion et, par conséquent, de son objectif.

5 Croyances, certitudes et connaissances

L'analyse de situation dans le cadre d'une coalition doit pouvoir répondre à des questions telles que :

1. Étant donné un système décrit par le protocole joint des agents et exécuté dans un contexte donné, est-ce que l'état d'éveil situationnel nécessaire pour réaliser la mission pourra être atteint ?

2. Quel est le protocole joint qui garantira aux agents d'accomplir leur mission selon certaines contraintes ?

3. Qu'offre un protocole joint comme moyen d'adaptation aux imprévus ?

4. ...

On considère la syntaxe suivante : Soit Φ, un ensemble de propositions élémentaires fermé sous les opérateurs de négation $\neg$, de conjonction $\wedge$, de connaissance K_i, de certitude Cert_i et de croyance B_i, $i = 1, \ldots, n$, et appelons $\mathcal{L}_{KB}$ le langage ainsi formé. Par conséquent, une formule $\phi \in \mathcal{L}_{KB}$ sera, par exemple, $K_i p \wedge B_i K_j p$ qui se lit "l'agent i connaît p et croit que l'agent j connaît aussi p".

Puisque les opérateurs modaux ne modifient pas les valeurs de vérité des propositions, une sémantique basée sur les tables de vérité n'est d'aucune utilité. L'option de rechange couramment utilisée dans ce cas-là est la sémantique des mondes possibles, sur laquelle sont définies des structures de Kripke. Une telle structure est un tuple $(S, \pi, \mathsf{R}_1, \ldots, \mathsf{R}_n)$ où S est un ensemble de mondes possibles, π est une fonction d'interprétation qui associe à chaque monde $s \in S$ une assignation de vérité $\pi(s)$ sur Φ, telle que $\pi(s)(p) = 1$ si p est vraie dans le monde s et $\pi(s)(p) = 0$ si p est fausse dans le monde s. R_i est une relation dite *d'accessibilité* pour l'agent i qui relie le monde dans lequel se trouve l'agent à tous ceux qu'il considère possibles étant donné cet état. On note cet ensemble $\mathsf{R}_i(s)$.

Alors que la connaissance est représentée par une relation d'équivalence, un autre type de relation binaire entre états possibles du monde peut permettre de représenter la croyance. En effet, si R n'est plus réflexive, alors l'axiome qui impose qu'une formule connue soit vraie ($K\phi \rightarrow \phi$) n'est plus valide et le système de logique épistémique correspondant permet de représenter la croyance, autorisant une formule fausse à être crue.

Il existe cependant un modèle de croyance plus riche que celui qualitatif basé sur les logiques épistémiques. En effet, la croyance peut être représentée par une mesure quantitative telle qu'une mesure de probabilité ou une fonction de croyance, par exemple. La classe générale de ces mesures est connue sous le nom de *mesures de*

plausibilité au sens défini dans [43]. Une mesure de plausibilité $\mathrm{PL} : 2^S \to D$ satisfait les propriétés suivantes :

$$\begin{aligned}
&\mathrm{PL}(\varnothing) = \bot_D \\
&\mathrm{PL}(S) = \top_D \\
&\mathrm{PL}(A) \leq \mathrm{PL}(B) \text{ si } A \subseteq B
\end{aligned}$$

où D est un ensemble partiellement ordonné (*poset*) par la relation $\leq$. PL est une généralisation directe d'une mesure de probabilité auquel cas $D = [0, 1]$. Ainsi, les mesures de croyances et de plausibilité au sens de Shafer [44], les mesures de possibilités et de nécessité [45] mais aussi les rangs ordinaux [46] sont des exemples de mesures de plausibilité.

5.1 Niveau individuel

L'état local $r_i(m)$ d'un agent à un instant donné dans un système donné représente son état local épistémique. Ainsi,

$$\mathcal{E}_i(m) = (\mathcal{M}_{AS}, r_i(m)) \tag{18}$$

On associe souvent un ensemble de croyances ou de connaissances à l'état épistémique d'un agent à un instant donné. Ce que sait ou croit l'agent représente son état mental, sur lequel seront basées les actions qu'il devra commettre. Ainsi, à chaque état épistémique (état local) est associé un ensemble de formules que l'agent croit, connaît ou dont il est certain. Puisqu'un agent peut posséder à la fois des croyances, des certitudes et des connaissances, il nous apparaît donc intéressant de pouvoir les distinguer. On note :

1. $K_i\phi$ si l'agent i **connaît** ϕ ;
2. $\mathrm{Cert}_i\phi$ si l'agent i est **certain** de ϕ ;
3. $B_i\phi$ si l'agent i **croît** ϕ.

On peut ainsi déduire une hiérarchie dans les formules associées à l'état épistémique de l'agent : au sommet, les formules que l'agent connaît suivies par les croyances à divers degrés. La caractéristique des croyances est qu'elles sont défaisables, contrairement aux connaissances (figure 12).

Notons la distinction entre l'état épistémique d'un agent et son ensemble de croyances : l'état épistémique contient toute l'information à laquelle l'agent a accès et peut être, par exemple, une base de données, alors que l'ensemble des croyances est une sorte d'abstraction de cette base de données, c'est-à-dire un ensemble de

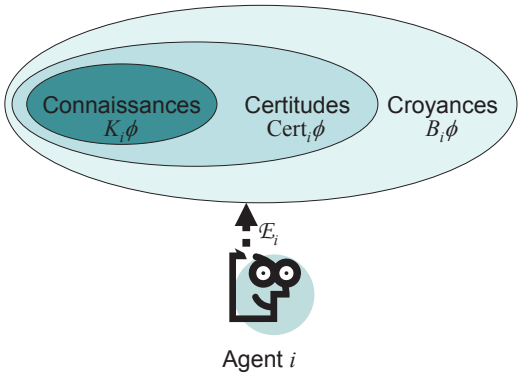


Figure 12 : *Ensemble des croyances, certitudes et connaissances d'un agent*

formules ordonnées par leur statut allant de "peu crues" à "connues", en passant par "certaines".

Les croyances d'un agent i sont représentées par un ensemble $\mathcal{B}_i$ de formules qu'il croit vraies. Un sous-ensemble de $\mathcal{B}_i$ est un ensemble de formules dont il est certain, et un sous-ensemble de ce dernier est un ensemble de formules qu'il connaît. On a donc :

$$\mathcal{B}_i = \{\phi \in \mathcal{L}_{KB} | B_i\phi\} \tag{19}$$

avec la définition suivante (suivant [47]) :

Definition 5.1 (Croyance individuelle)
Soit un système interprété $\mathcal{I}$ défini pour un ensemble d'agents $i = 1, \ldots, n$. On dit que l'agent i **croit** *la proposition ϕ au point (r, m) et on note $B_i\phi$, ssi pour cet agent ϕ est plus plausible que $\neg\phi$. Formellement,*

$$(\mathcal{I}, r, m) \models B_i\phi \text{ si et seulement si}$$
$$\mathrm{PL}_i(r, m)(\phi) > \mathrm{PL}_i(r, m)(\neg\phi)$$

où $\mathrm{PL}^i_{(r,m)}$ est la plausibilité de l'agent i au point (r, m).

Dans le cas particulier où PL est une mesure de probabilité, ceci signifie simplement que ϕ est crue par i au point (r, m) ssi $\mathrm{Prob}^i_{(r,m)}(\phi) > \frac{1}{2}$. On pourrait également penser à toute autre définition où $\frac{1}{2}$ serait remplacé par un paramètre $x \in [0.5, 1[$.

Definition 5.2 (Certitude individuelle)
Soit un système interprété $\mathcal{I}$ défini pour un ensemble d'agents $i = 1, \ldots, n$. On dit que l'agent i est **certain** *de la proposition ϕ au point (r, m) et on note $\mathrm{Cert}_i\phi$, ssi ϕ est crue par i avec un degré 1. Formellement,*

$$(\mathcal{I}, r, m) \models \mathrm{Cert}_i\phi \text{ si et seulement si}$$
$$(\mathcal{I}, r, m) \models B_i\phi \wedge \mathrm{PL}^i_{(r,m)}(\phi) = 1$$

où $\mathrm{PL}^{i}_{(r,m)}$ *est la plausibilité de l'agent* i *au point* (r, m).

Definition 5.3 (Connaissance individuelle)
Soit un système interprété $\mathcal{I}$ *défini pour un ensemble d'agents* $i = 1, \ldots, n$. *On dit que l'agent* i **connaît** *la proposition* ϕ *au point* (r, m) *et on note* $K_i\phi$, *ssi* ϕ *est vraie pour tous les points équivalents à* (r, m) *pour l'agent* i. *Formellement,*

$$(\mathcal{I}, r, m) \vDash K_i\phi \text{ si et seulement si}$$
$$(\mathcal{I}, r', m') \vDash \phi \text{ pour tous les points } (r', m') \text{ tels que } (r, m) \sim_i (r', m')$$

où $\sim_i$ *est une relation d'équivalence pour l'agent* i *sur l'ensemble des points du système.*

Une certitude est une croyance de degré 1, et une connaissance est une formule certaine et vraie. On a donc la hiérarchie suivante :

$$K_i\phi \longrightarrow \mathrm{Cert}_i\phi \longrightarrow B_i\phi$$

Donc, l'ensemble des connaissances est inclus dans celui-ci des certitudes, lui-même inclus dans celui des croyances.

Remarque

Grâce aux deux opérateurs B_i et K_i, on peut donc distinguer les connaissances des croyances d'un agent. Cependant, si nous considérons qu'un agent peut avoir à la fois des croyances et des connaissances, alors ces deux notions doivent nécessairement interagir, ce qui implique la définition de certains axiomes pour assurer la consistance. Dans [7] ces axiomes qui établissent, par exemple, qu'un agent ne peut assigner une plausibilité non nulle qu'à des états qu'il considère possibles (selon R_i) sont définis.

5.2 Niveau du groupe d'agents

Comme nous l'avons exprimé dans la définition 3.2 de l'éveil situationnel, il n'existe pas de notion unique d'éveil situationnel, mais plutôt différentes notions plus ou moins appropriées selon les contraintes associées (système synchrone ou asynchrone, fiabilité du réseau, etc.) et les objectifs de la mission. Dans le cadre d'une coalition, ces notions doivent reposer sur une définition d'état épistémique de **groupe**.

L'état épistémique d'un groupe d'agents G est représenté par l'état global à un instant donné du système généré par l'exécution d'un protocole joint P_G des agents de G :

$$\mathcal{E}_G(m) = (\mathcal{I}, r, m) \tag{20}$$

Par rapport à un groupe d'agents, en dehors de la hiérarchie précédente entre croyances, certitudes et connaissances, on peut définir une autre hiérarchie issue de [8] :

1. $D^e_G\phi$ si le groupe G a la connaissance, certitude ou croyance **distribuée** de ϕ ;
2. $S^e_G\phi$ si **quelqu'un** du groupe G a la connaissance, certitude ou croyance de ϕ ;
3. $E^e_G\phi$ si **tous les membres** du groupe G ont la connaissance, certitude ou croyance de ϕ ;
4. $C^e_G\phi$ si le groupe G a la connaissance, certitude ou croyance **commune** de ϕ.

où l'exposant $e \in \{B, \text{Cert}, K, \}$, représente donc une croyance, certitude ou connaissance.

Au bas de la hiérarchie, on trouve la *connaissance distribuée* de ϕ qui signifie que ϕ peut être déduite des connaissances des agents de G sans qu'aucun ne connaisse ϕ explicitement. Par exemple, un agent connaît le lieu du crash d'un avion, un autre connaît les positions ennemies, mais aucun d'eux ne sait si le crash a eu lieu en zone ennemie.

Au sommet de la hiérarchie, on trouve la *connaissance commune* de ϕ, qui signifie que les agents du groupe G savent tous que les autres savent tous que $\ldots \phi$. Cette définition est infinie et, par conséquent, cet état est impossible à atteindre en pratique si on n'admet pas une certaine part d'incertitude. Par contre, certaines approximations peuvent être définies. Le tableau 3 donne les définitions pour la connaissance de groupe, mais celles-ci peuvent être étendues à la certitude et la croyance.

Tableau 3 : *Hiérarchie des états de connaissance de groupe [8]*

Connaissance distribuée	"Le groupe G a la connaissance distribuée de ϕ"	$D_G\phi = \bigwedge_{i,\psi} K_i\psi \vDash \phi$
Quelqu'un connaît	"Au moins un membre du groupe G sait que ϕ"	$S_G\phi = \bigvee_{i \in G} K_i\phi$
Tout le monde connaît	"Tous les membres du groupe G savent que ϕ"	$E_G\phi = \bigwedge_{i \in G} K_i\phi$
Tout le monde connaît^k	"Tous les membres du groupe G savent que tous les membres du groupe savent que $\ldots \phi$" (Chaîne de longueur k)	$E^k_G\phi = E_G E^{k-1}_G\phi$
Connaissance commune	"Le groupe G a la connaissance commune de ϕ"	$C_G\phi = E_G\phi \wedge E^2_G\phi \wedge \ldots$

Alors que la connaissance commune (ou tout autre type d'état de connaissance de groupe) peut être un état désiré ou nécessaire pour réaliser une mission, celui-ci peut

aussi être donné *a priori*, issu d'un "briefing" avant le début de la mission, ou encore issue d'une pratique culturelle. Dans le contexte de coalition qui nous intéresse, ce type de connaissance est crucial car il peut permettre aux agents de communiquer de manière implicite, c'est-à-dire sans nécessairement envoyer de message (voir chapitre 6). En particulier, le réseau de communication peut être une connaissance commune des agents de la coalition.

6 Évolution des états épistémiques

Dans cette partie, nous nous intéressons à la manière dont évoluent les états épistémiques des agents. Cela comprend, d'une part, la façon dont ceux-ci sont mis à jour ou révisés et, d'autre part le partage des informations dans un groupe d'agents, c'est-à-dire quelles informations sont transmises, à qui et comment elles le sont.

Dans le premier cas, on cherche au niveau local (individuel pour chacun des agents) à faire évoluer des croyances vers des certitudes et ensuite des connaissances. Dans le second cas, on cherche à passer d'une connaissance distribuée à une connaissance commune.

L'évolution d'un état épistémique met donc en jeu uniquement des actions épistémiques internes (mise à jour et révision) et externes (communication). Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous faisons abstraction ici des actions ontologiques qui modifient la façon d'exister des agents.

6.1 Le statut des informations

Soit ϕ une information émise par l'agent j et reçue par l'agent i, et notons par $\texttt{Recevoir}_i(\phi, j)$ l'action exécutée par l'agent i qui consiste à recevoir l'information ϕ provenant de l'agent j.

Une question fondamentale concerne le statut des informations reçues par l'agent i. Doit-on considérer ϕ comme une connaissance, une certitude ou une croyance ? Bien-entendu, la réponse dépend principalement :

1. de la *fiabilité*[8] de la source (ici l'agent j) dans laquelle on peut inclure la fiabilité du canal de transmission,
2. de l'*incertitude* de l'agent j quant à l'information qu'il transmet, qui sera donc incluse dans ϕ (par exemple, ϕ="L'objet est possiblement un missile"),
3. de la *crédibilité* accordée par l'agent i à ϕ, qui est liée à la cohérence de ϕ avec la base de croyances de i (si ϕ est en contradiction avec les croyances de i, ϕ sera peu crédible aux yeux de i).

Une autre question fondamentale sur le statut que l'agent i doit accorder à ϕ concerne sa *pertinence* c'est-à-dire déterminer si celle-ci doit être priorisée ou non selon le but recherché par l'agent i. Alors que la fiabilité de j, l'incertitude incluse dans ϕ ainsi que la crédibilité de ϕ influencent directement la croyance que i aura en ϕ, la pertinence

8. La fiabilité est la capacité d'une source à rapporter des propositions vraies et est évaluée, par exemple, sur la base de statistiques de rapports passés qui ont pu être vérifiées.

affecte simplement la priorité que i donnera à ϕ. Une discussion sur la pertinence de l'information est abordée dans [48] à travers les notions de "temps utile d'une information" et de "thème de référence".

Dans ce travail, nous laissons de côté la crédibilité et la pertinence de l'information. Nous cherchons donc à modéliser l'incertitude de l'agent i qui reçoit l'information ϕ, celle-ci englobant d'une part la fiabilité de la source j et d'autre part l'incertitude inhérente à ϕ, c'est-à-dire incluant une modalité éventuelle ("*possiblement* un missile"). Nous distinguons ici deux cas.

6.1.1 Si l'agent i reçoit ϕ alors il connaît ϕ

Si on considère que l'agent observe le monde à travers des capteurs fiables et que tous les autres agents sont fiables, alors

$$[\texttt{Recevoir}_i(\phi, j)]s = s' \text{ et } (\mathcal{M}, s') \vDash K_i\phi \tag{21}$$

On a aussi $(\mathcal{M}, s') \vDash B_i\phi$ puisque $K_i\phi \rightarrow B_i\phi$. Notons que l'agent n'observe jamais rien qui soit en contradiction avec ses connaissances.

Considérer les informations comme des connaissances capture l'essence même du raisonnement bayésien. En effet, cela revient à considérer les événements observés comme des faits et à calculer la distribution révisée conditionnellement à cet événement [49], d'où la règle de Bayes :

$$\mathrm{PL}(\psi|\phi) = \frac{\mathrm{PL}(\psi \wedge \phi)}{\mathrm{PL}(\phi)} \tag{22}$$

L'incertitude résidant après l'observation de ϕ est due à la connaissance *a priori* sur l'occurrence de ϕ, *i.e.* $\mathrm{PL}(\phi)$.

Rappelons que ϕ peut néanmoins contenir une certaine incertitude (une modalité, de la non-spécificité, par exemple). En effet, si nous reprenons l'exemple ci-dessus, ϕ peut être décomposée en $\phi \equiv \Diamond\phi_0$, où ϕ_0="L'objet est un missile". Nous nous intéressons ici uniquement à ϕ et pas à ϕ_0.

6.1.2 Si l'agent i reçoit ϕ alors il croit ϕ

Dans un autre cas de figure, il se peut que ϕ ait été observée avec une certaine incertitude et par conséquent l'agent qui reçoit ϕ ne peut que croire ϕ. Ainsi,

$$[\texttt{Recevoir}_i(\phi, j)]s = s' \text{ et } (\mathcal{M}, s') \vDash B_i\phi \tag{23}$$

Croire ϕ signifie que ϕ peut être fausse et, par conséquent, peut impliquer certains conflits. Dans ce cas, il faut utiliser un autre modèle de révision.

Afin de tenir compte et des conflits éventuels et de leur gestion au niveau des croyances de i, nous avons proposé dans [39] de modéliser l'information reçue sous la forme d'une fonction de croyance. Ainsi, $\mathrm{Bel}_i^{(r,m)}$ représente la croyance (en fait, sa base de croyances) de l'agent i au point (r, m) du système, c'est-à-dire à l'instant m de l'exécution r. La révision de la base de croyances pourra ainsi se faire à l'aide de la règle de combinaison de Dempster, notée $\oplus$:

$$\mathrm{Bel}_i^{(r,m)} = \mathrm{Bel}_i^{(r,m-1)} \oplus \mathrm{Bel}_j^{(r,m)}[\phi] \text{ avec } j \in \mathcal{A}\backslash i \tag{24}$$

où $\mathrm{Bel}_j^{(r,m)}[\phi]$ est la croyance de l'agent j quant à l'occurrence de ϕ, que i vient de recevoir.

L'idée de représenter les croyances individuelles d'un agent à un instant donné par une fonction de croyance $\mathrm{Bel}_i^{(r,m)}$ permet en particulier de gérer le conflit entre deux informations. Le conflit est défini par :

$$\mathrm{Conf}(\mathrm{Bel}_i, \mathrm{Bel}_j) = (m_i \oplus m_j)(\varnothing) \tag{25}$$

où m est la fonction de masse associée à Bel et $\varnothing$ est l'ensemble vide.

De plus, un large éventail de règles de combinaison, de mise à jour et de révision des croyances existe ouvrant un champ libre pour le développement de cette partie. Par exemple, la croyance du groupe d'agents G à l'instant m de l'exécution r pourrait alors se définir par :

$$\mathrm{Bel}_G^{(r,m)} = \bigoplus_{i \in G} \mathrm{Bel}_i^{(r,m)} \tag{26}$$

6.2 Apprentissage

Dans [13, 15, 16], la notion d'apprentissage a été introduite comme condition nécessaire au partage d'information : une information ne peut être transmise par l'agent i à j que si i a *appris* ϕ à l'instant m.

Une première approche consiste à considérer que i *apprend* ϕ à l'instant t si i *reçoit* ϕ à t, approche suivie dans [16]. On a alors :

$$[\texttt{Recevoir}_i(\phi, j)]s = s' \text{ et } (\mathcal{M}, s') \vDash App_i\phi \tag{27}$$

où $App_i\phi$ signifie que l'agent i a appris ϕ.

Dans le but de raffiner le modèle, nous proposons deux types d'approches pour définir App_i :

1. ϕ est apprise par i à l'instant m si i ne connaissait pas ϕ à $m-1$ et qu'il connaît ϕ à m :

$$(\mathcal{I}, r, m) \models App_i\phi \text{ ssi } (\mathcal{I}, r, m-1) \not\models K_i\phi \text{ et } (\mathcal{I}, r, m) \models K_i\phi \tag{28}$$

   Cette définition est compatible avec (27) dans le cas où les informations reçues sont considérées comme connues. Cependant, elle est plus large puisqu'elle autorise ϕ à être déduite de la base de connaissance de i après réception d'une autre information ψ. En effet, supposons que i a dans sa base de connaissance $\psi \rightarrow \phi$. Il ne sait donc ni ϕ, ni ψ. S'il reçoit ψ, alors il en déduit que ϕ (*modus ponens*) sans avoir nécessairement reçu ϕ, et a donc *appris* ϕ.

   Un autre avantage de cette approche, est qu'elle permet de réduire les informations transmises. En effet, si à l'instant suivant $(m+1)$, i reçoit effectivement ϕ, on ne pourra pas dire qu'il a appris ϕ à $(m+1)$ puisqu'il connaissait déjà ϕ à m. Ainsi, ϕ ne sera plus transmise.

2. ϕ est apprise par i à l'instant m si i le degré de croyance de i vis-à-vis de ϕ à m est supérieur à un certain seuil :

$$(\mathcal{I}, r, m) \models App_i\phi \text{ ssi } \mathrm{Bel}_i^{(r,m)}(\phi) \geq \alpha \tag{29}$$

   où α est un seuil de tolérance par rapport à l'apprentissage de ϕ. En effet, si on autorise un certaine incertitude sur les informations reçues, il se peut que celles-ci n'atteignent jamais ni un degré 1 (certitude) ni un statut de connaissance. Or, il peut néanmoins être pertinent de transmettre ϕ dans ces circonstances.

6.3 Partage des informations

Le partage des informations a été traité dans les rapports [13, 15, 16], où une politique de partage des informations entre les membres d'une coalition a été définie. Dans cette partie, nous revenons sur ce travail dans le but de le lier au modèle d'analyse de situation proposé. En effet, la construction d'une image commune passe par l'échange d'informations entre les membres de la coalition. Les actions (épistémiques) de communication d'une part et les actions d'observations de l'environnement d'autre part sont les deux causes de changement des états épistémiques des agents, et donc deux causes principales de l'évolution du système. Toutes les autres causes de changement sont dues à l'évolution de l'état de l'environnement (environnement dynamique).

Le matériel présenté dans cette partie est un résumé des travaux présentés dans [13, 15, 16]. Les principaux résultats sont rappelés et liés aux concepts développés dans ce présent rapport à l'aide du langage des systèmes interprétés.

La question développée ici est à présent de savoir comment faire évoluer le statut d'une proposition ϕ dans la hiérarchie du tableau 3.

6.3.1 Échanges d'informations au sein d'une coalition

Modèle de données Pour échanger les informations, une question clé est le format de celles-ci afin qu'elles puissent être comprises par tous les participants. Le modèle de données JC3IEDM (*Joint Consultation Command and Control Information Exchange Data Model*) (utilisé dans [13]), définit un grand nombre d'objets d'intérêt pour le domaine des missions de combat. Ce modèle a été récemment adopté par la marine américaine, et est implémenté par plusieurs entités du Département de la défense américaine, les forces de coalition ainsi que dans certaines organisations commerciales [50]. Ce modèle d'échange d'information est développé au sein de l'OTAN.

Bien que ce standard soit un bon point de départ pour modéliser les échanges d'information à l'intérieur d'une coalition, une de ses limitations est la représentation de l'incertitude. Des travaux de recherche sont actuellement en cours à ce sujet à Valcartier.

Besoins en échange d'information (IER - *Information Exchange Requirements***)** Dans le contexte du J3CIEDM, "Les IERs identifient **qui** échange **quelle** information **avec qui** d'autres, **pourquoi** cet échange est nécessaire (référence à des opérations) et **quand** l'échange doit avoir lieu (événement déclenchant, caractéristiques temporelles de l'échange, etc.)" [13].

6.3.2 Communication /Diffusion

Comme nous l'avons introduit dans [39], on distingue trois principaux types de communication dans un réseau d'agents :

1. **Communication implicite** - Par exemple, deux agents doivent s'appeler à midi. Si à l'heure-dite un des deux n'a pas appelé, l'autre saura qu'il lui est arrivé quelque chose. Ce type de communication requiert *a priori* une connaissance commune de certains faits (l'heure d'appel doit être de connaissance commune entre les deux agents).

2. **Annonces publiques** - Par exemple, le commandant d'une division transmet à chacun des membres de sa division que l'ennemi approche. Ce type de communication implique un émetteur et plusieurs récepteurs.

3. **Transmission de message** - Par exemple, Pierre transmet à Jean que la position de la troupe ennemie est à 10 km de la position de Jean. Ce type de communication implique un émetteur et un récepteur.

La communication explicite de type "transmission de message" peut être considérée comme primitive, puisque les deux autres types peuvent être construits à partir de

celle-ci. En effet, une annonce publique est une transmission simultanée de messages à tous les membres d'un groupe d'agents, dans lesquels il faut spécifier que l'annonce est publique. En effet, dans l'exempe d'un courrier électronique envoyé par i à 10 personnes, le fait d'inclure la liste d'envoi dans le champ CC (*Carbon Copy*) transmet aux 10 personnes, en plus du contenu du message lui-même, l'information qu'à présent les membres de la liste de distribution connaissent (ou vont connaître) le contenu du message. Si le champ BCC (*Blind Carbon Copy*) est utilisé, la liste sera invisible et les 10 personnes recevront seulement l'information du message.

Ainsi, concernant le problème de partage de l'information, on considère que chaque agent est compétent pour effectuer un seul type d'action externe :

$$ACT_i = \{\texttt{Diffuser}_i(j, \phi, t), \Lambda\} \text{ pour tout agent } i \in G$$

qui consiste pour l'agent i appartenant au groupe G à envoyer l'information ϕ à l'agent j à l'instant t. Λ est l'action nulle, qui consiste à ne rien faire. À l'aide de cette action primitive, on peut construire l'action complexe

$$\texttt{Annoncer publiquement}_i(G, \phi, t) = \wedge_{j \in G, i \neq j} \texttt{Diffuser}_i(j, \phi, t).$$

qui consiste pour l'agent i à envoyer simultanément l'information ϕ à tous les agents du groupe G.

L'annonce publique est un moyen simple et efficace d'atteindre la connaissance commune. En effet, après l'annonce publique que ϕ à l'intérieur du groupe G, on aura :

$$[\texttt{Annoncer publiquement}_i(G, \phi, t)]||C_G^K \phi||$$

où $||C_G^K \phi||$ est l'ensemble des états globaux où $C_G^K \phi$ est vraie, *i.e.* où les agents de G ont la connaissance commune de ϕ.

6.3.3 Politique de partage

Le principal problème est donc d'une part "quelles informations partager ?" et d'autre part "avec qui les partager ?". Pour assurer un partage sécurisé des informations dans le cadre d'une coalition et garantir ainsi que certains membres ou acteurs n'aient pas accès à des informations qu'ils ne devraient pas avoir (non-souhaitées par les autres membres), une *politique de partage des informations* doit être définie.

Cinq concepts sont nécessaires pour la modélisation d'une politique de partage [16] :

1. Le temps :
   - T_1 est le temps auquel l'information est valide ;
   - T_2 est le temps auquel l'information est apprise par un agent ;

– T_3 est le temps auquel l'agent diffuse l'information.

2. Les actions :
   – $\texttt{Diffuser}_i(j, \phi, t)$ est l'action **externe** qui consiste pour l'agent i à diffuser (ou communiquer) l'information ϕ à l'agent j à l'instant t ;
   – $\texttt{Mettre a jour}_i(\phi, t)$ est l'action **interne** qui consiste pour l'agent i à mettre à jour sa base de connaissance à l'instant t avec l'information ϕ.
3. Deux fluents particuliers :
   – $Theme(\phi, \mathrm{Th})$, le thème de l'information ϕ est Th ;
   – $Level(i, \phi, \mathrm{Lv})$, le niveau (de pertinence, par exemple) attribué par l'agent i à l'information ϕ est Lv.
4. Les modalités de diffusion :
   – $Obligation(a)$ exprime le fait que l'agent i est obligé d'exécuter l'action a ;
   – $Interdiction(a)$ exprime le fait qu'il est interdit pour l'agent i d'exécuter l'action a ;
   – $Permission(a)$ exprime le fait que l'agent i a la permission d'exécuter l'action a.

   Les actions considérées dans la suite sont des actions de communication du type décrit ci-dessus.
5. Le contexte

Le langage est construit en fermant Φ sous les opérateurs classiques $\neg$, $\vee$, $\wedge$, $\rightarrow$ ainsi que les opérateurs modaux K_i, Cert_i et B_i.

6.3.4 Protocole de partage des informations

Pour faire cadrer la politique de partage des informations rappelée ci-dessus et décrite dans [16] dans le langage que nous avons choisi pour modéliser la situation, nous avons le choix de :

1. définir des opérateurs déontiques agissant sur des états, puisque dans la description ci-dessus les opérateurs agissent sur des actions. Il suffit pour cela de définir les post-conditions des actions de transmission d'information (*i.e.* des actions de type $\texttt{Diffuser}_i(j, \phi, t)$).
2. définir la politique de partage à travers un protocole pour l'agent i.

Nous optons pour la deuxième solution et définissons un *protocole d'échange des informations* associé à la politique de partage.

Soit $ACT_i = \{\texttt{Diffuser}_i(j, \phi), \Lambda\}$ l'ensemble des actions pour lesquelles l'agent i est compétent. $\texttt{Diffuser}_i(j, \phi)$ est l'action consistant, pour l'agent i, à envoyer à l'agent j le message ϕ, où ϕ est une formule de $\mathcal{L}_{KP}$ et Λ est l'action nulle qui consiste à ne rien faire. Nous avons volontairement éliminé la variable temporelle t de l'action $\texttt{Diffuser}_i(j, \phi, t)$ puisque le temps est inclus dans le modèle. En effet, la postcondition de $\texttt{Diffuser}_i(j, \phi)$, étant donné que le système est dans l'état global (r, m) s'exprime par :

$$[\texttt{Diffuser}_i(j, \phi)](r, m) = (r, m + 1) \text{ avec } (M, r, m + 1) \models K_j\phi$$

si on suppose que l'agent i connaît ϕ après que ϕ lui ait été transmise par l'agent j. Bien entendu, d'une façon générale on peut simplement considérer que $(M, r, m+1) \models B_j\phi$ si i n'est pas fiable aux yeux de j.

Prenons un exemple simple impliquant uniquement deux agents i et j. Une politique de partage pourrait être définie à travers un protocole P_i pour l'agent i sous la forme suivante :

case of
  if $App_i\phi \wedge Theme(\phi, \text{Th1})$ **do** $\texttt{Diffuser}_i(j, \phi)$
  if $App_i\phi \wedge Theme(\phi, \text{Th2})$ **do** $\texttt{Diffuser}_i(j, \phi) \vee \Lambda$
  if $App_i\phi \wedge Theme(\phi, \text{Th3})$ **do** Λ
end case

Ici, App_i dénote un opérateur d'apprentissage dont la sémantique peut être une des deux proposées dans la section 6.2.

Ainsi, à un instant donné, si l'agent i apprend ϕ et que le thème associé à ϕ est Th1, alors i doit diffuser ϕ à l'agent j (**Obligation**). Si le thème de ϕ est Th2, alors i peut soit diffuser ϕ à l'agent j soit ne rien faire (**Permission**). Enfin, si le thème est Th3, alors i doit ne rien faire (**Interdiction**).

Dans cet exemple, Th1, Th2 et Th3 regroupent les thèmes qui correspondent à des obligations, permissions ou interdictions respectivement, de diffusion de l'information ϕ pour l'agent i vers j.

7 Conclusion et perspectives pour les travaux futurs

Nous avons proposé dans ce travail de baser la formalisation de l'analyse de situation dans le cadre d'une coalition sur la sémantique des systèmes interprétés. Nous pensons que ce cadre général hybride possède des caractéristiques intéressantes qui permettent de représenter formellement les tâches d'*analyse de situation* menant à l'éveil situationnel d'un groupe d'agents d'une part, ainsi que le processus de *planification* de la mission d'autre part.

Dans ce cadre, la situation n'est pas définie comme un état mais plutôt comme un système de transitions d'états généré par l'exécution d'un protocole conjoint des membres de la coalition dans un contexte donné. L'éveil situationnel d'un groupe d'agents est défini en terme de capacité de calcul de ce groupe d'agents. L'analyse de situation est définie comme la procédure de décision visant à établir ou réfuter la validité de certaines propriétés exprimées à l'aide de formules du langage. Ainsi, en vérifiant le modèle de coalition construit par l'exécution de P dans le contexte γ, on sera en particulier en mesure de savoir si la coalition est **capable** ou non d'accomplir la mission qui lui a été confiée. D'une manière générale, n'importe quelle autre propriété d'intérêt pourra être vérifiée, telle que "Est-ce que les agents 1 et 2 sauront tous les deux que l'ennemi se dirige vers eux ?", "Est-ce que l'agent 3 connaîtra le lieu du crash avant l'instant t ?", etc.

Le langage des systèmes interprétés est très proche de celui du calcul des situations utilisé pour la base de la formalisation du modèle de coalition lors de travaux précédents. Ce sujet a fait l'objet d'une comparaison plus approfondie dans [1]. La conclusion de cette comparaison est que la sémantique des systèmes interprétés est plus générale que le calcul des situations. Les principaux avantages pour étendre le calcul des situations aux systèmes interprétés sont en particulier :

- la prise en compte des actions concurrentes ;
- l'intégration explicite du temps dans le modèle.

Les agents de la coalition sont caractérisés par leur protocole (ou stratégie), qui leur dicte leur manière d'agir selon l'information à laquelle ils ont accès. Les actions qu'ils peuvent commettre ont été qualifiées d'*externes* ou *internes* selon qu'elles modifient l'état propre de l'agent qui la commet ou l'état d'un autre agent. D'autre part, ces actions ont été aussi qualifiées d'*épistémiques* ou *ontologiques* selon qu'elles modifient ou non l'état épistémique d'un agent. Cette distinction permet d'une part de définir la granularité avec laquelle on veut étudier la coalition, et d'autre part de créer un lien trivial avec les tâches de planification qui s'occupent surtout d'actions ontologiques,

ne mettant pas ou peu d'intérêt sur les états épistémiques des agents. Notre approche permet de concilier les deux aspects.

Afin de représenter adéquatement la croyance et tenir ainsi compte de l'incertitude, le modèle a été enrichi en incluant des fonctions de croyance. Cette approche quantifiée de représentation de l'incertitude permet en particulier de gérer les conflits entre deux informations.

La notion d'apprentissage introduite dans les travaux précédents comme condition nécessaire aux échanges d'information a été raffinée selon deux approches : (1) en distinguant ce qui vient d'être appris de ce qui l'avait été aux instants passés, et (2) en autorisant une certaine incertitude quant à l'information apprise.

Sur la base de la politique d'échange d'information définie dans [16], nous avons défini un protocole d'échange d'information dictant quelles informations doivent être envoyées et à qui selon les diverses règles d'échange en information des différents membres de la coalition. Cet exercice a eu simplement pour but de démontrer la compatibilité entre les cadres théoriques du calcul des situations d'une part (dans lequel a été défini la politique de partage) et des systèmes interprétés d'autre part (choisi pour l'analyse de situation).

L'approche générale d'analyse de la coalition décrite dans ce document repose sur une technique de vérification de propriétés épistémiques et temporelles du modèle de coalition construit. Les propriétés s'expriment à l'aide de formules des logiques temporelles LTL (*Linear Temporal Logic*) ou CTL (*Computation Tree Logic*) combinées avec les opérateurs épistémiques de connaissance. Dans [48], la pertinence de l'information est basée sur la notion de temps utile exprimée dans la logique LTL. Ainsi, avec le modèle proposé il est donc aussi possible de vérifier la pertinence d'une information, si celle-ci est caractérisée par le temps utile.

Travaux futurs

Les stratégies auxquelles on fait référence dans ce travail peuvent tout aussi bien impliquer des actions physiques (amener des vivres, sécuriser une zone, évacuer la population, etc.) que des actions épistémiques, en particulier d'échange d'information (envoyer message m à l'agent i, etc) ou de raisonnement. Ainsi, on peut connaître d'une part l'éveil situationnel des différents agents, de façon individuelle ou conjointe, en posant des requêtes du type "est-ce que le groupe d'agents G connaît la position de l'ennemi de façon distribuée ?", "un seul le sait ?", "tous la connaissent ?", "ont-ils la connaissance commune ?". D'autre part, on peut analyser l'efficacité du processus de partage d'information au sein de la coalition, représenté par P. Afin de quantifier ou qualifier cette efficacité, des mesures ou facteurs de performance doivent être définis.

Dans de futurs travaux, nous envisageons de définir des méthodes qui permettront à un organe de commandement (1) d'apprécier une coalition vis-à-vis de sa mission et de l'environnement associé, (2) de comparer plusieurs coalitions envisagées pour une mission donnée, (3) ou encore de modifier certains attributs caractéristiques d'une coalition ou de sa mission, afin de la rendre plus efficace.

Page laissée en blanc à dessein.

Références

[1] Jousselme, A.-L., Maupin, P., Garion, C., Cholvy, L., et Saurel, C. (2007), Situation awareness and ability in coalitions, Dans *Proceedings of the 10th International Conference on Information Fusion*, Quebec City, Canada.

[2] Maupin, P., Jousselme, A.-L., Wehn, H., Mitrovic-Minic, S., et Happe, J. (2010), A Situation Analysis Toolbox : Application to Coastal and Offshore Surveillance, Dans *Proceedings of the 13th International conference on Information Fusion*, Edinburgh, Scotland.

[3] Maupin, P., Jousselme, A.-L., Saurel, C., et Poitou, O. (2010), Situation Analysis and Performance Measurement : Application to Personnel Recovery, Dans *Proceedings of the 13th International conference on Information Fusion*, Edinburgh, Scotland.

[4] Steinberg, A. N. et Bowman, C. L. (2001), Revisions to the JDL data fusion model, Dans Hall, D. L. et Llinas, J., (Eds.), *Handbook of Multisensor Data Fusion*, The Electrical Engineering and Applied Signal Processing Series, Ch. 2, pp. 2–1 to 2–19, Boca Raton : CRC Press.

[5] Endsley, M. R. (1995), Toward a theory of situation awareness in dynamic systems, *Human Factors*, 37(1), 65–84.

[6] Endsley, M. R. (2000), Theoretical Underpinnings of Situation Awareness : A Critical Review, Dans Endsley, M. R. et Garland, D. J., (Eds.), *Situation Awarness Analysis and Measurement*, Ch. 1, pp. 3–32, Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.

[7] Fagin, R., Halpern, J. Y., Moses, Y., et Vardi, M. Y. (2003), Reasoning about knowledge, Cambridge, MA : The MIT Press.

[8] Halpern, J. Y. et Moses, Y. (1990), Knowledge and Common Knowledge in a Distributed Environment, *Journal of the Association for Computing Machinery*, 37(3), 549–587.

[9] Irandoust, H. et Benaskeur, A. R. (2009), Coalitions, (Technical Report TM 2008-304) Defence R&D Canada - Valcartier.

[10] Cholvy, L., Garion, C., et Saurel, C. (2004), Formalisation de la notion de coalition : état de l'art et ébauche d'un modèle de coalition, (Technical Report AS23/FR/290704) ONERA/DTIM/MIB, Centre de Toulouse.

[11] Cholvy, L., Garion, C., et Saurel, C. (2004), Décision collaborative dans le cadre d'une coalition - Poste 1 : Notion de coalition (Rapport d'avancement),

(Technical Report AS23/FR/291004) ONERA/DTIM/MIB, Centre de Toulouse.

[12] Cholvy, L., Garion, C., et Saurel, C. (2005), Formalisation d'une coalition : modèle de coalition, (Technical Report AS23/FR/270205) ONERA/DTIM/MIB, Centre de Toulouse.

[13] Cholvy, L., Foisseau, J., Garion, C., et Saurel, C. (2005), Méthodologie pour modéliser les échanges d'informations dans une coalition et leur réalisation, (Technical Report AS23/FR/280205) ONERA/DTIM/MIB, Centre de Toulouse.

[14] Cholvy, L., Garion, C., Saurel, C., et Allouche, M. (2006), Synthèse des travaux effectués dans le poste 1 des travaux relatifs à l'A.S. 23 franco-canadien *Décision collaborative dans le cadre d'une coalition*, Technical Report ONERA/DTIM/MIB, Centre de Toulouse et RDDC-Valcartier.

[15] Cholvy, L., Garion, C., et Saurel, C. (2005), Prise en compte de la situation dans le cadre d'une coalition : Partageabilité des informations et étude d'une sémantique commune, (Technical Report AS23/FR/291005) ONERA/DTIM/MIB, Centre de Toulouse.

[16] Cholvy, L., Garion, C., et Saurel, C. (2005), Politiques de partage dans une coalition, (Technical Report AS23/FR/290405) ONERA/DTIM/MIB, Centre de Toulouse.

[17] Kokar, M. M., Tomasik, J. A., et Weyman, J. (2004), Formalizing Classes of Information Fusion Systems, *Information Fusion*, 5(3), 189–202.

[18] Lambert, D. (2003), Grand challenges of information fusion, Dans *Proceedings of the 6th International Conference on Information Fusion*, Cairns, Australia.

[19] Steinberg, A. N. (2005), An Approach to Threat Assessment, Dans *Proceedings of the eight international conference on Information fusion*, Philadelphia, PA.

[20] Maupin, P. et Jousselme, A.-L. (2005), A General Algebraic Framework for Situation Analysis, Dans *Proceedings of the 8th International Conference on Information Fusion*, Philadelphia, PA, USA.

[21] Bratman, M. E. (1987), Intentions, Plans, and Practical Reasons, Cambridge, MA : Harvard University Press.

[22] Rao, A. S. et Georgeff, M. P. (1991), Modeling Rational Agents within a BDI-Architecture, Dans Allen, J., Fikes, R., et Sandewall, E., (Eds.), *Proceedings of the Second International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning, KR91*, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA,.

[23] Rao, A. S. et Georgeff, M. P. (1995), BDI agents : From theory to practice, Dans *Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems*, pp. 312–319, San Francisco.

[24] Emerson, E. A. et Halpern, J. Y. (1986), "Sometimes" and "not never" revisited : On branching time versus linear time temporal logic, *Journal of the ACM*, 33(1), 151–178.

[25] Maupin, P. et Jousselme, A.-L. (2007), Interpreted systems for situation analysis, Dans *Proceedings of the 10th International Conference on Information Fusion*, Quebec City, Canada.

[26] Bacchus, F., Halpern, J., et Levesque, H. (1999), Reasoning about noisy sensors and effectors in the situation calculus, *Artificial Intelligence*, 111(1-2), 171 – 208.

[27] Alur, R., Henzinger, T. A., et Kupferman, O. (2002), Alternating-time Temporal Logic, *Journal of ACM*, 49(5), 672–713.

[28] van der Hoek, W. et Wooldridge, M. (2003), Cooperation, Knowledge, and Time : Alternating-time Temporal Epistemic Logic and its Applications, *Studia Logica*, 75, 125–157.

[29] Wooldridge, M. et van der Hoek, W. (2005), On obligations and normative ability : Towards a logical analysis of the social contract, *Journal of Applied Logic 3 (2005)*, 3, 396–420.

[30] McCarthy, J. et Hayes, P. (1969), Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence, Dans Michie, D., (Ed.), *Machine Intelligence*, Vol. 4, pp. 463–502, American Elsevier.

[31] Maupin, P. et Jousselme, A.-L. (2007), Situation Analysis and Fusion Concepts for a RAP Compilation, Dans *Presentation to the Joint Information and Intelligence Fusion Capability (JIIFC) Project committee*, DRDC-Valcartier.

[32] Halpern, J. Y. (2003), Reasoning about Uncertainty, Cambridge, MA : The MIT Press.

[33] Scherl, R. B. (2003), Reasoning about the interaction of knowledge, time and concurrent actions in the situation calculus, Dans *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-03)*, pp. 1091–1096, Acapulco, Mexico.

[34] Paradis, S. et Roy, J. (2000), An Architecture and a Facility for the Integration of All Levels of Data Fusion, Dans *the Third International Conference on Information Fusion*, Paris, France.

[35] Roy, J. (2001), From Data Fusion to Situation Analysis, Dans *Proceedings of the 4^{th} International Conference on Information Fusion*, Vol. II, pp. ThC2–3 – ThC2–10, Montreal, Canada.

[36] Pew, R. W. (2000), The State of Situation Awareness Measurement ; Heading Toward the Next Century, Dans Endsley, M. et Garland, D., (Eds.), *Situation Awareness Analysis and Measurement*, pp. 33–50, Mahwah, New Jersey : Lawrence, Erlbaum Associates.

[37] Pucella, R. (2004), Reasoning about Resource-Bounded Knowledge - Theory and Application to Security Protocol Analysis, Phd thesis, Faculty of the Graduate School of Cornell University.

[38] Halpern, J. Y., Moses, Y., et Vardi, M. Y. (1994), Algorithmic knowledge, Dans *Proc. of the 5th Conference on Theoretical Aspects of Reasoning about Knowledge (TARK'94)*, pp. 255–266, Morgan Kaufmann.

[39] Jousselme, A.-L. et Maupin, P. (2006), Nouvelle perception de la situation (Rapport d'avancement), (Technical Report AS23/CA/160106) RDDC-Valcartier.

[40] Irandoust, H. (2006), Décision collaborative dans le cadre d'une coalition - Poste III : Concepts de décision collaborative, (Technical Report AS23/CA/300806) RDDC Valcartier.

[41] Lorini, E. et Castelfranchi, C. (2004), The role of epistemic actions in expectations, Dans *Proceedings of the Second Workshop of Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems (ABIALS)*, Los Angeles, CA, USA.

[42] Jousselme, A.-L. et Maupin, P. (2007), Réalisation d'un démonstrateur et définition du scénario - Rendez-vous et évasion dans North-Atlantis, (Technical Report AS23/CA/310307) RDDC-Valcartier.

[43] Friedman, N. et Halpern, J. Y. (1995), Plausibility Measures : A User's Guide, Dans *Proceedings of the Eleventh Conference on Uncertainty in AI*, pp. 175–184.

[44] Shafer, G. (1976), A Mathematical Theory of Evidence, Princeton University Press.

[45] Zadeh, L. A. (1978), Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility, *Fuzzy Sets and Systems*, 1, 3–28.

[46] Spohn, W. (1988), Ordinal conditional functions : A dynamic theory of epistemic states, Dans Harper, W. et Skyrms, B., (Eds.), *Causation in Decision, Belief Change and Statistics*, Vol. 2, pp. 105–134, Dordrecht, Netherlands : Reidel.

[47] Friedman, N. et Halpern, J. Y. (1997), Modeling Belief in Dynamic Systems. Part I : Foundations, *Artificial Intelligence*, 95(2), 257–316.

[48] Cholvy, L., Garion, C., et Saurel, C. (2006), Pertinence des informations, Technical Report ONERA/DTIM/MIB, Centre de Toulouse.

[49] Friedman, N. et Halpern, J. Y. (1999), Belief revision : A critique, *Journal of Logic, Language and Information*, 8(4), 401–420.

[50] MARADMIN (2006), Marine Corps Net-centric Data Strategy and the Joint Consultation Command and Control Exchange Data Model (JC3IEDM). http ://www.mip-site.org. 471/06.

[51] Meyer, J. J. C. (2001), Epistemic Logic, Dans Gobble, L., (Ed.), *The Blackwell Guide to Philosophical Logic*, Blackwell Philosophy Guides, pp. 183–202, Oxford, UK : Blackwell Publishers.

[52] Halpern, J. Y. et Moses, Y. (1992), A guide to completeness and complexity for modal logics of knowledge and belief, *Artificial Intelligence*, 54, 311–379.

[53] Halpern, J. Y. et Fagin, R. (1989), Modeling knowledge and actions in distributed systems, *Distributed computing*, 3(3), 159–177.

[54] Halpern, J. Y. et Zuck, L. D. (1992), A Little Knowledge Goes a Long Way : Knowledge-based derivations and correctness proofs for a familiy of protocols, *Journal of the ACM*, 39(2), 449–478.

[55] Moses, Y. et Kislev, O. (1993), Knowledge-Oriented Programming, Dans *12th ACM Symposium on Principles on Distributed Computing*, pp. 261–270, Ithaca, NY, USA.

[56] Dunin-Keplicz, B. et Verbrugge, R. (2005), Creating Common Beliefs in Rescue Situations, Series Advances in Soft Computing, Ch. Monitoring, Security and Rescue Techniques in Multiagent Systems, pp. 69–84, Springer, Berlin.

[57] Klir, G. J. et Yuan, B. (1995), Fuzzy Sets and Fuzzy Logic : Theory and Applications, Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall International.

Page laissée en blanc à dessein.

Annexe A : Représentation d'états épistémiques

Comme nous l'avons détaillé au chapitre 3, le principal objectif de l'analyse de situation dans le cas distribué d'une coalition est de vérifier si un état épistémique de groupe nécessaire pour accomplir la mission pourra être atteint, étant donné un certain contexte.

Dans un premier temps, nous donnons la définition de la connaissance dans la sémantique des systèmes interprétés, mais aussi celle de la croyance qui peut se révéler plus utile en pratique, étant un concept moins exigeant. Une fois ces états épistémiques définis de façon individuelle, nous étendons les définitions à des notions de connaissance (ou de croyance) de groupe d'agents, concepts sur lesquels s'appuie la définition d'éveil situationnel (définition 3.2).

A.1 Connaissance et croyance

Les notions définies ici reposent sur celles des logiques épistémiques basées sur la sémantique des mondes possibles. Ainsi, étant donné un ensemble S d'états possibles et un groupe d'agents $\mathcal{A}$ (dont fait partie l'environnement), la *connaissance* pour un agent i est représentée par une relation binaire R_i sur S où $\mathsf{R}_i(s, s')$ signifie que les deux états s et s' sont équivalents pour i. R_i est donc une relation d'équivalence et l'agent i, alors que le système est dans l'état s considère l'état s' équivalent à s si et seulement si $s \sim_i s'$ ou encore $\mathsf{R}_i(s', s)$. On note alors $\mathsf{R}_i(s)$ la classe d'équivalence de l'état s pour l'agent i :

$$\mathsf{R}_i(s) = \{s' \in S | s \sim_i s'\} \tag{A.1}$$

On obtient alors les définitions standard pour la connaissance et son dual la possibilité :

- La proposition ϕ est **connue** par l'agent i alors qu'il se trouve dans l'état s ssi ϕ est vraie dans tous les états équivalents à s pour l'agent i :

  $$\mathsf{R}_i(s) \subseteq ||\phi||$$

  où $||\phi||$ est le sous-ensemble des états de S dans lesquels ϕ est vraie.

- La proposition ϕ est **possible** pour l'agent i dans s ssi ϕ est vraie dans au moins un des états équivalents à s pour l'agent i :

  $$||\phi|| \cap \mathsf{R}_i(s) \neq \varnothing$$

A.1.1 Système d'axiomes

L'opérateur de connaissance K_i pour l'agent a été défini à la sous-section 2.2.1. Le graphe défini par le système interprété $\mathcal{I}$ correspond au système $S5_n$ de logique modale pour n agents. Ainsi, pour tout $i \in \mathcal{A}$, K_i satisfait les axiomes suivants :

(K1) **Axiome de connaissance** - l'agent i ne connaît que des propositions vraies :

$$K_i\phi \rightarrow \phi$$

(K2) **Axiome de distribution** - si l'agent i sait que ϕ implique ψ, alors s'il sait que ϕ il sait aussi que ψ :

$$K_i(\phi \rightarrow \psi) \rightarrow (K_i\phi \rightarrow K_i\psi)$$

(K3) **Axiome d'introspection positive** - si l'agent i connaît ϕ, alors il sait qu'il connaît ϕ :

$$K_i\phi \rightarrow K_iK_i\phi$$

(K4) **Axiome d'introspection négative** - si l'agent i ne connaît pas ϕ, alors il sait qu'il ne connaît pas ϕ :

$$\neg K_i\phi \rightarrow K_i\neg K_i\phi$$

Même si les axiomes (K3) et (K4) ont l'air complémentaires, ça n'est pas nécessairement le cas en pratique. En effet, pour des agents humains, l'axiome (K4) n'est souvent pas pertinent, puisqu'on ne peut pas être au courant qu'on ne connaît pas quelque chose [51]. Par contre, pour des agents artificiels travaillant sur des domaines finis, cet axiome semble raisonnable. Ainsi, si on considère un ensemble fini de propositions primitives Var_K et un ensemble fini de formules qu'un agent artificiel connaît, l'axiome (K4) peut être reformulé de la manière suivante : Si un agent ne connaît pas une formule, alors celle-ci ne peut être déduite de l'information dont il dispose, ce que l'agent est capable de détecter. Par conséquent, il sait qu'il ne connaît pas cette formule [51]. Cette discussion pose le problème de la connexion entre la capacité de connaissance (ou d'éveil situationnel) et les domaines de définitions finis, un problème qui pourra être développé dans la suite du travail et lié au contexte d'ouverture.

A.1.2 Croyance

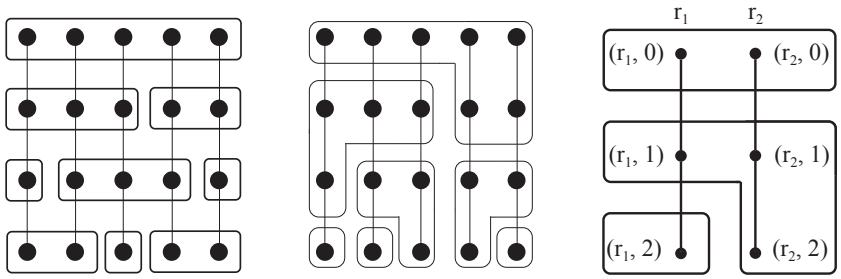
L'axiome (K1) (souvent appelé axiome (T)) est celui qui distingue la connaissance de la croyance. En effet, alors qu'on ne peut connaître que des propositions vraies, il est possible de croire des propositions fausses. On obtient donc le système d'axiomes correspondant à la croyance pour n agents, $KD45_n$ en éliminant l'axiome (K1) et, par conséquent, en rendant les relations R_i transitives, euclidiennes et sérielles.

L'opérateur épistémique correspondant sera noté B_i pour des raisons de clarté, signifiant "L'agent i croit que ϕ".

Le fait de pouvoir croire des propositions fausses, alors qu'il est impossible de connaître des propositions fausses ouvre des simplifications notables en pratique. Par exemple, alors que la connaissance commune est souvent impossible à atteindre, la croyance commune pourra plus facilement être atteinte dans les mêmes conditions.

A.1.3 Illustrations

Sur les figures A.1 ci-dessous, plusieurs systèmes sont représentés. Les points du système sont les points noirs et les exécutions se lisent de haut en bas. Ainsi, sur les figures A.1(a) et A.1(b), cinq exécutions sont donc représentées pour quatre



(a) Système synchrone avec rappel parfait

(b) Système asynchrone avec rappel parfait

(c) Autre représentation d'un système asynchrone avec rappel parfait

Figure A.1 : *Représentation de la connaissance dans des systèmes synchrones ou asynchrones (adaptés de [7])*

La figure A.1(a) représente le cas d'un système synchrone. À l'instant 0, l'agent ne peut distinguer les cinq états possibles. À l'instant 1, il est capable de les séparer en deux groupes, puis en trois à l'instant 3 et encore en trois autres groupes différents à l'instant 4. Cette partition sur l'ensemble des points représente la connaissance de l'agent et son évolution au cours du temps.

La figure A.1(b) représente le cas d'un système asynchrone. L'agent n'est pas capable de distinguer les états du système à l'instant 0 de certains à l'instant 1, et ainsi de suite. Il n'a donc pas accès à l'horloge selon laquelle évolue le système.

Enfin, la figure A.1(c) est une autre représentation d'un système asynchrone avec rappel parfait où les nœuds sont étiquetés.

A.1.4 Connaissance de groupe

Soit G un groupe d'agents, $G \subseteq \mathcal{A}\backslash e$, où l'environnement est exclu. On définit alors [8, 52] :

1. **Connaissance distribuée** - "Le groupe G a la connaissance distribuée de ϕ" :

$$D_G\phi = \bigwedge_{i \in G, \psi} K_i\psi \vDash \phi \tag{A.2}$$

2. **Quelqu'un connaît** - "Au moins un membre du groupe G connaît ϕ" :

$$S_G\phi = \bigvee_{i \in G} K_i\phi \tag{A.3}$$

3. **Tout le monde connaît** - "Tous les membres du groupe G connaissent ϕ" :

$$E_G\phi = \bigwedge_{i \in G} K_i\phi \tag{A.4}$$

4. **Connaissance commune** - "Le groupe G a la connaissance commune de ϕ" :

$$C_G\phi = E_G\phi \wedge E_G^2\phi \wedge E_G^3\phi \ldots \tag{A.5}$$

   où $E_G^{k+1}\phi = E_G E_G^k \phi$

La vérité pour les formules D_G, $E_G\phi$ et $C_G\phi$ à un point donné de $\mathcal{I}$ est donc définie par :

- $(\mathcal{I}, r, m) \vDash D_G\phi$ ssi $(\mathcal{I}, r', m') \vDash K_i\phi$ pour tout (r', m') de $\mathcal{R}$ tel que $(r', m') \sim_i (r, m)$
- $(\mathcal{I}, r, m) \vDash E_G\phi$ ssi $(\mathcal{I}, r, m) \vDash K_i\phi$ pour tout $i \in G$
- $(\mathcal{I}, r, m) \vDash C_G\phi$ ssi $(\mathcal{I}, r, m) \vDash E_G^k\phi$ pour tout $k > 0$, où $E_G^k\phi = E_G E_G^{k-1}\phi$

De manière équivalente on définit les opérateurs de croyance de groupe.

A.2 Protocoles à base de connaissance

La notion de protocole présentée à la section 2.2.1 est très générale et permet d'implémenter n'importe quel type d'algorithme. Un protocole standard est de la forme :

If ϕ **do** α **else do** β

Ceci correspond aux actions complexes définies dans les travaux précédents. Pour décider quelle action exécuter de α ou β, l'agent doit évaluer la formule ϕ. Si ϕ est vraie, alors il réalise α, sinon il réalise β. Cependant de nombreuses actions nécessitent pas seulement que ϕ soit vraie ou fausse, mais surtout que l'agent **connaisse** sa valeur de vérité, comme l'illustre l'exemple suivant [9].

Les portes du Paradis

> Un homme arrive devant les portes du Paradis où il fait face à deux portes, chacune avec son gardien. L'un ment toujours et l'autre dit toujours la vérité. Le problème pour l'homme face aux deux gardiens est de déterminer qui est le Menteur (ou le Diseur de vérité) afin de rentrer au Paradis. Pour cela, il pose différentes questions aux gardiens. Aux questions de la forme "Est-ce que ϕ est vraie" le Menteur répond "Oui" si ϕ est fausse, et "Non" si ϕ est vraie, et le Diseur de vérité répond "Oui" si ϕ est vraie, et "Non" si ϕ est fausse.

En fait, pour répondre à la question que pose l'homme à propos de ϕ, les gardiens doivent savoir si ϕ est vraie ou non. Par conséquent, nous devons modifier les règles et dire qu'aux questions de la forme "Est-ce que ϕ est vraie" le Menteur répond "Oui" s'il **sait** que ϕ est fausse, "Non" s'il **sait** que ϕ est vraie, et "Je ne sais pas" s'il ne sait pas si ϕ est vraie ou fausse (le contraire pour le Diseur de vérité).

Ainsi, avec cette interprétation, les deux gardiens exécutent des protocoles effectuant des tests explicites sur la connaissance. Le protocole pour le Menteur serait donc du type :

if $K_M\phi$ **do**
  "`Non`"
else if $\neg K_M\phi$ **do**
  "`Oui`"
else
  "`Je ne sais pas`"
end if

où $K_M\phi$ signifie que le Menteur sait que ϕ est vraie.

Ce protocole est différent d'un protocole standard dans le sens où la valeur de vérité du test $K_M\phi$ ne dépend pas seulement de l'état local du Menteur, mais aussi de la valeur de vérité de ϕ dans tous les états équivalents pour cet agent (d'après la définition de la connaissance).

9. La discussion qui suit est tirée essentiellement de [53].

Pour être capable d'évaluer ces tests sur la connaissance, un système interprété est nécessaire dans lequel la notion de connaissance sera définie. Dans un système interprété $\mathcal{I} = (\mathcal{R}, \pi)$, le protocole du Menteur s'exprimera donc :

$$P_M(l_M, \mathcal{I}) = \begin{cases} \text{dire “}\texttt{Non}\text{”} & \text{si } (\mathcal{I}, r, m) \vDash \phi, \forall (r, m); r_M(m) = l_M \\ \text{dire “}\texttt{Oui}\text{”} & \text{si } (\mathcal{I}, r, m) \vDash \neg\phi, \forall (r, m); r_M(m) = l_M \\ \text{dire “}\texttt{Je ne sais pas}\text{”} & \text{sinon.} \end{cases}$$

où l_M est l'état local du Menteur. Ainsi, lors de l'exécution r, si à l'instant m où la question est posée ϕ est vraie à tous les points (r, m) tels que le Menteur soit dans le même état local l_M, alors il doit dire “`Non`”.

Notons que la seule différence entre un protocole standard et un protocole à base de connaissance est que ce dernier nécessite un système interprété comme entrée. Une fois que le système interprété est fixé, le protocole à base de connaissance revient à un protocole standard.

Un protocole à base de connaissance est donc plus général qu'un protocole standard, et pour le besoin de l'analyse de situation et du problème d'exécution d'une mission dans le cadre d'une coalition, nous considérons que les agents n'exécutent que des protocoles à base de connaissance. En d'autres mots, le choix des actions qu'ils effectuent dépend de leur connaissance.

Dans le cas de protocoles basés sur la connaissance, l'action conjointe $\mathbf{a}$, plutôt que d'appartenir à $P_1(l_1) \times \ldots P_n(l_n) \times P_e(l_e)$ où $P_i(l_i)$ est l'ensemble des actions de ACT_i possiblement accomplies par l'agent i, appartiendra à $P_1(l_1, \mathcal{I}) \times \ldots P_n(l_n, \mathcal{I}) \times P_e(l_e, \mathcal{I})$ où $\mathcal{I}$ est un système interprété.

Les programmes à base de connaissance peuvent être utilisés pour traduire un protocole d'un contexte à l'autre. Cette tâche de traduction est réalisée en identifiant un programme à base de connaissance permettant de décrire à haut niveau un programme standard et en implémentant ce programme à base de connaissance dans le nouveau contexte. Halpern et Zuck [54] ont démontré la généralité de cette approche en soulignant la correspondance entre un ensemble de programmes standard bien connus utilisés pour résoudre un même problème dans différents contextes, avec un seul et même programme à base de connaissance. On dira que la connaissance d'un agent à un point donné du système dépend de son état local et de tous les points du système pour lesquels cet agent est dans le même état. Une fois qu'un système est donné, le programme à base de connaissance se réduit à un programme standard.

A.3 Actions orientées par la connaissance

On distingue en général deux aspects principaux des protocoles, le contrôle (lien entre le test et l'action) et le type d'actions que le protocole permet de réaliser. Le protocole

décrit donc la manière dont l'agent sélectionne les actions à accomplir. Selon Moses et Kislev [55] les protocoles devraient contenir des actions de haut niveau dont les conséquences sont spécifiées en termes d'état de connaissance qu'elles sont censées induire sur des agents individuels ou des groupes d'agents participant au système. C'est ce qu'on appelle des *actions orientées par la connaissance*.

Dans le cadre d'un scénario de CSAR certains types d'actions orientées par la connaissance ont une importance particulière. Il s'agit par exemple des actions de type notify. Ainsi $\mathsf{notify}_i(j, \varphi)$ réalisée par l'agent i signifie que l'agent i fait en sorte que l'agent j **sache** que φ est le cas. Pour un système dans lequel les messages sont reçus instantanément et doté d'un médium de communication fiable, cette action de notification revient à un simple $\mathsf{send}_i(j, \varphi)$. Par contre pour des systèmes asynchrones ou à médium de communication non fiable, les choses se corsent. Dans le cadre des opérations de CSAR les actions orientées par la connaissance de type notify que nous allons étudier serviront par exemple à modéliser les processus de notification déclenchant le processus de recherche et sauvetage, conditionnellement à une analyse de situation et des états de connaissance spécifiés dans les protocoles.

A.4 Partage de la connaissance et des croyances dans une coalition

À présent que les définitions de connaissance de groupe ont été posées, tout le défi repose sur **comment** atteindre l'éveil situationnel. Si on se place dans un contexte distribué où aucun centre de fusion n'existe, alors tout repose sur la **communication** entre agents. La communication passe donc par un réseau qui pourra être construit selon différentes contraintes telles que :

- des relations de proximité qui dépendent de la portée des moyens de communication dont disposent les agents ;
- la hiérarchie entre agents ;
- les règles déontiques issues des doctrines ;
- ...

Indépendamment du réseau de communication, le principal paramètre pouvant affecter la communication est la non-fiabilité du canal de communication. En effet, transmettre un message ne garantit en aucune manière que celui-ci se rendra à son destinataire. D'une manière générale, le canal de communication peut être modélisé par l'environnement et son protocole par une distribution de probabilité décrivant la perte des messages. Cette distribution peut être simplement uniforme et signifier

qu'un message sur 10 est perdu, ou encore dépendre de la distance entre les communicateurs, ...

Une contrainte qu'on peut vouloir satisfaire lors de la communication entre agents est celle de communication **minimale**. Et ce, pour plusieurs raisons :

- le temps limité pour l'action (plus la communication est longue, plus le temps restant pour agir est court) ;
- minimisation de l'énergie utilisée (économie des ressources) ;
- interception des messages par l'ennemi ;
- ...

A.4.1 Communication implicite

On peut distinguer la communication implicite et la communication explicite. L'une est possible et l'autre pas selon que le système est à temps synchrone et l'autre asynchrone, et surtout selon le type de connaissance (commune, distribuée, ...). La communication implicite, c'est le cas par exemple où un agent dit "Si je t'ai pas appelé à midi, c'est qu'il s'est passé quelque chose". Alors à midi une, si l'agent n'a pas appelé, on sait quelque chose de plus. La condition, c'est que chacun ait une montre synchronisée et que chacun sache que l'autre a une montre. La notification d'événement dans une opération CSAR repose sur un concept équivalent : On sait que tel appareil est en difficulté parce qu'il n'a pas communiqué.

A.4.2 Annonces publiques

Une des techniques les plus simples de communication entre agents est l'*annonce publique*. Par ce moyen, un agent informe simultanément tous les autres agents d'un fait ϕ. Si la source est parfaitement fiable et que les agents connaissent cette fiabilité, alors après l'annonce publique ils sauront tous ϕ. L'état épistémique atteint sera celui de "Tout le monde connaît ϕ" à l'intérieur du groupe d'agents G, $E_G\phi$.

L'exemple suivant montre comment une communication d'information basée sur des annonces publiques peut permettre à des agents intelligents considérés comme de parfaits raisonneurs de tirer des conclusions et d'agir, au moins de manière individuelle.

Les maris infidèles

> Il a toujours été de connaissance commune parmi les femmes de Mamajorca (qui sont toutes de parfaites raisonneuses), que leurs reines disent toujours la vérité et que les femmes obéissent aux reines. C'est aussi de

connaissance commune que toutes les femmes entendent tous les coups de feu tirés sur Mamajorca. La reine Henriette I se réveilla un matin avec la ferme résolution de se débarrasser du problème des maris infidèles à Mamajorca. Elle réunit toutes les femmes mariées, soit 40, sur la place commune et leur lut ce texte :

> "Il y a au moins un mari infidèle dans notre communauté. Bien qu'aucune de vous ne savait ceci avant d'avoir vérifié si votre mari est infidèle ou non, chacune de vous sait cependant lequel des maris des autres femmes sont infidèles. Je vous interdis de discuter de la fidélité de votre propre mari avec qui que ce soit. Cependant, vous devez découvrir si votre mari est infidèle, et vous devez le tuer la nuit suivant le jour de votre découverte."

Après trente-neuf nuits silencieuses, des coups de feu ont été entendu à Mamajorca la $40^{\text{ème}}$ nuit.

Appelons k le nombre de maris infidèles. Supposons qu'il y ait un seul mari infidèle $k = 1$. Sa femme, connaissant la fidélité des autres maris, aurait tout de suite su qu'il s'agissait de son mari et l'aurait tué dans la nuit, donc la première nuit.

Supposons à présent qu'il y ait $k + 1$ maris infidèles. Leurs femmes connaissent donc chacune k maris infidèles. Lorsqu'aucun coup de feu n'a été entendu la $k^{\text{ème}}$ nuit, elles se rendent compte qu'il ne pouvait pas y avoir seulement k maris infidèles, auquel cas ils auraient été tués cette nuit-là. Donc, chaque femme de mari infidèle apprend qu'il y en a $k+1$, donc que son mari est infidèle et, par conséquent, elles tuent toutes leur mari la $(k + 1)^{\text{ème}}$ nuit. Elles n'auraient pas pu déduire ceci plus tôt, car elles n'auraient pas pu distinguer la situation actuelle de celle où il y avait effectivement k maris infidèles.

Le protocole basé sur la connaissance auquel obéit chacune des 40 femmes i est du type :

Pour tous les jours $k = 1, 2, \ldots$
if $K_i\phi$ **do**
  `Le tuer la nuit suivante`
else
  `Ne rien faire`
end if

où ϕ="`Votre mari vous trompe`".

Le fait que chaque nuit aucune femme n'entende un coup de feu leur apprend quelque chose. Même si aucune information supplémentaire n'est transmise la dernière nuit, chacune **sait** que son mari la trompe.

A.4.3 Transmission de message

Hormis les des deux types de communication précédents, le plus général est la communication par l'envoi de message entre un émetteur et un récepteur. Dans ce cas, le canal de communication joue un rôle clé. En effet, celui-ci n'est en général pas fiable comme dans une d'opération CSAR où la recherche et le sauvetage s'effectuent en zone de combat. L'ennemi peut alors intercepter les messages ou bien ceux-ci peuvent se perdre. L'exemple qui suit illustre ce problème où la connaissance commune ne peut être atteinte et les agents ne peuvent coordonner l'attaque qu'en tolérant une certaine part d'incertitude.

Attaque coordonnée

> Deux généraux $\mathcal{G}_A$ et $\mathcal{G}_B$ doivent décider d'attaquer un ennemi commun, mais pour être sûrs de vaincre, ils doivent coordonner leurs attaques, c'est-à-dire que :
>
> $$\phi_A = \text{“}\mathcal{G}_A \text{ attaque ssi } \mathcal{G}_B \text{ attaque”}$$
>
> doit être vérifiée. Malheureusement, ils ne peuvent communiquer que par des messagers qui peuvent être capturés à chaque instant par l'ennemi.

On a prouvé qu'il était impossible pour les deux généraux de coordonner une attaque dans ces conditions [7]. Cependant, si on accepte une certaine part d'incertitude, l'attaque coordonnée est possible. Plutôt que de nécessiter que la condition ϕ_A soit vraie, nous pouvons accepter ϕ_A avec une probabilité de 0.99.

Même si la connaissance commune ne peut en général pas être obtenue par communication si le canal n'est pas fiable à 100 %, on montre dans [56] qu'un état de croyance commune peut être atteint. Un moyen d'atteindre la croyance commune peut se faire par une annonce publique, crue par tous ceux l'ayant entendue. Cependant, si le canal de communication n'est pas fiable, ce qui est le cas en pratique, cette technique n'est pas valide. Les protocoles suivants peuvent alors être utilisés respectivement pour l'émetteur (S pour *Sender*) et pour le récepteur (R *Recievер)* [56] :

Protocole pour S

$i := 0$
while `true` **do**
  `read` x_i
  `send` x_i `until` $K_S K_R(x_i)$
  `send` “$K_S K_R(x_i)$” `until` $K_S K_R K_S K_R(x_i)$
  $i := i + 1$
end while

PROTOCOLE POUR R

when $K_R(x_0)$ **do** `set` $i := 0$
while `true` **do**
  `write` x_i
  `send` "$K_R(x_i)$" `until` $K_R K_S K_R(x_i)$
  `send` "$K_R K_S K_R(x_i)$" `until` $K_R(x_{i+1})$
  $i := i + 1$
end while

L'émetteur lit un bit x_i, et envoie ce bit jusqu'à ce qu'il sache que le récepteur le connaît. Ensuite, il envoie au récepteur qu'il sait que le récepteur sait que l'émetteur sait que le récepteur connaît x_i. Puis, il envoie un autre bit.

De son côté, le récepteur écrit x_i et envoie à l'émetteur qu'il connaît x_i jusqu'à ce qu'il sache que l'émetteur sache que le récepteur connaît x_i, ce qu'il transmet à l'émetteur jusqu'à ce qu'il reçoive le bit suivant.

Page laissée en blanc à dessein.

Annexe B : Prise en compte de l'incertitude

On peut envisgaer trois cadres d'application de l'incertitude :

1. l'incertitude sur les états ;
2. l'incertitude sur les actions.
3. l'incertitude sur les exécutions ;

Bien que ces trois cadres d'application de l'incertitude soient parfois liés, ce n'est pas toujours le cas. En effet, prenons l'action "`Lancer un dé`". Celle-ci est déterministe, mais son résultat est aléatoire, donc plusieurs états seront possibles à la suite de cette action. D'autre part, si on demande à un agent de choisir parmi six actions possibles "`écrire le chiffre` k" où k varie de 1 à 6, son choix nous paraît aléatoire et, par conséquent, l'est aussi l'état résultant.

L'incertitude peut apparaître sous plusieurs formes :

– L'action est déterministe et le résultat est aléatoire ;

– Le choix de l'action est aléatoire, mais le résultat est déterministe ;

– Le choix de l'action est aléatoire et le résultat est aléatoire.

Afin de pouvoir tenir compte de tous ces cas de figures dans notre modèle, on doit considérer deux types de distribution de probabilités :

1. $\mathsf{P}(i, s)$ représentant la croyance de l'agent i, lors que le système est dans l'état s, quant aux différents états possibles à la suite d'une action (déterministe ou non) :

   $$\mathsf{P}(i, s) = (S_s^i, \sigma_s^i, p_s^i)$$

   est un espace probabiliste où S_s^i est le sous-ensemble de S comprenant les états possibles pour i lors qu'il est dans s, σ_s^i est un σ-algèbre et p_s^i est la distribution de probabilités sur S_s^i telle que $p_s^i(s')$ est la croyance accordée par l'agent i au fait que l'état s' soit atteint après une action donnée alors que le système est dans l'état s.

2. $\mathsf{L}(i, s)$ représentant les choix possibles pour l'agent i lors que le système est dans l'état s, des actions possibles :

   $$\mathsf{L}(i, s) = (A_s^i, \sigma_a^i, \ell_s^i)$$

   est un espace probabiliste où A_s^i est le sous-ensemble de A comprenant les actions équivalentes pour i lors qu'il est dans s, σ_a^i est un σ-algèbre et ℓ_s^i est la distribution de probabilités sur A_s^i telle que $\ell_s^i(\mathbf{a})$ est la croyance accordée par l'agent au fait que l'action $\mathbf{a}$ soit choisie lors que le système est dans l'état s.

L'incertitude sur les transitions d'états permet de déterminer l'incertitude sur les exécutions. Par exemple, si à l'instant 0, on lance un dé et qu'on recommence cette action à l'instant 1, on aura 36 exécutions possibles avec une probabilité de $\frac{1}{6}.\frac{1}{6}$ chacune.

B.1 Théorie des ensembles

Le moyen le plus simple de représenter l'incertitude est à l'aide des outils de la théorie des ensembles. En effet, plus on envisage d'états possibles plus notre incertitude est grande par rapport à l'état que l'on cherche à identifier. La quantification de l'incertitude repose alors uniquement sur le cardinal de l'ensemble, telle que la mesure de Hartley. Le type d'incertitude auquel on fait référence dans ce cas est la *non-spécificité*. Un ensemble très spécifique est un singleton (un seul état), auquel cas l'incertitude est nulle. Les seules déclarations incertaines que nous pouvons exprimer sont du type "l'état du système fait partie de l'ensemble B", où B peut être défini par une formule de $\mathcal{L}_K$. Par exemple, si ϕ="Les vivres ont été acheminées" alors $B = (s_1, s_2, s_3)$ où dans ces trois états les vivres ont effectivement été acheminées.

Notons que la notion de connaissance introduite par une relation d'équivalence repose uniquement sur ce type d'incertitude. En effet, la connaissance d'un agent est représentée par une partition sur l'ensemble des états possibles S, où chaque classe d'équivalence est un ensemble d'états équivalents pour l'agent. Plus cette classe comporte d'éléments, plus l'agent est incertain face à l'état actuel du système.

B.2 Probabilités

En dehors des états qu'un agent considère possibles (ou équivalents), il est souvent nécessaire d'exprimer sa croyance quant à l'occurrence d'un état particulier dans cette classe. Cette croyance peut s'exprimer par une distribution de probabilités sur les états possibles pour l'agent lors qu'il est dans un état donné, c'est-à-dire qu'on définit un espace probabiliste par état s $\mathsf{P}_s = (S_s, \sigma_s, p_s)$ pour un agent donné. Selon une interprétation subjective, les poids accordés aux différents états possibles s' de S_s représentent alors la croyance d'un certain agent sur l'état global dans lequel se trouve le système. Plus la distribution de probabilité est uniforme, plus l'incertitude est grande. La quantification de l'incertitude repose alors sur des notions d'entropie, telles que l'entropie de Shannon. Le type d'incertitude considéré n'a alors rien à voir avec le nombre d'états considérés possibles et ce type est appelé *aléatoire*[10].

Dans notre cas, chacun des agents doit pouvoir exprimer son incertitude face à la

10. Dans [57], les auteurs noment de type d'incertitude "conflit" car il n'est effectivement pas nécessairement issu d'un phénom´ene aléatoire.

situation et, par conséquent, nous définissons $n+1$ espaces probabilistes par état $\mathsf{P}_s^i = (S_s^i, \sigma_s^i, p_s^i)$, $i \in \mathcal{A}$.

Si ϕ est une formule de $\mathcal{L}_K$, alors le degré de croyance accordé à ϕ par l'agent i étant dans l'état s est obtenue de la manière suivante :

$$\mathrm{Prob}_s^i(\phi) = \sum_{s' \vDash \phi} p_s^i(s') \tag{B.1}$$

B.3 Autres extensions

Comme nous le détaillerons si nécessaire dans la suite du travail, la représentation de l'incertitude peut être étendue à l'utilisation des fonctions de croyance ou encore de fonctions de possibilités et des ensembles flous. Dans ce dernier cas, les propositions seront autorisées à être plus ou moins vraies, ce qui pourrait être utile pour la définition de la mission.

B.4 Incertitude et connaissance

Pour représenter connaissance et incertitude sur le même cadre, en plus des axiomes définissant la connaissance et ceux définissant l'incertitude (axiomes de probabilités, ou de fonctions de croyance, ou autres) certains axiomes doivent être ajoutés pour garantir la cohérence du modèle. En particulier, un agent ne peut accorder de croyance à un état qu'il ne croit pas possible, c'est-à-dire qui ne fait pas partie de la classe d'équivalence dans laquelle il se trouve :

$$\sum_{s' \in \mathsf{R}_i(s)} p_s^i(s') = 1 \text{ et donc } p_s^i(s') = 0, \forall s' \notin \mathsf{R}_i(s) \tag{B.2}$$

Ceci revient à dire qu'une formule ϕ qui est connue par un agent a nécessairement une probabilité de 1 :

$$\mathrm{Prob}_s^i(\phi) = 1 \text{ ssi } \phi \subseteq \mathsf{R}_i(s) \tag{B.3}$$

à ce stade, les notions de connaissance et certitude se rejoignent.

Page laissée en blanc à dessein.

Annexe C : Notations

Notation	Signification	Définition
$\mathcal{C}$	Coalition	$\mathcal{C} = (\mathcal{K}, \mathcal{M})$
$\mathcal{K}$	Agent institutionnel	
$\mathcal{M}$	Mission	$(\mathcal{E}, \mathcal{P})$
$\mathcal{E}$	Ensemble d'états à atteindre	$\mathcal{E} \subset S$
$\mathcal{P}$	Relation de préférence sur $\mathcal{E}$	$\mathcal{P}(s_1, s_2)$ s_1 est préféré à s_2
Φ	Ensemble de propositions primitives	
p, q, ..., p_1, p_2, ...	éléments de Φ	
$\mathcal{L}_K$	Langage propositionnel	fermé sous les opérateurs $\neg$, $\vee$, K_i, $\bigcirc$, U
ϕ, ψ, ..., ϕ_1, ϕ_2, ...	Formules de $\mathcal{L}_K$	
K_i	Opérateur de connaissance	$K_i\phi$ "l'agent i connaît ϕ"
B_i	Opérateur de croyance	$B_i\phi$ "l'agent i croit ϕ"
S	Ensemble des états globaux ou situations possibles	$S \subset L_1 \times \ldots \times L_e$
s	élément de S	$s = (l_1, \ldots, l_e)$
$\mathcal{A}$	Ensemble des agents composant le système	
G, G'	Groupes d'agents	$G, G' \subseteq \mathcal{A}$
$i, j, \ldots, e$	Éléments de $\mathcal{A}$	
e	Environnement	
$\mathbf{A}$	Ensemble des actions élémentaires	
Var_A	Ensemble d'actions primitives (conjointes)	
α, β, ..., α_1, α_2, ...	éléments de Var_A	
Λ	Action nulle	
$\mathcal{L}_A$	Langage d'actions	fermé sous les opérateurs ;, |, ...
ACT_i	Ensemble des actions pour lesquelles i est compétent	$ACT_i \subseteq Var_A$
ACT	Ensemble des actions conjointes	$ACT \subseteq ACT_1 \times \ldots ACT_n \times ACT_e$
$\mathbf{a}$	élément de A	$\mathbf{a} = (\alpha_1, \ldots, \alpha_e)$
L_i	Ensemble d'états locaux possibles pour l'agent i	
l_i	élément de L_i	$l_i \in L_i$
τ	Fonction de transition	$\tau(\mathbf{a})(s) = s'$ s' est l'état successeur de s après l'action conjointe $\mathbf{a}$
R_i	Relation binaire sur S	Connaissance ou croyance

$\mathrm{PL}_{i,s}$	Espace de plausibilité sur pour l'agent i dans s	$\mathsf{Pr}_{i,s} = (S_i^s, \sigma_i^s, p_i^s)$
P_i	Protocole ou stratégie pour l'agent i	$P_i : L_i \rightarrow 2^{ACT_i}$
P	Protocole joint du groupe d'agents $\mathcal{A}$	$P = [P1, \ldots, P_n]$
$\|\|p\|\|$	Ensemble de vérité de p	$\|\|p\|\| = \{s \in S \| s \vDash p\}$

DOCUMENT CONTROL DATA

(Security markings for the title, abstract and indexing annotation must be entered when the document is Classified or Designated)

1. ORIGINATOR (The name and address of the organization preparing the document. Organizations for whom the document was prepared, e.g. Centre sponsoring a contractor's report, or tasking agency, are entered in section 8.)

Defence Research and Development Canada – Valcartier
2459 Pie-XI Blvd North
Quebec (Quebec)
G3J 1X5 Canada

2a. SECURITY MARKING (Overall security marking of the document including special supplemental markings if applicable.)

UNCLASSIFIED

2b. CONTROLLED GOODS

(NON-CONTROLLED GOODS)
DMC A
REVIEW: GCEC APRIL 2011

3. TITLE (The complete document title as indicated on the title page. Its classification should be indicated by the appropriate abbreviation (S, C or U) in parentheses after the title.)

Présentation d'un cadre formel pour l'analyse de situation : Application à la décision collaborative dans le cadre d'une coalition

4. AUTHORS (last name, followed by initials – ranks, titles, etc. not to be used)

Jousselme A-L., Maupin P.

5. DATE OF PUBLICATION (Month and year of publication of document.)	6a. NO. OF PAGES (Total containing information, including Annexes, Appendices, etc.)	6b. NO. OF REFS (Total cited in document.)
May 2014	116	57

7. DESCRIPTIVE NOTES (The category of the document, e.g. technical report, technical note or memorandum. If appropriate, enter the type of report, e.g. interim, progress, summary, annual or final. Give the inclusive dates when a specific reporting period is covered.)

Technical Report

8. SPONSORING ACTIVITY (The name of the department project office or laboratory sponsoring the research and development – include address.)

Defence Research and Development Canada – Valcartier
2459 Pie-XI Blvd North
Quebec (Quebec)
G3J 1X5 Canada

9a. PROJECT OR GRANT NO. (If appropriate, the applicable research and development project or grant number under which the document was written. Please specify whether project or grant.)	9b. CONTRACT NO. (If appropriate, the applicable number under which the document was written.)
13dy	

10a. ORIGINATOR'S DOCUMENT NUMBER (The official document number by which the document is identified by the originating activity. This number must be unique to this document.)	10b. OTHER DOCUMENT NO(s). (Any other numbers which may be assigned this document either by the originator or by the sponsor.)
DRDC Valcartier TR 2007-003	

11. DOCUMENT AVAILABILITY (Any limitations on further dissemination of the document, other than those imposed by security classification.)

Unlimited

12. DOCUMENT ANNOUNCEMENT (Any limitation to the bibliographic announcement of this document. This will normally correspond to the Document Availability (11). However, where further distribution (beyond the audience specified in (11) is possible, a wider announcement audience may be selected.))

Unlimited

13. ABSTRACT (A brief and factual summary of the document. It may also appear elsewhere in the body of the document itself. It is highly desirable that the abstract of classified documents be unclassified. Each paragraph of the abstract shall begin with an indication of the security classification of the information in the paragraph (unless the document itself is unclassified) represented as (S), (C), (R), or (U). It is not necessary to include here abstracts in both official languages unless the text is bilingual.)

The general problem addressed in this work[1] is the formalization of the analysis of a coalition. We proposed a formal model of coalition analysis, relying on the capacity of a coalition to thus achieve a mission. The achievement of a mission implies on the one hand, a planning task through the definition of a sequence of joint actions to be performed, and on the other hand, the situation analysis that the coalition faces. These two tasks are in general regarded as distinct and the mathematical tools to treat them, different. The originality of the approach suggested in order to tackle the problem of analysis of coalition rests on a general language used at the same time for the problems of planning and analysis of situation. Thanks to this approach, the process of planning can be founded on the effects while accounting for the mental states of the agents required as pre-conditions to actions. The generality of the formal language proposed makes it possible to bind the concepts of capacity and situation awareness, often considered and defined separately mainly because of the limitations of the tools used. The specific problem approached in this report is that of formalization of the process of situation analysis. Formal definitions of situation, situational awareness, situation analysis are given. The modeling and the evolution of beliefs and knowledge as well as the associated uncertainty are defined in the network of agents which form a coalition. The concepts of group epistemic states, of conflict management, aggregation of information, of belief revision or update are thus approached

---

Le problème général de travail[2] est celui de la formalisation de l'analyse d'une coalition. Nous avons donc proposé un modèle formel d'analyse de coalition reposant sur la capacité d'une coalition à mener à bien une mission. L'accomplissement d'une mission implique d'une part une planification de celle-ci par la définition d'une séquence d'actions conjointes à réaliser et, d'autre part, l'analyse de la situation à laquelle fait face la coalition. Ces deux tâches sont en général considérées comme distinctes et les outils mathématiques pour les traiter, différents. L'originalité de l'approche proposée pour aborder le problème d'analyse de coalition repose sur un langage général utilisé à la fois pour les problèmes de planification et d'analyse de situation. Grâce à cette approche, le processus de planification peut être fondé sur les effets tout en tenant compte des états mentaux des agents requis comme préconditions aux actions. La généralité du langage formel proposé permet de lier les concepts de capacité et d'éveil situationnel, souvent considérés et définis séparément principalement à cause des limitations des outils utilisés. La problématique spécifique abordée dans ce rapport est celle de la formalisation du processus d'analyse de situation. Des définitions formelles de situation, d'éveil situationnel, d'analyse de situation sont données. La modélisation et l'évolution des croyances et connaissances ainsi que l'incertitude associée sont définies dans le réseau d'agents que forme une coalition. Ainsi sont abordées les notions d'états épistémiques de groupe, de gestion de conflit, d'agrégation d'information, de révision ou de mise à jour de croyances.

14. KEYWORDS, DESCRIPTORS or IDENTIFIERS (Technically meaningful terms or short phrases that characterize a document and could be helpful in cataloguing the document. They should be selected so that no security classification is required. Identifiers, such as equipment model designation, trade name, military project code name, geographic location may also be included. If possible keywords should be selected from a published thesaurus, e.g. Thesaurus of Engineering and Scientific Terms (TEST) and that thesaurus identified. If it is not possible to select indexing terms which are Unclassified, the classification of each should be indicated as with the title.)

analyse de situation; systèmes interprétés; modèle formel; fusion d'information; coalition

[1] Specific Arrangement 23 on the subject of collaborative decision making in a coalition context.

[2] Arrangement Spécifique 23 sur le sujet de Décision collaborative dans le cadre d'une coalition.

Defence R&D Canada

Canada's Leader in Defence
and National Security
Science and Technology

R & D pour la défense Canada

Chef de file au Canada en matière
de science et de technologie pour
la défense et la sécurité nationale

www.drdc-rddc.gc.ca