

**THALES**



**THÈSE DE DOCTORAT DE  
L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE**

Spécialité

**Informatique**

École doctorale Informatique, Télécommunications et Électronique (Paris)

Présentée par

**Pierre-Yves DUMAS**

Pour obtenir le grade de

**Docteur de l'Université Pierre et Marie Curie**

Sujet de la thèse :

**Intégrer la décision humaine  
lors de la mise à jour d'une mission de drones**

Soutenance prévue pour entre le 29 juin et le 3 juillet 2015 devant le jury composé de :

M. René MANDIAU	<i>Rapporteur</i> Professeur à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis
M. Gilles COPPIN	<i>Rapporteur</i> Professeur à Télécom Bretagne
Mme. Amal EL FALLAH SEGHROUCHNI	<i>Directrice de thèse</i> Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie
M. Jean-Pierre BRIOT	<i>Examinateur</i> Directeur de Recherche au CNRS
Mme. Salima HASSAS	<i>Examinateuse</i> Professeur à l'Université Claude Bernard Lyon 1
Mme. Zahia GUESOUM	<i>Examinateuse</i> Professeur à l'Université de Reims Champagne-Ardenne
Mme. Anarosa A F BRANDÃO	<i>Examinateuse</i> Professeur à l'université de São Paulo
M. Patrick TAILLIBERT	<i>Invité</i>



# Remerciements

Je tiens à remercier ma directrice de thèse Amal El Fallah Seghrouchni, mon encadrant à THALES Patick Taillibert, et mes parents, amis et collègues.

Sans le soutien indéfectible de ma directrice de thèse, je ne crois pas qu'il m'aurait été possible d'aller au bout de cette thèse. Les conséquences de la qualité de l'encadrement sont à ce point importantes qu'aujourd'hui, avec le recul, je les trouve vertigineuses. J'ai eu beaucoup de chance.

Je tiens à remercier Patrick Taillibert qui le premier m'a fait confiance pour cette aventure et qui m'a fait rencontrer ma directrice de thèse. J'ai aussi toujours apprécié son choix des personnes travaillant au laboratoire.

Je remercie également mes parents, mes amis et mes collègues pour leur présence. Ils ont contribué à faire de mes années de thèse de belles années, et ça aussi, c'est important pour réussir.



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Domaine d'application</b>	<b>15</b>
2.1	Les drones entre automatisation partielle et autonomie . . . . .	15
2.1.1	Caractérisation des drones . . . . .	15
2.1.2	Fonctionnement des drones . . . . .	19
2.1.3	Intérêts des drones . . . . .	20
2.1.4	La surveillance maritime . . . . .	23
2.1.5	Intérêts de l'automatisation partielle . . . . .	25
2.1.6	Difficultés de l'automatisation partielle . . . . .	27
2.2	Décrire l'automatisation partielle . . . . .	29
2.2.1	1978 : Sheridan 1D . . . . .	29
2.2.2	1986 : AGARD . . . . .	32
2.2.3	2000 : PACT . . . . .	34
2.2.4	2000 : Sheridan 4D . . . . .	38
2.2.5	2008 : LoA <sup>3</sup> . . . . .	39
2.2.6	2012 : 7D . . . . .	40
2.2.7	Autres propositions . . . . .	45
2.2.8	Récapitulatif . . . . .	46
2.2.9	Conclusion sur la description de l'automatisation partielle . . . . .	48
2.3	Optimiser l'automatisation partielle . . . . .	49
2.3.1	Solliciter l'humain . . . . .	49
2.3.2	Élucider le comportement de l'humain . . . . .	58
2.3.3	Autres propositions . . . . .	60
2.3.4	Mettre en place des garde-fous pour mieux gérer l'imprévu . . . . .	61
2.3.5	Conclusion sur l'optimisation de l'automatisation partielle . . . . .	63
<b>3</b>	<b>Contributions</b>	<b>67</b>
3.1	LOA4 : un référentiel innovant pour classifier les situations d'automatisation . . . . .	67
3.1.1	Structure . . . . .	67
3.1.2	Représentation . . . . .	78
3.1.3	Reprise de l'existant PACT . . . . .	80
3.1.4	Reprise de l'existant UML . . . . .	85
3.1.5	Conclusion sur LOA4 . . . . .	94
3.2	Proposition d'un système décisionnel . . . . .	97

3.2.1	Illustration du problème . . . . .	99
3.2.2	Positionnement du problème . . . . .	102
3.2.3	Proposition d'un CNP spécifique . . . . .	104
3.2.4	Maitrise de la consistance . . . . .	106
3.2.5	Maitrise de la complexité . . . . .	107
3.2.6	Implémentation . . . . .	115
3.2.7	Expérimentation : sacrifier des objectifs mineurs pour mieux choisir entre des objectifs majeurs . . . . .	124
<b>4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>133</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>136</b>

# **Introduction**



# Chapitre 1

## Introduction

Dans le rapport de l'OTAN de 2007 intitulé “Uninhabited Military Vehicles (UMVs) : Human Factors Issues in Augmenting the Force”, [1] les auteurs concluent dans 8.2.6 : “Human knowledge, experience and judgment provide unique capability to analyze safety risks and to think ahead in uncertain and novel situations. The challenge is to provide information and decision systems that protect and preserve the human user's key role, and that augment and enhance the operators' cognition rather than replace the operators in complex decision making.”

En français : “Les connaissances humaines, l'expérience humaine et le jugement humain fournissent une capacité unique à analyser les risques liés à la sécurité et à anticiper dans des situations incertaines et inédites. Le défi est de fournir des systèmes d'information et de décision qui protègent et préservent le rôle clé de l'utilisateur humain, et qui augmentent et enrichissent la cognition des opérateurs plutôt qu'ils ne remplacent les opérateurs dans la prise de décisions complexes.”

Selon ce rapport, le but n'est donc pas de concevoir des missions de drones desquelles l'humain soit absent, quels que soient les attraits en matière de coût et d'efficacité des systèmes complètement automatisés. L'humain doit au contraire avoir et conserver un rôle essentiel dans l'aspect décisionnel des systèmes de mission et de surveillance employant des drones. L'expression qui correspond est “joint cognitive system” qui signifie que l'humain et les systèmes automatisés décident conjointement. [2, 3] Certains auteurs parlent même de systèmes antropo-centrés. [4]

Plusieurs entités liées à la défense ont fait connaître leur désir que soient conçus de tels systèmes de mission dans lesquels l'humain et les systèmes automatisés se partagent la cognition. La DGA l'a fait savoir dans son plan stratégique de recherche et technologie de défense et de sécurité en 2009. [5] Elle l'a confirmé dans son bilan 2012. [6] De l'autre côté de l'Atlantique, aux États-Unis, le *Defence Science Board* du Département de la Défense va dans le même sens dans son *Task Force Report* de 2012 “The Role of Autonomy in Department of Defense Systems”. [7]

Pour concevoir des systèmes d'information et de décision où l'humain joue un rôle clé, il est utile de se doter d'une typologie adaptée : c'est le rôle des référentiels des niveaux d'automatisation (ou référentiels LOA pour *Levels Of Automation*, on peut aussi choisir d'y voir des niveaux d'autonomie). Un des premiers référentiels LOA a été proposé par Sheridan et Verplank en 1978 [8]. D'autres ont suivi et certains comme PACT sont actuellement utilisés à THALES. Mais si ces référentiels ont longtemps été pertinents pour ce qu'ils mettent en valeur de l'automatisation, ils le sont aujourd'hui moins pour ce qu'ils ne mettent pas en valeur du rôle de l'humain. C'est du moins l'avis des auteurs

du *Task Force Report* de 2012 qui déclarent : “[les études sur les niveaux d’autonomie que nous avons financées] sont contre-productives parce qu’elles se focalisent trop sur l’ordinateur plutôt que sur la collaboration entre l’ordinateur et son opérateur/superviseur.” [7] Il y a donc aujourd’hui une demande pour un référentiel des niveaux d’automatisation plus moderne qui fasse la part belle à l’humain.

Si cette conception de la modernité peut surprendre, elle n’en est pas moins solidement justifiée. En effet, si l’autonomie des systèmes automatisés a beaucoup progressé, c’est aujourd’hui dans le partage de la cognition entre l’homme et la machine que beaucoup cherchent le progrès. [9] C’est pourquoi nous présenterons comme première contribution un référentiel des niveaux d’automatisation qui interroge systématiquement sur le rôle de l’humain. Ce référentiel est LOA4. [10] Il doit son nom à ce que pour quatre aspects de ce qui peut être automatisé – la perception (l’établissement des croyances), l’autorité (la gestion des objectifs), l’action (la mise en œuvre) et l’adaptation (le changement de fonctionnement) – il interroge si la contribution humaine est systématique (niveau 0), possible (niveau 0.x) ou systématiquement inexistante (niveau 1). De façon complémentaire, pour ces trois niveaux, l’autonomie des systèmes automatisés peut être systématiquement inexistante (niveau 0), possible (niveau 0.x) ou systématique (niveau 1).

Si le référentiel LOA4 s’inscrit dans la continuité de référentiels précédents à bien des égards [11, 12, 13, 14], il propose aussi deux innovations essentielles en plus de se focaliser sur le rôle de l’humain. La première de ces innovations est un degré d’intérêt inédit pour l’adaptation avec une dimension dédiée. La seconde de ces innovations est la possibilité de capitaliser efficacement sur l’existant UML/PACT.

Forts de ce nouveau référentiel des niveaux d’autonomie, nous proposerons comme seconde contribution un système d’information et de décision dans lequel l’homme et la machine se partagent la cognition. [15]

Un concept essentiel d’un tel système est l’élucidation, un procédé par lequel les préférences humaines sont explicitées et exprimées sous une forme mathématique, comme par exemple un système de contraintes. Il est difficile pour un humain d’être exhaustif et consistant. Il est donc judicieux de ne pas préjuger favorablement de la possibilité des systèmes automatisés de discriminer avec pertinence des options d’intérêts voisins. Il est donc préférable que les systèmes automatisés puissent considérer des options comme également attractives plutôt que de vouloir à tout prix qu’ils en préfèrent une. C’est ce que permettent les travaux de Rachmawati et Srinivasan. [16] Cette équivalence entre deux options du point de vue des systèmes automatisés donne justement l’occasion à l’humain de faire usage de sa capacité unique à analyser une situation. Et si il est difficile pour l’humain d’être exhaustif et consistant en anticipant une mission s’il doit prévoir tous les possibles (ce vers quoi tend l’élucidation), il lui est beaucoup plus facile en cours de mission de se prononcer spécifiquement sur la situation qui se présente à lui. Nous avons donc bien là un rôle clé que l’humain peut jouer et auquel il n’y a pas de substitut puisque la possibilité d’élucider les préférences humaines est limitée.

Ce rôle clé doit cependant être utilisé avec parcimonie afin d’augmenter le ratio *nombre de drones / nombre d’humains* afin d’augmenter l’attrait économique de ces systèmes de mission. [1] C’est aussi une condition essentielle pour passer à l’échelle pour certains projets envisageant de recourir à des essaims de drones. Il faut donc choisir avec pertinence sur quels points interroger l’humain. Comme lors d’une mission de drones tous les objectifs ne sont pas équivalents, nous avons choisi

---

de nous focaliser sur les conflits entre les objectifs les plus importants. Mais il se peut encore que ces conflits entre les objectifs les plus importants soient trop peu nombreux ou au contraire trop nombreux par rapport à la charge de travail optimale de humains. Les critère d'éligibilité d'un objectif à la catégorie des objectifs les plus importants doivent donc être calibrés directement sur la capacité des humains à traiter les conflits entre ces objectifs. L'importance devient dès-lors un concept dynamique et plus en adéquation avec la perception de l'opérateur/superviseur.

S'il faut interroger l'humain avec parcimonie, il faut aussi lui laisser le temps de répondre, hors dans un contexte dynamique le temps peut manquer. Un premier point essentiel est d'offrir à l'utilisateur une perspective du temps qu'il peut prendre pour décider et des conséquences en fonction de son temps de décision. Cette possibilité était déjà présente dans une version modifiée [17] du CNP [18] que nous utilisons – encore modifié – pour interroger l'humain. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux périodes pendant lesquelles retarder la décision n'a pas (ou n'a que peu) de conséquences. [19] Un second point essentiel serait de pouvoir au besoin gagner du temps. Nous avons choisi pour cela de permettre le sacrifice d'objectifs mineurs pour que l'humain dispose de plus de temps pour arbitrer des conflits entre des objectifs majeurs. Nous proposerons une expérience pour illustrer l'efficacité d'une telle approche pour conclure la présentation du système décisionnel que nous avons conçu.

En conclusion nous rappellerons les mérites de nos deux contributions. LOA4 est un référentiel des niveaux d'autonomie centré sur l'humain, attentif à l'adaptation et compatible avec UML/PACT. Le système décisionnel que nous proposons est également centré sur l'humain et lui permet de jouer – même avec parcimonie et parfois au prix du sacrifice d'objectifs mineurs – un rôle clé basé sur sa capacité unique d'analyse.



# **Domaine d'application**



## Chapitre 2

# Domaine d'application

### 2.1 Les drones entre automatisation partielle et autonomie

L'autonomie est la capacité de faire quelque chose sans faire autre chose : continuer à voler sans se poser, continuer à fonctionner sans recevoir de nouvelles consignes, ... Pour un drone, l'autonomie est une capacité à plusieurs facettes. La facette qui nous intéressera est l'autonomie décisionnelle.

Un drone avec une certaine autonomie de vol doit bien se poser un jour, et de la même façon un drone avec une certaine autonomie décisionnelle doit bien recevoir des instructions un jour : l'autonomie est un état transitoire, c'est la suspension d'une dépendance.

Ce qui permet la suspension de la dépendance pour un drone, c'est l'automatisation. Plus les automatismes sont sophistiqués et performants, plus l'autonomie est importante. L'autonomie peut donc apparaître comme le paroxysme de l'automatisation. Sur le spectre de l'automatisation, il y a à une extrémité l'absence d'automatisation et à l'autre l'autonomie. Entre ces deux extrêmes, il y a une multitude de situations d'automatisation partielle dans lesquelles au moins un humain est mis à contribution.

L'autonomie des drones est donc toujours toute relative : à quel moment ? Et pour faire quoi ? Combien de temps ? Dans quelles conditions ? On est loin ici des agents parfaitement autonomes fréquents dans les systèmes multi-agents.

L'autonomie des drones est pourtant bien réelle et de plus en plus souvent les drones sont guidés par des buts plus qu'ils ne sont pilotés.

Cette montée en puissance de l'autonomie soulève une problématique : quelle est la place de l'humain dans ces systèmes où il tend à être marginalisé ? Et comment l'intégrer efficacement à ces nombreuses situations d'automatisation partielle qui caractérisent le fonctionnement actuel des drones.

Nous allons voir dans cette section ce que sont les drones, entre automatisation partielle et autonomie.

#### 2.1.1 Caractérisation des drones

##### Pilotage

Un drone est un véhicule sans pilote humain à son bord. Un drone est piloté :



FIGURE 2.1 – Trois exemples de types de drones dans des espaces différents. À gauche le Manta, sous-marin. Au centre le Protector, marin. À droite le Gladiator, terrestre.

- Soit par un pilote automatique embarqué.
- Soit par un pilote automatique à distance.
- Soit par un pilote humain à distance.
- Soit par une combinaison des trois solutions précédentes. Cette combinaison peut être amenée à évoluer dynamiquement en fonction des circonstances.

À la différence d'un missile, le drone est conçu pour revenir à sa base.

### Tailles et formes

Les drones sont des véhicules, et de même qu'il y a différents véhicules, il y a différents drones (*c.f. : 2.1*).

En ce qui concerne les drones volants, les plus petits sont à voilure tournante (*i.e.* : ils n'ont pas d'ailes et peuvent s'élever verticalement). Les petits drones peuvent être déployés en essaim. Les plus gros drones sont sensiblement semblables à des avions ordinaires.

Parmi les drones de taille intermédiaire à voilure fixe, certains sont, comme le RQ-11 Raven (*c.f. : Fig. 2.2*), lancés à la main. D'autres, comme le CU-161 Sperwer sont catapultés (*c.f. : Fig. 2.3*). Les drones catapultés sont plus gros, ils ont donc une charge utile plus importante et sont moins sensibles aux vents. Ces drones sont les plus appropriés pour les missions régulières et prolongées d'observation. Les catapultes peuvent être montées sur des camions ou des navires.

### Autonomie

Le drone fait partie d'un *système de mission*. Le drone n'est pas indépendant : il est lié à une station de contrôle au sol (*CGS* pour *Control Ground Station*) et possiblement à d'autres entités, telles que d'autres drones. Pour cette raison, il est souvent fait référence au drone comme à une *plateforme* embarquant une charge utile, dite *payload* en anglais. Il peut aussi être fait référence au drone comme à un *segment aéronautique*, le terme de "segment" soulignant que le drone n'est bien qu'un élément d'un ensemble.

L'autonomie du drone doit se concevoir dans la perspective de ce système de mission. À ce titre, l'autonomie est plus ou moins grande et peut varier en fonction des circonstances. Quand l'autonomie d'un drone fait débat, il est judicieux d'identifier exactement ce qui est automatisé et ce qui ne l'est pas, et de façon complémentaire ce qui relève de l'humain, et ce qui n'en relève pas.



FIGURE 2.2 – Lancement d'un RQ-11 Raven.



FIGURE 2.3 – Catapultage d'un CU-161 Sperwer à gauche. Descente d'un CU-161 Sperwer à droite.

L'autonomie peut être définie comme la possibilité pour un système d'agir automatiquement, ou – dans les limites programmées – de façon “auto-gérée” (“*self-governing*”) (source : [7], partie “1.1. Misperceptions about Autonomy are Limiting its Adoption”). D'autres définitions de l'autonomie existent mais nous nous attacherons à celle-ci qui associe étroitement autonomie et automatisation.

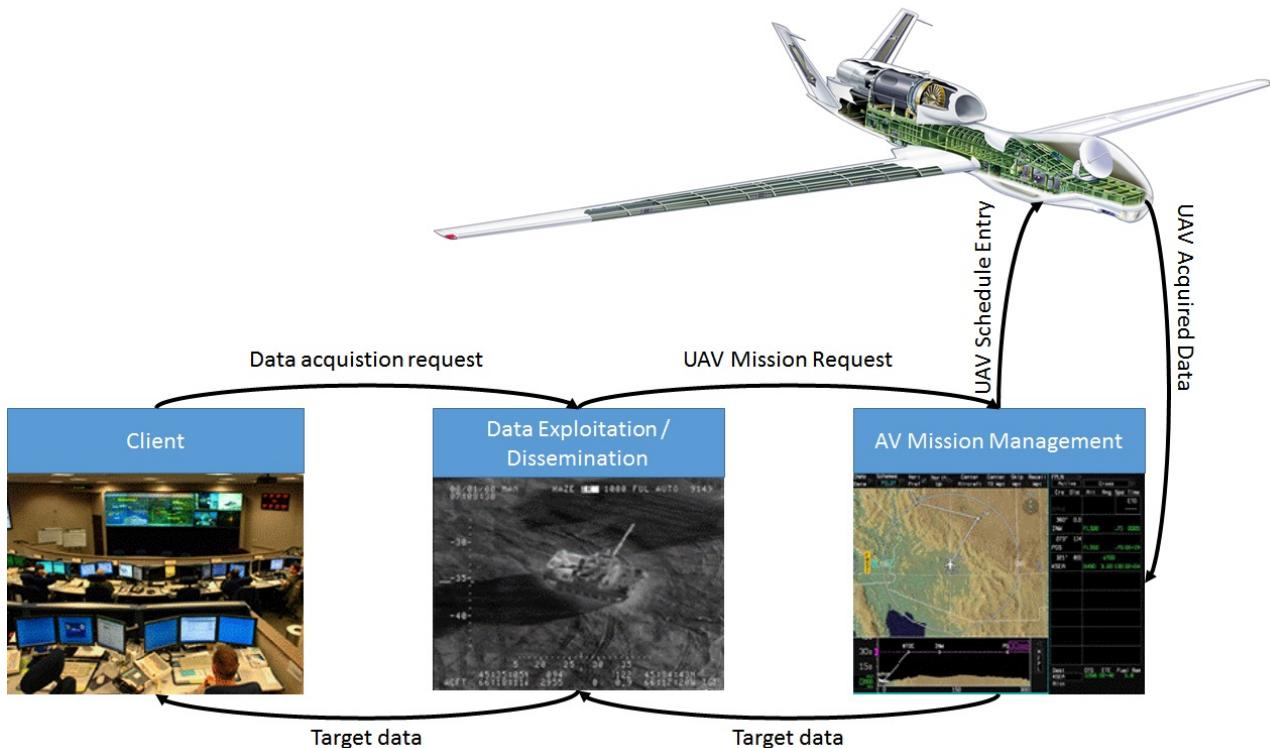


FIGURE 2.4 – Fonctionnement au niveau organisationnel dans lequel s'inscrivent les activités du tableau 2.1 (source : d'après une figure de THALES Systèmes Aéroportés [20]).

## 2.1.2 Fonctionnement des drones

### Niveau organisationnel

Un système de missions mobilise toute une chaîne d'entités (c.f. : Fig. 2.4).

L'ambition de THALES est de proposer des solutions complètes [21] qui incluent la charge utile pour l'observation embarquée sur des plateformes tierces, des moyens de communication et des consoles de contrôle équipées des logiciels adaptés.

Les systèmes de mission sont très complexes et très coûteux. Leur conception mobilise des scientifiques, des industriels et des États. Le point de vue des États est connu par des publications officielles issues par exemple de la DGA [5, 6], du *Defence Science Board* [7] aux États-Unis et de l'OTAN.

Certains documents de l'organisation pour la recherche et les technologies (*Research and Technology Organisation* ou *RTO*) de l'OTAN sont particulièrement informatifs à propos de la place de l'humain dans les systèmes de mission :

- RTO-EN-9 de 1999 intitulé “Development and Operation of UAVs for Military and Civil Applications” avec 311 pages. [22]
- RTO-MP-077 de 2001 intitulé “Human Factors in the 21st Century” avec 230 pages. [23]

- TR-HFM-078 de 2007 intitulé “Uninhabited Military Vehicles (UMVs) : Human Factors Issues in Augmenting the Force” avec 514 pages. [1]
- TR-SCI-144 de 2008 intitulé “Integration of Systems with Varying Levels of Autonomy” avec 150 pages. [24]
- TR-HFM-170 de 2012 intitulé “Supervisory Control of Multiple Uninhabited Systems - Methodologies and Enabling Human-Robot Interface Technologies” avec 276 pages. [14]

### Niveau des activités

Les activités qui contribuent à une mission varient en fonction des scénarios. À titre d'exemple, nous pouvons citer celles envisagées par Joseph *et al.* dans l'article “Cognitive Task Analysis : A Crucial Step to Improve the Usability of a Ground Control Station for Unmanned Air System Mission”, [20] publié en 2009 dans le journal de la RTO. Le premier auteur, Joseph, est de THALES Systèmes Aéroportés à Pessac.

Trois de ces activités sont détaillées en tâches dans le tableau 2.2 et dans le tableau 2.3. Ces trois activités recouvrent des tâches qui nous intéresseront particulièrement par la suite :

- “A7.4 Monitor AV Flight” (tableau 2.2) permet d'établir une partie des croyances sur lesquelles fonder les décisions à prendre. Nous ferons référence à l'établissement des croyances comme relevant de la *perception*.
- “A7.5 Control AV Flight” (tableau 2.2) permet de modifier le déroulement de la mission, par exemple en ajoutant ou en supprimant des points de passage. Nous y ferons référence comme relevant de la *décision*. Il sera fait référence à la possibilité d'ordonner la mise en œuvre d'une décision comme relevant de l'*autorité*.
- “A7.3 Execute AV Flight” relève de la mise en œuvre. De même, “A7.5 Control AV Flight” (tableau 2.2) comporte une tâche “A7.5.1.12 Carry out Emergency Procedure for AV in Flight Fault” qui relève de la mise en œuvre . Nous ferons référence à la mise en œuvre comme relevant de l'*action*.
- “A8.3 Execute Exploitation” (tableau 2.3) comporte une tâche “Select Payload Control Mode” qui permet de changer la façon dont la charge utile est opérée. Nous ferons plus généralement référence à la possibilité de changer de fonctionnement comme relevant de l'*adaptation*.

### Niveau des tâches

Les activités se décomposent en tâches. Les tableaux 2.2 et 2.3 mentionnent certaines tâches qui composent les activités du tableau 2.1.

#### 2.1.3 Intérêts des drones

Comparé à un véhicule habité, un drone peut présenter de nombreux avantages en matière de coût, de durée et de risque :

- *Avantages en matière de coût.* La taille d'un véhicule habité est inférieurement bornée par la taille de ses habitants et des systèmes assurant leur survie (e.g. : un siège éjectable). Sans pilote à son bord, un drone peut être plus petit et avoir proportionnellement à sa taille une

TABLE 2.1 – Certaines activités susceptibles de faire partie d'une mission d'UAV 2.1. Les activités A7.4 et A7.5 sont détaillées dans le tableau 2.2. Les activités de A8.3 sont détaillées dans le tableau 2.3.

A0. Operate UAS	A1. Pre-deployment Preparation	...
	A2. Manage Assets	...
	A3. Manage Command Post	...
	A4. Manage LRS	...
	A5. Manage CGS	...
	A6. Manage Tasking	...
	A7. Manage AV Missions	A7.1 Plan AV Missions A7.2 Prepare for AV Flight A7.3 Execute AV Flight A7.4 Monitor AV Flight (c.f. : tableau 2.2) A7.5 Control AV Flight (c.f. : tableau 2.2)
	A8. Manage Exploitation / Dissemination	A8.1 Plan Exploitation / Dissemination A8.2 Set up Exploitation / Dissemination A8.3 Execute Exploitation (c.f. : Tab. 2.3) A8.4 Execute Dissemination

charge utile plus importante. Un véhicule plus petit coûte souvent moins cher à fabriquer et consomme moins de carburant. Il est aussi moins coûteux à transporter et à protéger. Les économies de coûts sont transitives : elles impactent favorablement le coût de la formation des pilotes. Enfin un pilote de drone, quand il est éloigné du conflit, est également moins coûteux à protéger. Les économies peuvent donc être très importantes.

- *Avantages en matière de durée.* L'endurance d'un véhicule habité est supérieurement bornée par l'endurance de ses habitants et des systèmes assurant leur survie. Un drone permet souvent d'envisager des missions plus longues. Les pilotes de drones peuvent se relayer au sol sans que la mission ne soit interrompue.
- *Avantages en matière de risque.* La tolérance aux risques pour un véhicule habité est supérieurement bornée par la tolérance aux risques pour ses habitants. Un drone permet souvent d'envisager des missions plus fréquentes. Combinés aux avantages en matière de coût, ces avantages en matière de risque permettent de normaliser des missions qui autrement demeuraient exceptionnelles.

Au-delà d'une alternative avantageuse à certains véhicules habités, les drones permettent d'envisager des missions inédites pour plusieurs raisons :

- *Pour des raisons de coût, de durée, et d'exposition aux risques,* car en plus de permettre de normaliser des missions qui autrement demeuraient exceptionnelles, comme expliqué plus haut, les drones permettent de rendre possibles et acceptables des missions qui autrement seraient impossibles ou inacceptables.
- *Pour des raisons de taille et de forme,* car sans la contrainte de l'habitacle, la forme d'un drone est plus libre, ce qui présente des avantages en matière d'efficacité et donne accès à des espaces plus confinés.

TABLE 2.2 – Certaines tâches des l'activité A7.4 “Monitor AV Flight” et A7. 5. “Control AV Flight” d'une mission d'UAV.

A7. 4. Monitor AV Flight	A7. 4.1 Monitor Mission Status & System Health	A7. 4.1.1 Monitor General Battlespace Situation	
		A7. 4.1.2 Check Progress of Mission	
		A7. 4.1.3 Check Location of AV	
		A7. 4.1.4 Check / Change / Calibrate AV Status of Settings	
		A7. 4.1.5 Check / Change / Calibrate Image Quality	
		A7. 4.1.6 Check / Change / Calibrate GDT / Data-link settings	
		A7. 4.1.7 Check / Change / Calibrate CGS settings	
		A7. 4.1.8 Detect and Diagnose any Problems	
		A7. 4.1.9 Resolve or Reduce Risk of Any Problem	
A7. 5. Control AV Flight	A7. 5.1 Change AV Mission Plan	A7. 4.2.1 Detect Fault in AV System	
		A7. 4.2.2 Detect Lost Link with AV	
		A7. 4.2.3 Detect Deviation in AV Flight Plan	
		A7. 4.2.4 Receive ATC Command / Request from Payload operator	
		A7. 4.2.5 Receive Command / Request from Payload Operator	
		A7. 4.2.6 Sense Conflicting Airspace User	
		A7. 4.2.7 Receive Update on Enemy	
		A7. 4.2.8 Receive Update to Tasking	
		A7. 5.1.1 Move AV Way Point(s)	
	A7. 5.2 Carry out Lost Link Procedures	A7. 5.1.2 Add an AV Way Point	
		A7. 5.1.3 Delete AV Way Point	
		A7. 5.1.4 Enter Coordinate and Holding Pattern for Air Vehicle to Fly to and Hold	
		A7. 5.1.5 Move Payload Way Point(s)	
		A7. 5.1.6 Add a Payload Way Point	
		A7. 5.1.7 Delete AV Way Point	
		A7. 5.1.8 Enter Coordinate for Payload to Point to	
		A7. 5.1.9 Add an NAI / TAI / DP	
		A7. 5.1.10 Change Flight Constraints for Automatic re-routing	
		A7. 5.1.11 Change Lost Link Procedures	
A7. 5.3 Carry out Emergency Procedures for AV in Flight Fault		A7. 5.1.12 Change Automatic Emergency Procedure for AV Problem	
		...	

TABLE 2.3 – Certaines tâches de l'activité A8.3 “Execute Exploitation” d'une mission d'UAV.

A8. 3. Execute Exploitation	A8. 3.1 Select Payload Control Mode	...
	A8. 3.2 Set View of Imagery and Map	...
	A8. 3.3 View Real-Time imagery	...
	A8. 3.4 Control Real time Sensor Image	...
	A8. 3.5 Select Objects to be Re-addressed for Mission Replanning / Dynamic Retasking	...
	A8. 3.6 Record a Clip of Moving Imagery	...
	A8. 3.7 Analyse Video Imagery	...
	A8. 3.8 Capture Snapshots	...
	A8. 3.9 Pre-processing Snapshots	...
	A8. 3.10 Analyse Snapshots	...
	A8. 3.11 Measure Battle Damage	...
	A8. 3.12 Search Imagery / Target Database(s)	...

- *Pour des raisons d'autonomie*, notamment en renfort des raisons de coûts, car une plus grande autonomie des systèmes automatiques permet de réduire l'usage de personnel humain (coûteux et limité). Dans certains cas, les systèmes automatisés sont aussi plus performants que l'humain.
- *Pour des raisons d'échelle*, car les drones peuvent être très nombreux et rendre possible un maillage plus fin, en matière de temps comme d'espace. Ce maillage plus fin est par exemple utile pour le déminage ou pour les patrouilles de surveillance. Une grande autonomie est intéressante pour ce type de missions.

Pour toutes ces raisons, les drones sont appelés à avoir des usages de plus en plus fréquents et de plus en plus variés.

#### 2.1.4 La surveillance maritime

Un usage qui répond à un besoin très fort est la surveillance maritime. Ce besoin se traduit par des marchés publics attractifs pour les industriels comme THALES (e.g. : FRONTEX [25]).

L'espace maritime est vaste et propice aux activités illégales telles que le dégazage clandestin, la pêche hors quota, les trafics, la piraterie et l'immigration clandestine. Le contrôle de cet espace est stratégique pour de nombreux États et pour l'Europe.

Les drones aériens peuvent aider à renforcer la présence militaire ou policière dans cet espace. À l'heure actuelle, les usages envisagés relèvent essentiellement de la surveillance. Mais des usages en intervention sont également envisagés.

Le système de drones qui sera présenté en tant que contribution, bien qu'il soit générique, est d'abord destiné à être un système de drones en patrouille maritime.

Dans ce contexte de patrouille maritime, lorsqu'un bateau manifeste un comportement suspect, ce comportement, s'il est détecté, l'est le plus souvent par un radar distant. Un drone peut alors venir survoler le bateau suspect pour obtenir plus d'informations. Le survol d'un bateau suspect est un *objectif*.

La date avant laquelle un bateau suspect doit être survolé dépend de ce dont ce bateau est suspecté, mais elle est toujours bornée supérieurement. Pour cette raison, il est possible qu'un



FIGURE 2.5 – Cockpit du CU-161 Sperwer. Au fond, à gauche l'opérateur de vol, à droite le coordinateur de mission qui porte un casque radio. Au premier plan l'opérateur des senseurs. [26]

objectif ne puisse pas être pris en charge, ou que certains objectifs soient mutuellement exclusifs. Il faut alors faire des choix.

Les choix reposent sur l'importance des objectifs. L'importance d'un objectif résulte de la combinaison entre l'intensité de la suspicion et l'objet de la suspicion.

Quand un objectif apparaît ou gagne en importance (parce qu'un comportement se manifeste avec une intensité croissante ou avec une interprétation différente), il arrive que cet objectif ne puisse être pris en charge qu'au détriment de la prise en charge d'autres objectifs. Il est donc fréquent de devoir faire des choix.

Lorsqu'un choix doit être fait entre des objectifs ou des ensembles d'objectifs mutuellement exclusifs et d'une même importance (ou dont l'importance est proche ou n'est mathématiquement pas comparable), il peut être judicieux de solliciter un avis humain.

Il ne faut pas préjuger favorablement de la capacité des systèmes automatisés à discriminer avec pertinence des situations dont les importances sont voisines. L'avis de l'humain (formé et expérimenté) est souvent plus fiable si la situation lui reste intelligible et si il a assez de temps pour se faire une opinion.

La personne à même d'émettre cet avis humain est le *coordinateur de mission* (Fig. 2.5).

Cet avis humain n'est pas disponible instantanément car il faut un certain temps au coordinateur de mission pour l'émettre. La pertinence de cet avis dépend du temps que lui consacre le coordinateur de mission. Si ce temps est trop court, cette pertinence est nulle car elle est a priori inférieure à celle de l'avis que peuvent produire les systèmes automatisés. Au-delà d'un certain temps, la

pertinence de cet avis est stable car l'humain ne peut l'améliorer.

Quatre éléments peuvent retarder la disponibilité de l'avis du coordinateur de mission :

- La latence des communications, en particulier quand le drone est dans l'incapacité physique ou stratégique de communiquer.
- La collecte d'informations complémentaires ou d'autorisations spéciales auprès de tierces. À cette fin, il est d'usage que le coordinateur de mission porte un casque radio et se trouve dans le même espace que le pilote du drone et l'opérateur des senseurs.
- Le temps de réflexion du coordinateur de mission.
- Le temps perdu du fait de l'indisponibilité du coordinateur de mission ou de ses interlocuteurs ou d'autres ressources.

Ces quatre éléments seront considérés comme faisant partie du temps humain de décision parce que, du point de vue des systèmes automatisés, ils contribuent au temps requis pour bénéficier de la contribution du coordinateur de mission.

Le temps humain de décision est impossible à prévoir avec précision, mais il est possible de l'encadrer. Le coordinateur de mission peut apprécier quasi-instantanément la complexité d'une situation et informer le système du temps dont il pense avoir besoin pour émettre un avis pertinent. Il peut amender au besoin ce pronostic. Les systèmes automatiques peuvent également apprécier la complexité d'une situation et pronostiquer le temps dont le coordinateur de mission va avoir besoin pour émettre un avis pertinent, mais ce pronostic informatisé est moins fiable que le pronostic du coordinateur de mission.

**C'est ce temps humain de décision qu'il va falloir allouer au mieux pour améliorer l'aspect décisionnel des systèmes de mission et de surveillance employant des drones.** C'est une problématique qui concerne également de nombreux systèmes partiellement automatisés où l'humain et les systèmes automatisés se complètent, au risque parfois de se gêner.

### 2.1.5 Intérêts de l'automatisation partielle

Si l'automatisation totale est un Graal pour beaucoup de roboticiens, l'automatisation partielle demeure une problématique majeure, riche des nombreuses possibilités pour l'homme et la machine de se compléter réciproquement (c.f. : Fig. 2.6).

Dans le domaine de l'aviation, où les réticences à faire confiance aux automatismes sont nombreuses et légitimes, les nuances de l'automatisation partielles sont plébiscitées pour proposer les meilleurs compromis. Cette problématique d'une automatisation tout en nuances associant l'humain et les systèmes automatisés concerne tous les aspects de l'automatisation. Ces aspects se manifestent à travers différents thèmes.

L'évitement des collisions est par exemple un des thèmes du domaine de l'aviation qui interroge les spécialistes de l'automatisation (c.f. : AGARD R-825, 1997, "Air Traffic Management : Support for Decision Making Optimisation – Automation" [27]). Notons que la plupart des aspects de l'automatisation dont l'aviation s'est emparée ne lui sont pas spécifiques. Par exemple, les travaux en planification prenant en compte les courants dynamiques (e.g. : [28]) peuvent concerner les courants aériens mais aussi les courants sous-marins. La fusion de données (e.g. : [29]), utilisée pour la perception automatique, est un autre exemple de thème concernant l'aviation qui ne lui est pas spécifique.

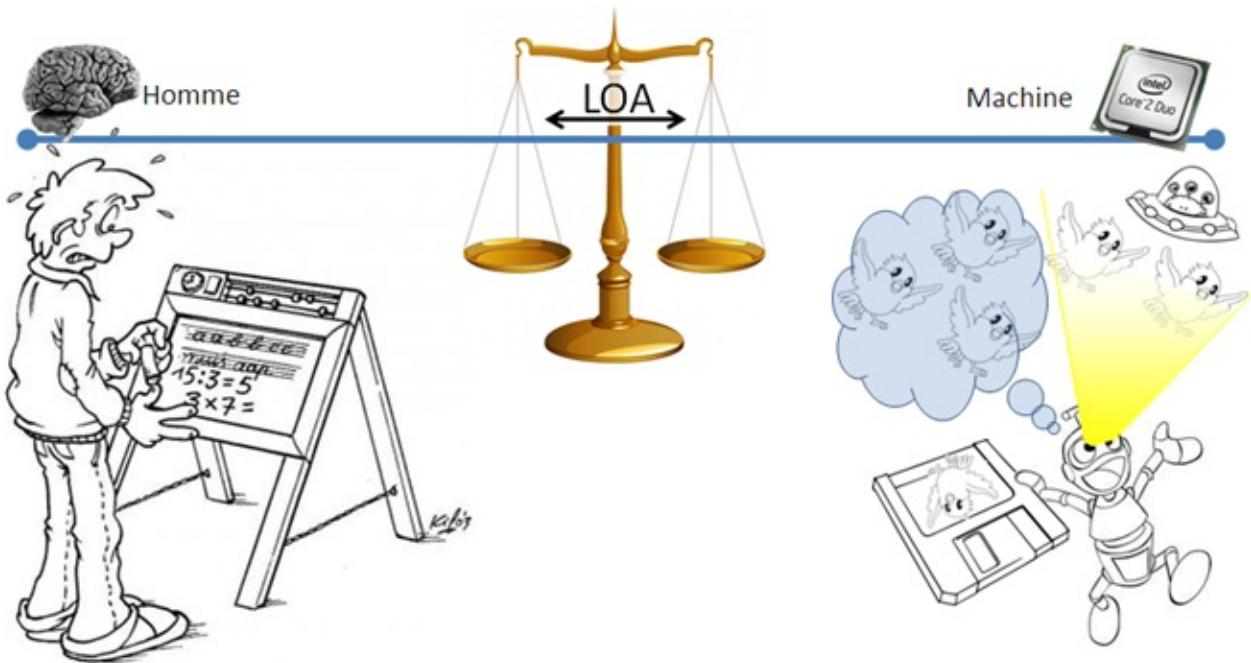


FIGURE 2.6 – L’automatisation partielle permet à l’humain et aux systèmes automatisés de se compléter. Le spectre de l’automatisation partielle peut-être normalisé et discrétré par des niveaux d’automatisation (LOA pour *Levels Of Automation*).

L’évitement des collisions relève de l'*action* (mise en œuvre) ; la planification relève de l'*autorité* (gestion des objectifs) ; la fusion de données relève de la *perception* (établissement des croyances). Pour chacun de ces trois aspects de l’automatisation, différents niveaux d’automatisations sont envisageables, allant du manuel au tout-automatique.

L’actualité de la problématique de l’automatisation partielle est confirmée en 2008 par cet article de Parasuraman : “Humans : Still vital after all these years of automation”. [9] Parasuraman est connu pour ses travaux sur les difficultés de l’automatisation, en particulier pour son article antérieur “Humans and automation : Use, misuse, disuse, abuse” de 1997. [30] Son article de 2008 fait écho à cet article de 1997 et confirme la difficulté à faire interagir efficacement l’humain et les systèmes automatisés, car si l’humain et les systèmes automatisés peuvent se compléter, ils peuvent aussi se gêner. Ce constat a été fait à de nombreuses reprises, il est possible par exemple de citer “Ironies of automation” [31] de Bainbridge en 1983 dans le domaine des processus industriels.

Une illustration à la fois de l’intérêt et de la difficulté à faire interagir l’humain et les systèmes automatisés est donnée par une expérimentation rapportée par Legras *et al.* dans un article de 2008 : “Authority sharing in a swarm of UAVs : Simulation and experiments with operators”. [32] Dans cette expérimentation, une nuée de drones patrouillent et sont susceptibles d’engager une poursuite quand un intrus est détecté. La poursuite peut se faire avec ou sans la collaboration d’un pilote humain.

Dans le contexte de cette expérience, une poursuite bénéficiant de la collaboration d’un humain est en moyenne 20% plus efficace qu’une poursuite n’en bénéficiant pas. C’est le sens stratégique de l’humain qui explique cette différence.

La différence pourrait être autre dans d’autres contextes, elle pourrait aussi être nulle, ou même

négative. Par exemple, dans cette même expérience, si la performance des poursuites augmente de 20% grâce à l'humain, la performance de la surveillance diminue, elle, de 3,2%. Il est donc pertinent, dans ce contexte, de cantonner l'humain à un rôle de soutien durant les poursuites. Hollnagel s'est attardé sur la fiabilité de l'humain dans son article de 2005 intitulé "Human reliability assessment in context". [33] Il en ressort essentiellement que l'humain n'est ni systématiquement inférieur à la machine, ni systématiquement supérieur à la machine. Ce dilemme du *ni MABA ni MABA* systématique (ni *Men-Are-Better-At* systématique, ni *Machines-Are-Better-At* systématique) a été formulé par Dekker et Woods en 2002. [34] Il faut au demeurant accepter que l'humain et les systèmes automatisés sont tous faillibles. [35, 36]

Ce qui est important, c'est que, **parfois, l'humain peut améliorer les performances d'un système.** En conséquence, **il y a un intérêt à bien gérer la contribution humaine à la performance de systèmes par ailleurs automatisés.** Ceci sera l'objectif du système décisionnel proposé dans la seconde partie consacrée aux contribution.

### 2.1.6 Difficultés de l'automatisation partielle

Bien qu'elle permette parfois une augmentation de la performance, la participation de l'humain ne manque généralement pas de soulever des difficultés. Il faut en particulier concevoir des interfaces appropriées, avec parfois des problématiques particulières. Un exemple d'une telle problématique est de parvenir à attirer l'attention d'un utilisateur sur une certaine partie d'une interface, alors qu'il se focalise, avec un degré de concentration extrême, sur une autre partie de cette interface. On parle alors de tunnelisation de l'attention (*attentional tunneling*; c.f. : Foyle *et al.*, 1995, "Attentional issues with superimposed symbology : Formats for scene-linked displays" [37]).

Les situations les plus déconcertantes sont celles où l'humain et les systèmes automatisés ne se comprennent pas. Ainsi, toujours dans la même expérience décrite par Legras *et al.*, l'humain est parfois contrarié par les systèmes automatisés. Cela arrive quand l'opérateur assigne une destination à un drone dans le cadre d'une poursuite avec l'intention d'intercepter un intrus, mais quand une fois arrivé à destination, et en absence de stimulation immédiate, le drone se remet à patrouiller et quitte la position où l'opérateur l'avait envoyé, contraignant l'opérateur à répéter l'ordre au drone de se rendre à cette position. En l'occurrence, le problème semble simple et ne nécessiter que l'ajout d'une commande "tenir une position". Mais c'est un exemple de problème d'interaction homme-machine qui incite bien à une attention particulière.

Certains problèmes sont subtils, comme dans cet article de 2012 Pizzoli *et al.* au titre évocateur "What the heck is it doing ? Better understanding Human-Machine conflicts through models" qui fait écho à deux articles de 1995 sur les surprises de l'automatisation : "How in the world did we ever get into that mode ? Mode error and awareness in supervisory control" de Sarter *et al.* [38] et ""Oops, it didn't arm." A case study of two automation surprises." de Palmer. [39]

Dans l'article de 2012, les auteurs rapportent un incident lors du vol d'un drone RESSAC de l'Onera en juillet 2011. Le drone devait voler successivement vers trois points : alpha, beta et gamma. Pour des raisons de sécurité, un pilote humain pouvait intervenir. Ce fut le cas lorsqu'il se mit à pleuvoir alors que le drone n'avait pas encore atteint le point alpha, le pilote humain prit le contrôle, et par hasard survola le point alpha, faisant considérer au drone que la première phase de sa mission – aller au point alpha – était accomplie. En raison du mode de pilotage, le pilote ne fut cependant pas informé de l'accomplissement de ce premier objectif. La pluie cessa et le pilote redonna son autonomie au drone. Comme le pilote n'avait pas reçu l'information que le drone considérait la pre-

mière phase de la mission accomplie, il s'attendait à ce que le drone aille au point alpha, alors que le drone, conformément aux instructions pour la seconde phase de la mission, partait pour le point beta. Le pilote crut à une perte de contrôle. L'article de 2012 décrit cette succession d'événements en utilisant les réseaux de Petri.

Les systèmes partiellement automatisés sont donc intéressants pour leurs possibilités (ne serait-ce que légales) et pour leurs performances. Mais en contre-partie, ils imposent une complexité dont il est difficile d'anticiper toutes les conséquences.

Notons que les solutions ne se trouvent pas seulement du côté des systèmes automatiques, elles se trouvent aussi du côté des opérateurs, dont le niveau de compétence doit parfois croître avec la complexité des systèmes qu'ils opèrent. C'est le constat, déjà ancien, fait par Bright dans son article "Does Automation Raise Skill Requirements" de 1958.

Il est difficile de comparer la performance de différents systèmes, à moins que l'intensité et la nature des interventions humaines n'y soient très similaires. Cette comparaison est même parfois impossible, en particulier dans le cas des systèmes de décision, car l'intervention humaine est souvent la conséquence de l'incapacité à éliciter parfaitement et exhaustivement la performance.

Il est pourtant utile de pouvoir communiquer sur le positionnement d'un projet dans le spectre de l'automatisation, et c'est ce qui justifie l'intérêt pour les référentiels des niveaux d'automatisation (LOA pour *Levels Of Automatisation*). Plusieurs référentiels pour comparer les niveaux d'automatisation se sont fait connaître. Celui dont l'influence fut la plus importante est certainement celui proposé par Sheridan et Verplank en 1978.

## 2.2 Décrire l'automatisation partielle

Les drones constituent un domaine de pointe propice à faire progresser la réflexion sur l'automatisation, mais cette réflexion a une portée très générique et ses domaines d'application ne se limitent pas à l'automatisation des seuls drones. C'est cette même générnicité qui a fait la popularité du référentiel de l'automatisation présenté par Sheridan et Verplank en 1978 dans un article consacré aux sous-marins : " Human and computer control of undersea teleoperators". [8]

Ce référentiel a dix niveaux d'automatisation. Au niveau le plus élevé, les systèmes automatisés décident de la meilleure chose à faire et ils la font sans consulter l'humain ni l'informer. Ce dixième niveau décrit bel et bien une situation d'autonomie. Les niveaux inférieurs (à l'exception du niveau 1 où les systèmes automatisés ne font rien) sont donc bien des niveaux d'autonomie partielle en plus d'être des niveaux d'automatisation partielle. Par exemple, au niveau 4, les systèmes automatisés sont capables de déterminer seuls la meilleure choses à faire même s'ils ne peuvent pas la faire seuls. Les référentiels dits "des niveaux d'automatisation" peuvent donc de plein droit être considérés comme des référentiels "des niveaux d'autonomie" et il conservent à ce titre là une vibrante actualité.

### 2.2.1 1978 : Sheridan 1D

Un des référentiels de niveaux d'automatisation qui a eu le plus d'influence est celui proposé en 1978 par Sheridan et Verplank (Sheridan et Verplank, 1978, "Human and computer control of undersea teleoperators" [8]). Il sera qualifié ci-après de référentiel *Sheridan 1D*. Il comporte dix niveaux d'automatisation. Ces dix niveaux sont typiquement présentés sous la forme d'un tableau, dont plusieurs versions légèrement différentes existent. La version la plus susceptible de constituer une référence à ce jour est celle tirée d'un article auquel Sheridan a contribué en 2000 (Parasuraman *et al.*, 2000, "A model for types and levels of human interaction with automation" [12]) : elle est assez récente ; elle est validée par le premier auteur du référentiel Sheridan 1D ; et elle participe à la présentation d'un référentiel plus riche, qui sera qualifié ci-après de référentiel *Sheridan 4D*. Ce tableau des niveaux du référentiel Sheridan 1D est ici reproduit et traduit en français (tableau 2.4).

Le niveau 1 correspond à une absence d'automatisation, le niveau 10 correspond à une automatisation complète, les niveaux intermédiaires correspondent à une automatisation partielle.

Quatre thèmes sont abordés successivement :

- Aux niveaux 2 – 4 : *L'abstraction*. Elle culmine au niveau 4 avec la suggestion de la meilleure alternative.
- Au niveau 5 : *L'action*. Elle est la mise en œuvre de l'alternative retenue.
- Aux niveaux 5 – 7 : *L'autorité* concédée à l'ordinateur. Au niveau 5, l'ordinateur a besoin du consentement explicite humain. Au niveau 6 l'ordinateur considère que le consentement de l'humain est implicite après un certain temps sans véto. Au niveau 7, l'ordinateur n'a pas besoin du consentement humain.
- Aux niveaux 7 – 9 : *Le feedback*. L'humain est informé systématiquement au niveau 7. Il est informé à sa demande au niveau 8. Il est informé seulement si l'ordinateur le décide au niveau 9.

Parmi ces quatre thèmes, *l'abstraction* et *l'autorité*, relèvent d'un thème complexe : celui de la *décision*.

TABLE 2.4 – Les dix niveaux du référentiel Sheridan 1D, le référentiel LOA présenté par Sheridan et Verplank en 1978, [8] tel que présenté en 2000 dans un article auquel Sheridan a contribué..[12]

Niveau	Description
1	L'ordinateur n'apporte aucune aide : l'humain doit prendre toutes les décisions et mener toutes les actions ( <i>The computer offers no assistance : human must take all decisions and actions</i> ).
2	L'ordinateur propose un ensemble complet de décisions alternatives et des actions correspondantes ( <i>The computer offers a complete set of decision/action alternatives</i> ), ou
3	réduit ces alternatives à un petit nombre ( <i>narrows the selection down to a few</i> ), ou
4	suggère une alternative ( <i>suggests one alternative</i> ), et
5	met en œuvre cette alternative si l'humain l'approuve ( <i>executes that suggestion if the human approves</i> ), ou
6	autorise un temps restreint à l'humain pour opposer son véto avant une implémentation automatique ( <i>allows the human a restricted time to veto before automatic execution</i> ), ou
7	implémente automatiquement, puis informe nécessairement l'humain ( <i>executes automatically, then necessarily informs humans</i> ), ou
8	informe l'humain en cas de demande ( <i>informs the human only if asked</i> ), ou
9	informe l'humain si et seulement si l'ordinateur décide de le faire ( <i>informs the human only if it, the computer, decides to</i> ).
10	L'ordinateur décide de tout et agit de façon autonome, ignorant l'humain ( <i>The computer decides everything and acts autonomously, ignoring the human</i> ).

La *décision* peut s'entendre comme le processus menant à l'identification, par construction, comparaison et élimination, d'un plan considéré comme le meilleur. Ce processus peut être assisté par des systèmes automatisés s'il y a *aide à la décision*. L'aide à la décision permet à l'humain de déléguer la gestion des détails aux systèmes automatisés et ainsi de gagner en *abstraction*.

La *décision* peut aussi s'entendre comme l'acte d'ordonner la mise en œuvre d'un plan. Dans ce cas, la décision s'attache à établir comment l'humain ou les systèmes automatisés peuvent se trouver en situation d'*autorité* de pouvoir ordonner cette mise en œuvre.

Le *feedback* n'a pas été repris par les référentiels LOA ultérieurs qui vont être présentés dans cette bibliographie, y compris par Sheridan 4D. Actuellement, ce thème est associé aux interfaces homme-machine, une spécialité ayant gagné en autonomie depuis 1978 (e.g. : Quigley *et al.*, 2004, "Semi-autonomous human-UAV interfaces for fixed-wing mini-UAVs" [40]).

Abstraction, action, autorité : d'autres référentiels abordent ces thèmes, ou d'autres, avec des nuances portant sur les contenus et les appellations. Pour faciliter la comparaison des référentiels entre eux, nous privilierons certaines dénominations. La dénomination du thème de l'action est empruntée au référentiel Sheridan 4D (2000). Les dénominations des thèmes de l'autorité et de l'abstraction sont empruntées au référentiel LoA<sup>3</sup> (2008). Ces emprunts de termes à des référentiels plus récents visent à mettre en avant la filiation des thèmes majeurs.

Dans le référentiel Sheridan 1D, les quatre thèmes abordés sont traités au sein d'une même échelle LOA avec dix niveaux. De nombreuses situations s'accordent de cette échelle car elles se conforment aux hypothèses suivantes :

- Pour que les systèmes automatisés puissent prendre l'initiative d'une action (niveau 6 ou niveau 7), il faut qu'ils disposent d'eux-mêmes de la meilleure alternative (niveau 4) et de la capacité de la mettre en œuvre seuls (niveau 5).
- Pour que l'humain n'ait aucune idée des conséquences de la mise en œuvre, il faut qu'il n'ait pas pris part à cette dernière.

Cependant ces hypothèses ne sont pas toujours vérifiées, et les situations correspondantes ne peuvent pas alors s'inscrire harmonieusement dans Sheridan 1D. Considérons par exemple la situation d'un opérateur des senseurs recevant l'instruction suivante : "Tel drone se dirige vers tel bateau pour que vous puissiez l'observez, préparez-vous à cette observation. Vous rendrez ensuite compte de la situation à votre supérieur." Dans ce cas l'humain est sollicité pour la mise en œuvre indépendamment des modalités de la prise de décision.

De même, une information peut être filtrée par les systèmes automatiques s'ils la jugent sans intérêt, et ce sans rien augurer des modes de décision et de mise en œuvre.

L'échelle unique de Sheridan 1D suppose donc une hiérarchie des thèmes de l'automatisation. Cette hiérarchie est établie par des liens de dépendance mono-directionnels entre ces thèmes. Cette vision est mise à mal par les systèmes actuels constitués de spécialistes (parfois humains, parfois non) liés par des liens bi-directionnels d'interdépendance.

Le référentiel Sheridan 4D, présenté en 2000, permettra de s'affranchir de la vision monolithique du référentiel Sheridan 1D en proposant une dimension indépendante par thème. Mais d'autres référentiels ont entre-temps exploré la voie d'une échelle LOA unique, comme le référentiel proposé par l'AGARD en 1986.

## 2.2.2 1986 : AGARD

L'AGARD (*Aerospace Research and Development*), dans une publication de 1986, "Improved guidance and control automation at the man-machine interface" propose sept niveaux d'automatisation. Cela représente trois niveaux de moins que Sheridan 1D. Cependant, le niveau le plus élevé est "Autonomie avec contrôle humain direct", avec des pilotes que l'on suppose à bord du véhicule. Aussi certains auteurs (c.f. : [1] en 2007) ajoutent deux niveaux spécifiques aux drones, dont les pilotes ne sont pas embarqués, pour un total de neuf niveaux. Ces neuf niveaux sont les suivants :

1. *Aucune automatisation (No Automation)*, comme pour le niveau 1 du référentiel Sheridan 1D.
2. *Manuel assité (Manual Augmented)*. Le pilotage manuel est assité. Les systèmes automatisés assistent l'humain par la prise en charge de tâches simples (dites de bas niveau). Des systèmes de ce type peuvent contrôler une variable comme la vitesse ou la pression, ou prendre en charge des actions simples, comme l'enregistrement périodique de ce que perçoit un capteur.
3. *Manuel assisté et limité (Manual Augmented and Limited)*. Le pilotage manuel humain est assisté et limité. Les systèmes automatisés contrôlent des tâches de bas niveau et peuvent en plus limiter la portée des instructions données par l'humain. Par exemple, l'ABS d'une voiture limite la subordination du système de freinage aux instructions exprimées par le conducteur à travers la pression qu'il exerce sur la pédale de frein. Les limitateurs de vitesse à bord des véhicules routiers relèvent également de ce niveau d'automatisation.
4. *Coopératif (Cooperative)*. Le pilotage manuel humain est assisté, limité et complété. Les systèmes automatisés complètent le contrôle manuel pour se conformer à des directives. Un exemple est celui du re-positionnement dynamique d'un bateau en réactions aux turbulences ambiantes. Un autre exemple est celui du régulateur de vitesse, qui à la différence du limiteur de vitesse peut faire accélérer le véhicule.
5. *Automatisme pré-sélectionné (Automatic Pre-Select)*. Dans la pratique, ce niveau correspond à l'exécution par les systèmes automatiques d'instructions préparées. C'est le niveau d'automatisme des pilotes automatiques à bord des avions.
6. *Automatisme sélectionné (Automatic Select)*. Ce niveau correspond à des automatismes plus dynamiques, comme la navigation automatique d'après des points de passage quand la trajectoire est à l'appréciation des systèmes automatisés.
7. *Autonomie avec contrôle humain direct (Autonomous Manned Operation)*. À ce niveau, l'humain est à bord du véhicule et supervise, mais tout est pris en charge par les systèmes automatisés. Du fait de l'absence de pilote à bord des drones, certains auteurs proposent de considérer que les drones appartiennent à un huitième niveau ce distinguant du septième niveau par cette absence de pilote embarqué. [1] Ce niveau serait *Autonomie sans contrôle humain direct (Autonomous Unmanned Operation)*. On pourrait même envisager un neuvième niveau, sans contrôle humain (autonomie totale) : *Autonomie (Autonomous Operation)*.

Des systèmes de différents niveaux peuvent se compléter. Par exemple, un pilote automatique (niveau 4, coopératif) peut être complété par un système limitant (niveau 3, manuel augmenté et limité) pour refuser une instruction si elle est dangereuse au moment où elle est donnée.

Avec le référentiel AGARD, il est maintenant clair qu'**au delà d'un niveau d'automatisation globale d'un système, chaque composant de ce système peut disposer d'un niveau d'automatisation autre.**

TABLE 2.5 – Le référentiel AGARD présenté en deux dimensions.

		Abstraction			
		Nulle	Très simple	Scriptée	Autonome
Autorité	Nulle	1 ( <i>No Automation</i> )	2 ( <i>Manual Augmented</i> )		
	Accord humain explicite			5 ( <i>Automatic Pre-Select</i> )	6 ( <i>Automatic Select</i> )
	Accord humain implicite		3 ( <i>Manual Augmented and Limited</i> ) & 4 ( <i>Cooperative</i> )		7 ( <i>Autonomous Operation</i> )

Le thème de l'abstraction est présent dans le référentiel AGARD. Ce thème était déjà présent dans Sheridan 1D et il sera repris par la dimension 2 du référentiel LoA<sup>3</sup>, proposé en 2008, et par les dimensions 1 et 2 du référentiel 7D, proposé en 2012. Cette tendance souligne l'importance de pouvoir diriger un système automatisé en lui assignant simplement des buts et en le laissant autonome pour la mise en œuvre.

Le thème de l'abstraction est imbriqué avec celui de l'autorité. Ainsi, aux niveaux 3 et 4, *Manual Augmented and Limited* et *Cooperative*, l'abstraction est faible, mais l'autorité est grande puisque les systèmes automatisés corrigent le pilotage humain. Le niveau correspondant dans le référentiel Sheridan 1D est élevé : il est au minimum de 7 puisque l'humain n'a pas l'opportunité d'opposer un veto. Dans l'exemple de l'ABS, il est de 10 (soit le maximum) puisqu'aucun effort n'est fait pour informer le pilote humain.

De même, les niveaux 5 et 6 du référentiel AGARD – *Automatic Pre-Select* et *Automatic Select* – mêlent les thèmes de l'abstraction et de l'autorité. Aux niveaux 5 et 6 du référentiel AGARD, l'abstraction est plus grande qu'aux niveaux 3 et 4, mais l'autorité est plus faible puisque la mise en œuvre est subordonnée à l'accord explicite de l'humain. C'est seulement au niveau 7, *Autonomous Manned Operation*, que l'abstraction et l'autorité culminent simultanément.

Cette imbrication des deux thèmes de l'abstraction et de l'autorité invite à présenter le référentiel AGARD comme un système bi-dimensionnel, ce que fait le tableau 2.5. Le tableau n'est pas rempli de façon homogène. Cette présentation confirme l'intérêt des approches à plusieurs dimensions, chacune se focalisant sur un thème unique.

L'ONERA utilise un référentiel à cinq niveaux très proche du référentiel AGARD pour certains projets. [41] Le tableau 2.6 rapproche les cinq niveaux de ce référentiel avec ceux du référentiel AGARD.

Le référentiel AGARD se concentre sur l'abstraction, l'autorité et l'action. Pour ces thèmes, il est à la fois plus précis et moins restrictif que Sheridan 1D.

Plus compact et abordant un thème de moins, le référentiel AGARD est plus épuré que le référentiel Sheridan 1D. Cet avantage est poussé plus loin par le référentiel PACT.

TABLE 2.6 – Rapprochement de niveaux utilisés pour des projets de l'ONERA [41] avec ceux du référentiel AGARD.

ONERA	AGARD	
<i>Emergency manual</i>	1	<i>No Automation</i>
<i>Nominal manual – Assisted</i>	3	<i>Manual Augmented and Limited</i>
<i>Nominal manual – High level</i>	4	<i>Cooperative</i>
<i>Nominal autopiloting – Operator flight plan</i>	5	<i>Automatic Pre-Select</i>
<i>Nominal autopiloting – Autonav</i>	6	<i>Automatic Select</i>

### 2.2.3 2000 : PACT

Le référentiel PACT (*Pilot Authorisation and Control of Tasks*) propose six niveaux au lieu des sept de base du référentiel AGARD. Ce référentiel est issu du système COGPIT PACT proposé en 2000 par Bonner, Taylor, Fletcher et Miller (c.f. : “Adaptive automation and decision aiding in the military fast jet domain” [42]).

Le référentiel PACT a été explicitement proposé par ses auteurs comme une simplification du référentiel Sheridan 1D. Il est intéressant de constater que ce travail date de la même année que le référentiel Sheridan 4D qui au contraire étoffe le référentiel Sheridan 1D, et ce avec la contribution de Sheridan lui-même.

Le référentiel PACT envisage l’automatisation adaptive qui est la possibilité, à l’initiative des systèmes automatisés, de changer de niveau d’automatisation. Le référentiel PACT partage avec le référentiel Sheridan 4D cet intérêt pour l’automatisation adaptive. Ce thème faisait donc l’objet d’un certain consensus en 2000.

Si AGARD a introduit la possibilité pour chaque composant d’un système d’avoir un niveau d’automatisation propre, **l’automatisation adaptive introduit la possibilité pour un niveau d’automatisation de varier en fonction des circonstances.**

Les thèmes du référentiel PACT sont les mêmes que ceux du référentiel AGARD : l’autorité, l’abstraction et l’action. Deux niveaux classiques se retrouvent aux extrémités en cas d’absence totale d’automatisation ou en cas d’automatisation totale.

L’absence d’automatisation est niveau 0 dans le référentiel PACT alors qu’elle est niveau 1 dans le référentiel AGARD et dans le référentiel Sheridan 1D, dans lesquels il n’y a pas de niveau 0. **Ce niveau 0 pour l’absence d’automatisation nous semble plus explicite.**

La description du référentiel PACT est reprise et traduite dans le tableau 2.7. Une correspondance est faite avec les niveaux du référentiel Sheridan 1D en dernière colonne.

Deux remarques sur le référentiel PACT par rapport au référentiel Sheridan 1D :

- C’est essentiellement les derniers niveaux du référentiel Sheridan 1D, consacrés au thème du feedback, qui ont par leur disparition permis la réduction du nombre de niveaux.
- Le thème de l’aide à la décision est abordé différemment, avec un intérêt pour l’aspect “à la demande” plutôt que sur celui de la réduction du nombre d’alternatives (Sheridan 1D – 2 : aucune réduction ; Sheridan 1D – 3 : réduction partielle ; Sheridan 1D – 4 : réduction à une unique alternative).

Les niveaux du référentiel PACT peuvent être alloués à plusieurs composants et à plusieurs phases. Cela permet de proposer une représentation graphique de l’automatisation telle que le fait

TABLE 2.7 – Le référentiel PACT [11]. Une correspondance avec les niveaux du référentiel Sheridan 1D a été ajoutée en dernière colonne.

PACT				Sheridan 1D
Niveau		Autonomie des systèmes automatisés	Autorité du pilote	Niveau
0	Sous tutelle ( <i>Under Command</i> )	Aucune	Complète	1
1	À la demande ( <i>At Call</i> )	Conseillent à la demande	Complète	2 – 4
2	Conseille ( <i>Advisory</i> )	Peuvent conseiller	Peut accepter les conseils	
3	Assiste ( <i>In Support</i> )	Peuvent agir, si autorisation	Peut autoriser la mise en œuvre d'un conseil	5
4	Supplée ( <i>Direct Support</i> )	Peuvent agir, sauf si veto	Peut révoquer ( <i>revoke</i> )	6
5	Automatique ( <i>Automatic</i> )	Totale	Peut interrompre	7

COGSIM dans Fig. 2.8 (c.f. : Taylor et al., 2000, “Cognitive Cockpit Engineering : Coupling Functional State Assessment, Task Knowledge Management, and Decision Support for Context-Sensitive Aiding” [11]). D’autres adoptent une visualisation de type “tableau croisé dynamique” quand les phases de la mission se succèdent linéairement, comme dans Fig. 2.7.

Cet ajout de deux dimensions, une pour la temporalité de la mission, et l’autre pour l’agrégation des sous-systèmes entre eux, est également possible pour les autres référentiels.

**À THALES, il semble que le référentiel PACT soit le référentiel le plus utilisé.** Il est en tout cas utilisé par plusieurs groupes travaillant sur des drones aériens et sous-marins. D’autres référentiels y sont connus mais moins influents, comme le référentiel Sheridan 4D. En témoigne l’article “Joint Human-Automation Cognition through a Shared Representation of 4D Trajectory Management” issu d’une collaboration impliquant l’équipe dédiée aux facteurs humains et à la cognition (*Human Factors and Cognition Team*) de Thales Research and Technology en Hollande (c.f. : [43], 2012)

L’intérêt du référentiel PACT est d’être très compact avec une unique dimension de six niveaux consacrés à trois thèmes de l’automatisation : l’autorité, l’abstraction et l’action. Le référentiel PACT peut être complété par d’autres dimensions.

**Le point faible du référentiel PACT est peut être son incapacité à dégager systématiquement une vue d’ensemble de qui fait quoi.** Dans Fig. 2.8, cette vision est apportée par la dimension portant sur l’interface du cockpit.

Le référentiel Sheridan 4D, proposé la même année que le référentiel PACT, en 2000, n’a pas cet inconvénient de PACT. Sheridan 4D offre au contraire une vue d’ensemble grâce à ses dimensions portant sur quatre aspects de ce qui peut être automatisé : l’acquisition, l’analyse, la décision et l’action.

		Possible UUV PACT Contract Levels						
			Launch	Transit	Search	Recovery tp Position	Recovery Transit	Recovery tp Position
Control Vehicle	AUTOMATIC	5			5			
	DIRECT SUPPORT i ACTION	4			5			
	IN SUPPORT i (ACTION)	3			5			
	ADVISORY i	2			5			
	AT CALL (i)	1			5			
	COMMANDED	0			5			
Navigate			Capture target			5		
			Avoid target			5		
			Terrain avoidance	5	5	5	5	5
			Identify waypoints		4		4	
			Monitor position	5	5	5	5	5
			Update route plan		3		3	3
Manage Systems			Manage DAS	4	4	5	4	4
			Manage weapons	0	0	5	0	0
			Manage fuel	5	5	5	5	5
			Manage unexpected	0	0	5	0	0
			Progress time mgt	2	2	5	2	2
			Assess situation	0	2	5	2	0
Manage Mission								

FIGURE 2.7 – Mission d'un drone sous-marin décrite avec le référentiel PACT dans un “tableau croisé dynamique” (source : [1]).

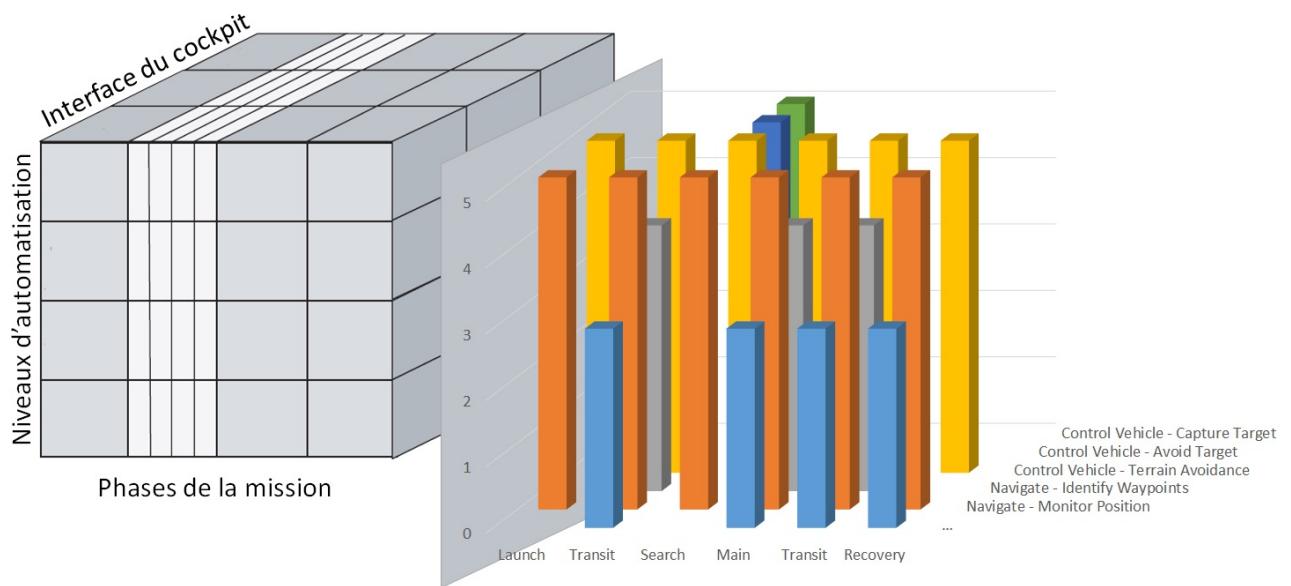


FIGURE 2.8 – À gauche en gris, reprise partielle et traduite d'une figure illustrant la vue COGSIM (source : [11]). À droite en couleurs, reprise partielle des données PACT de Fig. 2.7 avec les mêmes axes que la vue COGSIM : les phases de la mission en X, les niveaux d'automatisation en Y et l’“interface” de la mission en Z. Les valeurs originales pour l'axe COGSIM de l'interface sont : *Visual*, *Audio* et *Tactile*. Les valeurs originales pour l'axe COGSIM des niveaux d'automatisation sont : *Coach*, *Associate*, *Assistant* et *Display*.

## 2.2.4 2000 : Sheridan 4D

Le référentiel Sheridan 4D a été proposé en 2000 par Parasuraman, Sheridan et Wickens dans un article intitulé “A model for types and levels of human interaction with automation”. [12] Chacun de ces trois auteurs est connu pour d’autres contributions significatives : Sheridan est connu pour le référentiel Sheridan 1D ; [8] Parasuraman est le premier auteur de “Humans and automation : Use, misuse, disuse, abuse” ; [30] Wickens est un autre spécialiste des difficultés de l’automatisation (c.f. : Dixon *et al.*, 2006, “Automation Reliability in Unmanned Aerial Vehicle Control : A Reliance-Compliance Model of Automation Dependence in High Workload” [44]).

Les quatre dimensions du référentiel Sheridan 4D sont les suivantes :

1. L’*acquisition* (*Acquisition*) est la perception et l’enregistrement des données brutes. Un exemple d’acquisition dont le niveau d’automatisation n’est pas minimal est celui des radars militaires qui se calent sur une cible détectée de leur propre chef. L’acquisition est un thème qui était absent du référentiel Sheridan 1D.
2. L’*analyse* (*Analysis*) porte sur les processus d’inférence. Un exemple d’un haut niveau d’automatisation pour l’analyse est lorsque la cible de plusieurs radars est identifiée comme une cible unique. [29] Il n’est pas évident de systématiquement rattacher l’analyse à l’acquisition, que l’analyse complète. Il n’est pas non plus évident de systématiquement rattacher l’analyse à la décision, que l’analyse précède. En cela, l’analyse peut de plein droit constituer un thème en elle-même.
3. La *décision* (*Decision*) est, d’après les auteurs du référentiel Sheridan 4D, le référentiel Sheridan 1D. Cette proposition n’est pas des plus limpides puisque Sheridan 1D dans son ensemble porte sur quatre thèmes. Or deux de ces deux thèmes – l’action (la mise en œuvre) et le feedback – sont étrangers à la décision. Deux autres thèmes du référentiel Sheridan 1D composent au contraire la décision : l’abstraction et l’autorité.
4. L’*action* (*Action*) est la mise en œuvre d’un plan.

Les échelons dans ces quatre dimensions ne sont pas précisés, ce qui ne permet pas en l’état d’utiliser le référentiel Sheridan 4D pour classifier des systèmes partiellement automatisés. Fig. 2.9 compare cependant deux systèmes A et B d’après les quatre dimensions du référentiel Sheridan 4D.

En plus des quatre thèmes de ses quatre dimensions, le référentiel Sheridan 4D aborde un cinquième thème, celui de l’adaptation. Il est en effet possible, avec le référentiel Sheridan 4D, de changer le niveau d’automatisation dans chacune des quatre dimensions. Cette possibilité est à l’initiative des systèmes automatisés, il s’agit d’adaptation adaptive (*adaptive automation*). Ce positionnement est le même qu’avec le référentiel PACT.

Les auteurs du référentiel Sheridan 4D donnent l’exemple suivant d’adaptation adaptive. Pour éviter une collision, un avion pourrait augmenter son niveau d’automatisation. De même, en cas de problème au décollage, et en fonction du temps disponible, le niveau d’automatisation pourrait drastiquement augmenter ou diminuer.

Ce qui doit être retenu de l’adaptation adaptive, c’est qu’elle est à l’initiative des systèmes automatisés, qui peuvent choisir de changer le niveau d’automatisation. Cette adaptation est à comparer avec l’automatisation adaptable (*adaptable automation* ; c.f. : Kidwell *et al.*, 2012, “Adaptable and adaptive automation for supervisory control of multiple autonomous vehicles” [45]). L’adaptation adaptable est au contraire à l’initiative de l’humain. Un troisième type d’adaptation est envisageable, celui avec lequel les deux adaptations précédentes coexistent, avec différentes politiques possibles, comme celle du “premier arrivé, premier servi”, ou celle du consensus.

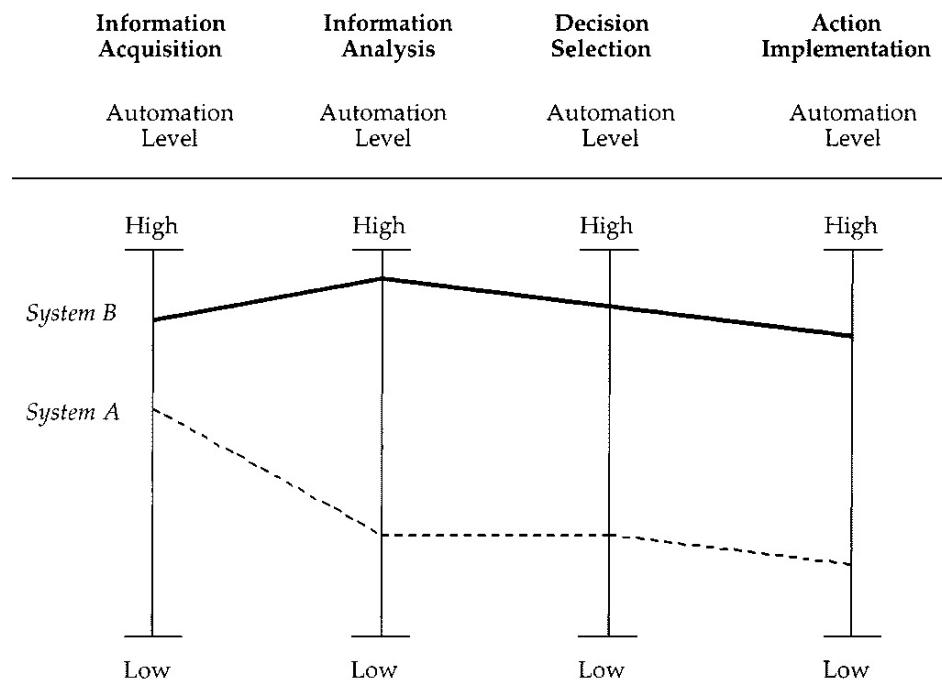


FIGURE 2.9 – Le référentiel Sheridan 4D comparant deux systèmes A et B (source : [12]).

Parasuraman a ensuite travaillé avec Miller, qui lui avait travaillé sur le référentiel PACT, et qui ensuite travailla sur le référentiel LoA<sup>3</sup>. Après une divergence en 2000 sur l'héritage du référentiel Sheridan 1D, avec d'un côté le référentiel PACT qui le simplifie et d'un autre côté le référentiel Sheridan 4D qui l'étend, une synthèse semble donc se dégager en 2008 avec le référentiel LoA3.

### 2.2.5 2008 : LoA<sup>3</sup>

Le référentiel LoA<sup>3</sup> (à prononcer “LOA cubed” et avec un “o” minuscule) est un autre référentiel avec plusieurs dimensions, comme le référentiel Sheridan 4D. Il a été proposé par Funk et Miller dans un article de 2008 intitulé “Delegation in LoA3 space”. [13] Miller avait travaillé sur le référentiel PACT en 2000. Il a par la suite collaboré avec Parasuraman, qui lui avait travaillé sur le référentiel Sheridan 4D, également en 2000. Deux collaborations importantes de ces deux auteurs entre 2000, (l'année de la présentation des référentiels PACT et Sheridan 4D) et 2008 (l'année de la présentation du référentiel LoA3) ont été : “Beyond levels of automation : An architecture for more flexible human-automation collaboration” en 2003 et “Designing for flexible interaction between humans and automation : Delegation interfaces for supervisory control” en 2007. Ces collaborations témoignent des forts liens de filiation entre les différents principaux référentiels. On pourrait aussi y voir une forme de consanguinité.

Les trois dimensions de LoA<sup>3</sup> sont les suivantes :

1. L'autorité (Authority). Dans la présentation des autres référentiels, le concept d'autorité était emprunté à cette dimension de LoA<sup>3</sup>. Le thème de l'autorité porte sur comment un humain ou des systèmes automatisés peuvent se trouver en situation d'autorité telle qu'ils puissent ordonner la mise en œuvre d'un plan.

2. L'abstraction (*Abstraction*). Dans la présentation des autres référentiels, le concept d'abstraction était également emprunté à cette dimension de LoA<sup>3</sup>. L'abstraction propose à l'humain d'être plus ou moins précis dans ses instructions. Par exemple, l'instruction donnée à un véhicule de se rendre à un certain endroit, sans plus de détails quant à la façon de procéder, est une instruction avec un haut niveau d'abstraction. Pour s'y conformer, le véhicule a besoin de beaucoup d'autonomie.
3. L'agrégation (*Aggregation*) permet de grouper les destinataires des instructions. Par exemple, une instruction peut être donnée à un groupe de véhicules. Cette dimension est un bon indicateur du ratio *nombre de drones / nombre d'humains*

Il ressort des référentiels présentés jusqu'à là – incluant LoA<sup>3</sup> – que le thème le plus consensuel est celui de la décision à travers deux de ses aspects : l'autorité et l'aide à la décision, cette dernière permettant l'abstraction. Le référentiel LoA<sup>3</sup> a le mérite de faire explicitement la distinction entre ces deux aspects en y consacrant deux dimensions dédiées. L'autorité est la première dimension de LoA<sup>3</sup>.

L'agrégation est cette fois une dimension de base, et non une dimension complémentaire optionnelle. Au contraire, les différentes phases de la mission continuent à faire l'objet d'une dimension complémentaire. Les phases n'ont pas à se succéder de façon linéaire, elles sont plutôt organisées dans un graphe de phases similaire à un graphe d'états (c.f. : Fig. 2.10). Un tel graphe de phases est appelé un "play" en référence aux jeux que peuvent jouer les footballeurs lors d'un match, tels que "jouer offensif", "jouer défensif" ou même "jouer la montre". Il est possible de changer de jeu en cours de match. L'ensemble des jeux est consigné dans un cahier stratégique, le "playbook", d'où le nom du système proposé par Miller *et al.* (c.f. : Miller *et al.*, 2004, "A playbook approach to variable autonomy control : Application for control of multiple, heterogeneous unmanned air vehicles" [46] et Miller *et al.*, 2005, "The Playbook Approach to Adaptive Automation" [47]).

Dans la pratique, un "play" s'apparente à une procédure telle que celles utilisées à THALES Systèmes Aéroportés (c.f : Fig. 2.11).

Il manque au référentiel LoA<sup>3</sup>, comme au référentiel Sheridan 4D, des niveaux précis pour qualifier les situations d'automatisation. Jusqu'alors, seuls les référentiels avec une unique dimension (Sheridan 1D, AGARD, PACT) ont de tels niveaux. Le référentiel 7D, en 2012, va constituer le premier référentiel avec plusieurs dimensions et des niveaux précis dans chacune.

## 2.2.6 2012 : 7D

Le référentiel 7D a été proposé en 2012 lors d'un workshop de l'OTAN pour constituer une synthèse des propositions de référentiels LOA. Le référentiel 7D est dérivé de C<sup>3</sup> et de LoA<sup>3</sup>. Une synthèse a été rédigée par Miller (déjà mentionné pour son travail sur LoA<sup>3</sup> et PACT) et par Chris. Le titre de cette synthèse est "Frameworks for Supervisory Control : Characterizing Relationships with Uninhabited Vehicles". [14]

Le référentiel 7D a sept dimensions. Comme pour les deux premières dimensions du référentiel LoA<sup>3</sup>, ces dimensions permettent de préciser la nature de l'automatisation des tâches, et non de préciser la nature des tâches automatisées, comme le fait le référentiel Sheridan 4D avec quatre thèmes (acquisition, analyse, décision, action). Si le référentiel 7D est beaucoup plus précis que le référentiel Sheridan 4D, il ne permet pas de dégager une vue de qui fait quoi comme le fait le référentiel Sheridan 4D .

Les sept dimensions de 7D sont les suivantes :

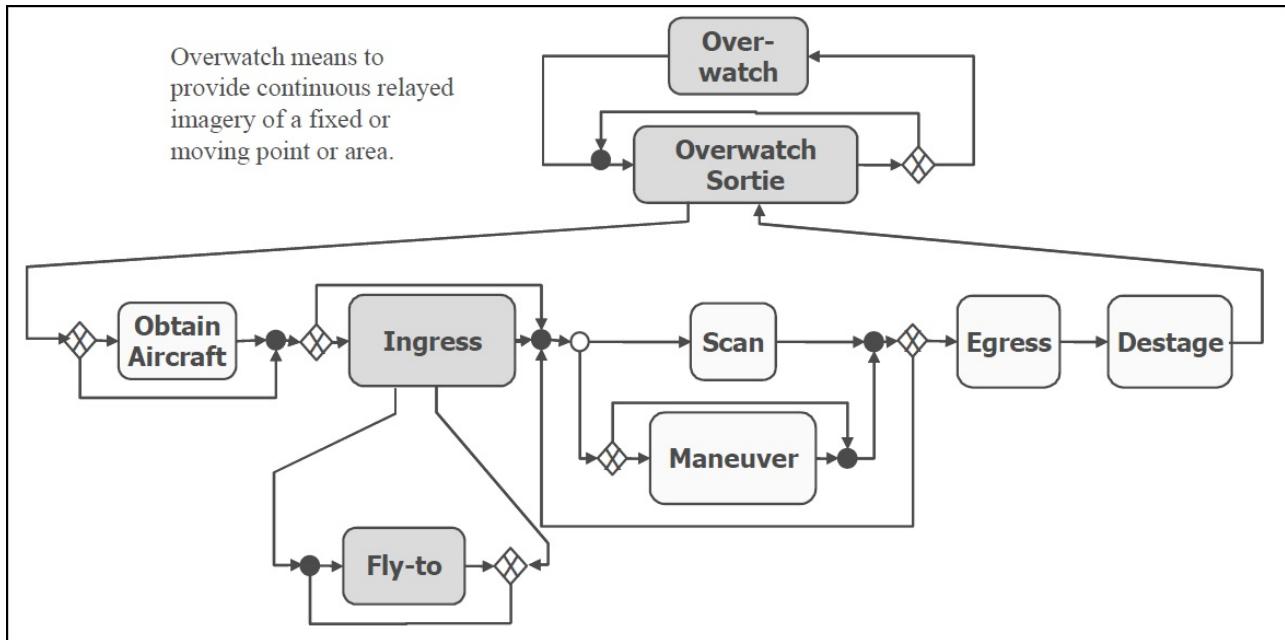


FIGURE 2.10 – Overwatch Play (source : [46]).

1. *Time Span* (T) provient de l'abstraction de LoA<sup>3</sup> et exprime la durée de la tâche.
2. *Diversity* (D) provient aussi de l'abstraction de LoA<sup>3</sup> et exprime la diversité des tâches.
3. *Vehicles/Subsystems* (VS) provient de l'agrégation de LoA<sup>3</sup> qui donnait une bonne indication du ratio *nombre de drones / nombre d'humains*. Il ne s'agit pas ici d'un ratio mais du nombre de véhicules et/ou de sous-systèmes concernés par une mission.
4. L'autonomie (*Autonomy*) (A) provient de l'autorité de LoA<sup>3</sup>. Le changement de dénomination est à noter, d'autant plus que l'autonomie est un terme très discuté. Ici l'autonomie est synonyme d'autorité, avec comme corollaire l'absence de soumission à une autorité externe. À noter la position centrale de cette dimension, qui en souligne l'importance.
5. *Behavioral Change Frequency* (BFrq) provient de *Complexity* de C<sup>3</sup> et exprime la fréquence avec laquelle le comportement est modifié.
6. *Operator to Vehicle Ratio* (Op) provient de *Op Capabilities* de C<sup>3</sup>. Dans la perspective d'augmenter le ratio *nombre de drones / nombre d'humains*, il est évident que cette dimension fournit un moyen très pratique de comparer des systèmes entre eux.
7. *Operator Intervention Frequency* (IFrq) provient de *UV Capabilities* de C<sup>3</sup> et exprime la fréquence des interventions humaines. Elle n'est pas indépendante de la durée de la tâche (la première de ces sept dimensions). D'aucun pourrait aussi y voir une autre forme d'autonomie des systèmes automatisés vis-à-vis de l'humain (la quatrième de ces sept dimensions), avec une autonomie d'autant plus grande que l'humain intervient rarement.

Le référentiel Sheridan 1D, proposé initialement dans le cadre d'une réflexion sur les périscopes des sous-marins, a été utilisé très largement dans l'automatisation. De même, le référentiel Sheridan 4D a une portée générique même s'il se réfère majoritairement aux drones. 7D est beaucoup plus

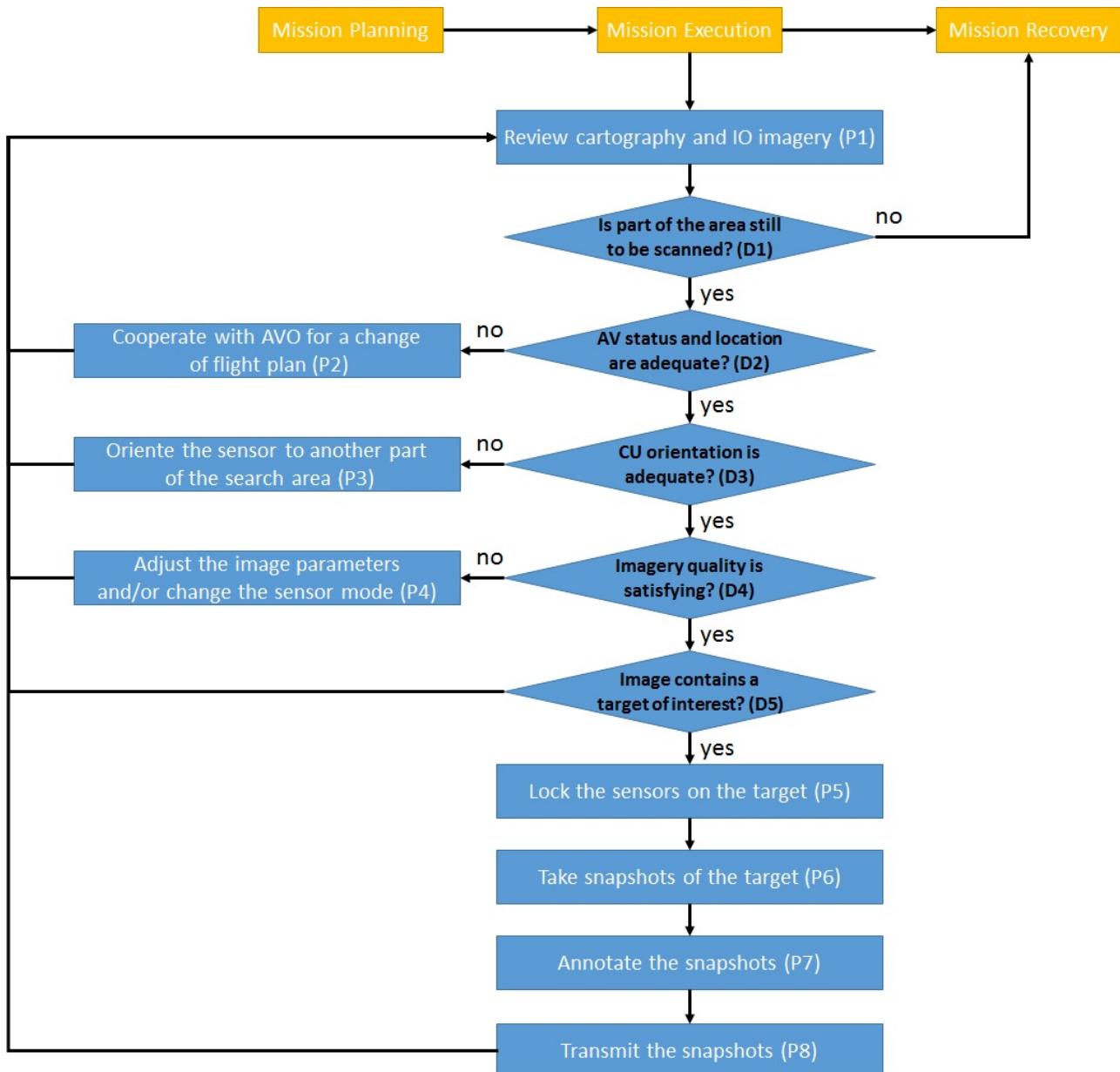


FIGURE 2.11 – Procédure (source : d'après une figure de THALES Systèmes Aéroportés [20]) qui peut être interprétée comme un “play” avec l'approche Playbook.

spécialisé avec des échelons pour ces sept dimensions qui correspondent précisément aux performances actuelles des systèmes de drones. Si cette spécialité limite la portée générique de 7D, elle permet par contre un positionnement très fin des systèmes de drones.

Sans reproduire et traduire en totalité chacune de ces sept dimensions, il est intéressant d'en fournir un échantillon pour illustrer cette spécialisation et cette précision. Ainsi, la durée de la tâche (dimension 1) dispose des sept niveaux suivants :

1. *Durée de la tâche* (T)

- (a) Secondes
- (b) 1 – 5 minutes
- (c) 5 – 30 minutes
- (d) 30 – 90 minutes
- (e) 1.5 – 6 heures
- (f) 6 – 24 heures
- (g) Plusieurs jours

De même pour la diversité (dimension 2), l'échelon dépend du nombre de types de tâches auxquels l'UMV (Unmanned Vehicle) prend part.

2. *Diversité* (D)

- (a) 1
- (b) 2 – 3
- (c) 4 – 6
- (d) 7 – 10
- (e) 11 – 15
- (f) 16 – 25
- (g) 25+

Toutes les dimensions de 7D ont sept échelons, ce qui donne une certaine esthétique au référentiel et permet de produire directement des graphes radars, comme dans cette traduction du schéma récapitulatif de 7D (Fig. 2.12). On peut aussi y voir une normalisation artificielle des valeurs possibles d'axes n'ayant pas (ou que peu) de rapports entre eux.

D'après Miller [48] : “Initial presentations of the seven-parameter approach were met with some skepticism by members of the NATO working group. The primary objection was that the seven dimensions were too complex for the framework to be easily used and understood.” En français : “Les premières présentations du modèle avec sept paramètres ont été accueillies avec un certain scepticisme par des membres du groupe de travail de l'OTAN. La première objection était que sept dimensions étaient trop complexes pour que le référentiel puisse être facilement utilisé et compris”.

On peut en effet juger que les dimensions de 7D produisent une information peu lisible :

- Les sept axes ont sept niveaux avec des valeurs à chaque fois spécifiques. Cela fait 49 valeurs à mémoriser pour pouvoir lire le graphique radar sans avoir à consulter le référentiel.
- Sept axes, cela fait beaucoup ! Si comme le donne à penser la figure 2.12, le but est de traiter des caractéristiques du drone, des caractéristiques des tâches, des caractéristiques de l'opérateur et de l'autorité des systèmes automatisés, ne pourrait-on pas envisager quatre axes plus synthétiques ?

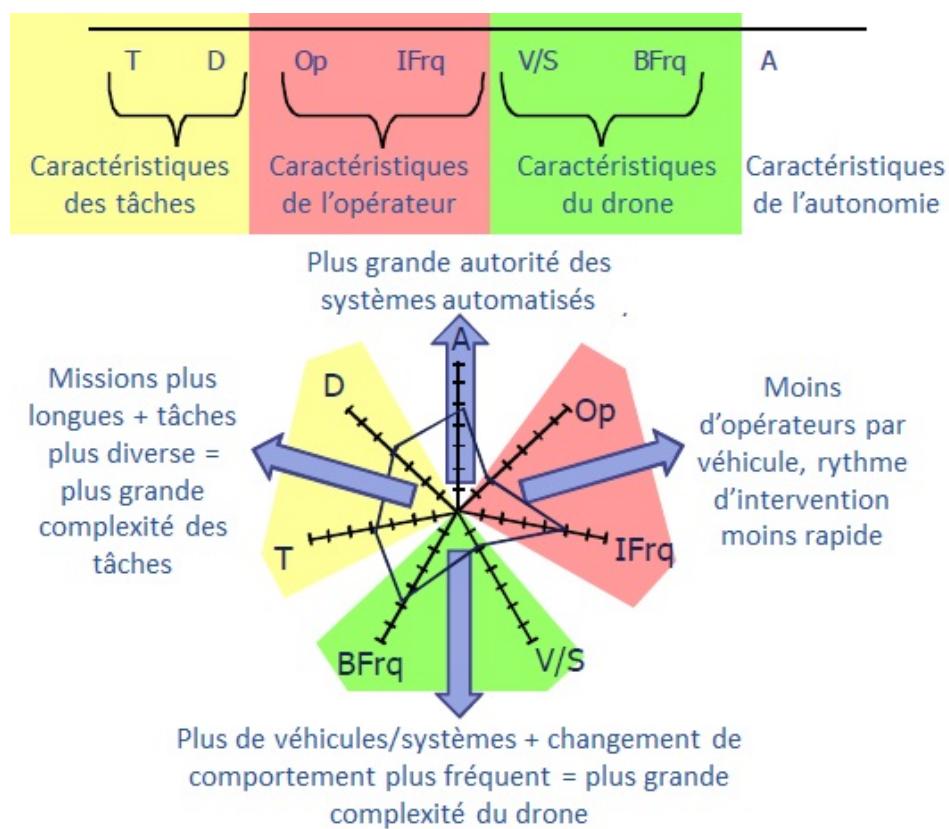


FIGURE 2.12 – Traduction du schéma récapitulatif de 7D (source : [48]).

- La complexité de 7D ne permet globalement pas d'appréhender en temps réel les nuances entre des drones hétérogènes dans le cadre d'un système multi-agents.
- Plus généralement, en tant qu'outil de comparaison, les sept dimensions de 7D le desservent. Avec sept axes, il est peu probable qu'une solution émerge comme dominant les autres. Il est probable qu'au contraire de nombreuses solutions proposent des trade-offs variés. On pourrait même soupçonner que cela ait été là le résultat nécessaire de ce workshop où de nombreuses contributions étaient représentées.
- 7D n'a donc pas la portée générique attendue d'un référentiel. Ses sept niveaux de chacun de ses sept dimensions n'ont pas de sens dans d'autres domaines applicatifs. Ils n'auront peut-être même plus de sens dans quelques années quand les techniques pour les drones auront évoluées et que de nouveaux ordres de grandeur seront d'actualité.

En somme, 7D est beaucoup trop spécifique pour être réellement intéressant. Ce référentiel pourrait conforter certains points de vue très négatifs sur l'actualité de la modélisation de l'autonomie, tel que celui du *Defence Science Board* en 2012 [7] regrettant que les études sur les niveaux d'autonomie ne soient pas particulièrement utiles.

### 2.2.7 Autres propositions

D'autres propositions ont été faites, mais les six référentiels déjà présentés représentent les propositions les plus influentes.

Plusieurs autres propositions ne présentent pas un référentiel inédit mais seulement un complément à un référentiel existant. Cummings, par exemple, propose de compléter Sheridan 1D avec une dimension dédiée à l'autonomie du réseau de drones et plus précisément au niveau de collaboration entre les véhicules (c.f. : Cummings, 2004, "Human supervisory control of swarming networks" [49]). Cette collaboration entre les véhicules peut se généraliser à la collaboration entre deux systèmes automatisés. Les niveaux de cette dimension sont les suivants :

- Les véhicules ne communiquent pas entre eux et se conforment au plan tant que l'humain n'identifie pas une nouvelle tâche.
- Les véhicules communiquent entre eux pour harmoniser la façon dont ils se conforment au plan, évitant par là des conflits, mais dépendent toujours de l'humain pour identifier une nouvelle tâche.
- Les véhicules collaborent et l'humain n'interagit qu'avec le véhicule leader.
- Les véhicules collaborent, ils décident de nouvelles tâches et se les répartissent de façon autonome, l'humain n'intervient pas.

La diversité de ces autres propositions témoigne surtout de la multiplicité des besoins. Il est par conséquence impossible de proposer un référentiel universel et il faut se satisfaire d'un référentiel "intéressant".

L'objectif d'un référentiel est en partie de pouvoir comparer le positionnement de propositions d'automatisation. Multiplier les dimensions conduirait à terme à rendre impossible toute comparaison significative.

C'est cette nécessité de ne pas multiplier les dimensions, ou les thèmes, qui explique que certaines dimensions, ou certains thèmes, ont été abandonnés ou agrégés. Le thème du feedback, par exemple, présent dans le référentiel Sheridan 1D, ne se retrouve ainsi pas dans les référentiels ultérieurs.

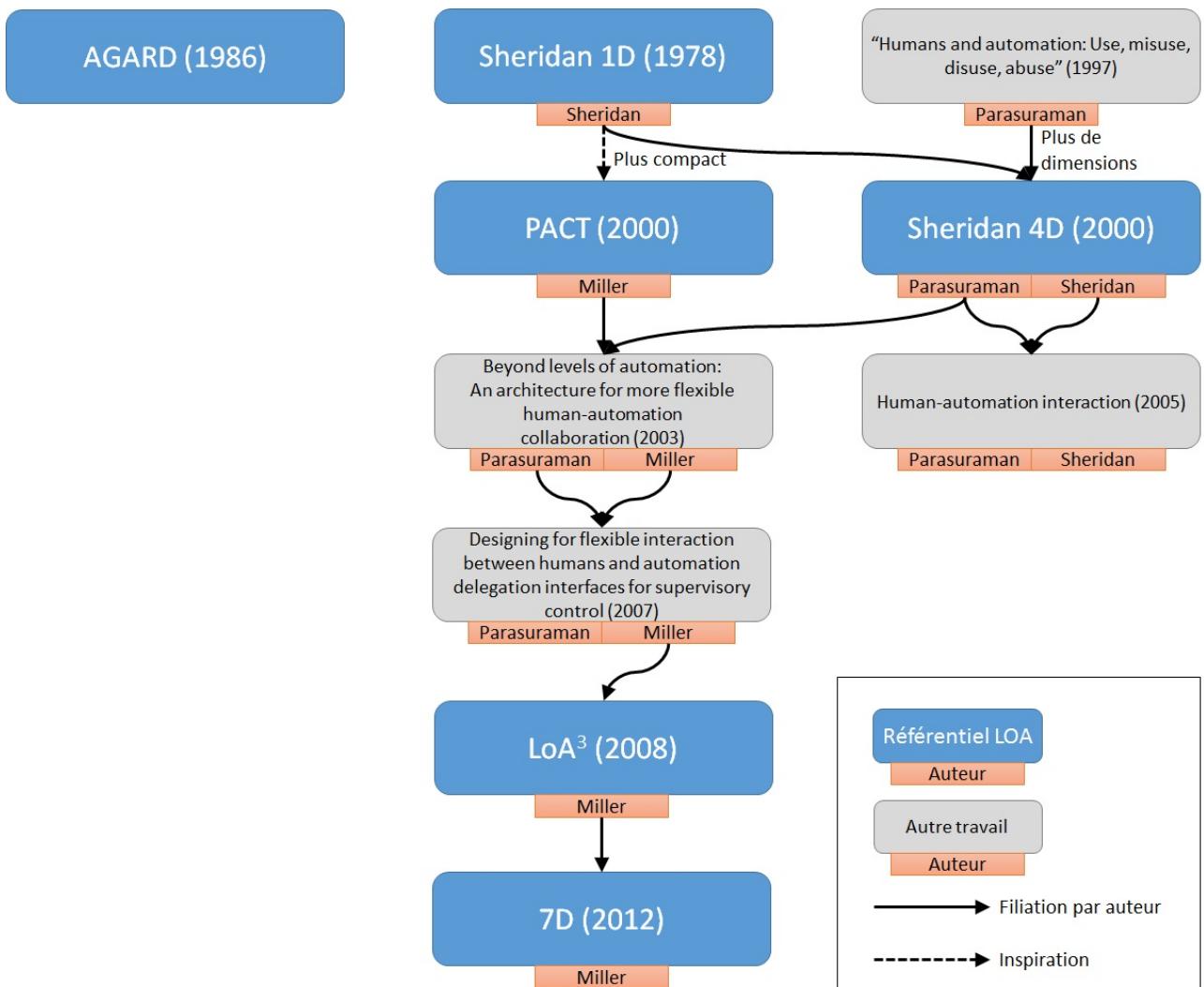


FIGURE 2.13 – Présentation des filiations entre les six référentiels LOA présentés.

## 2.2.8 Récapitulatif

Six référentiels ont été présentés : Sheridan 1D (1978), Sheridan 4D (2000), AGARD (1986), PACT (2000), LoA<sup>3</sup> (2008), 7D (2012). Le référentiel Sheridan 1D est l'ancêtre commun, tous les autres systèmes s'en sont inspirés. Si certains des référentiels qui ont suivi le référentiel Sheridan 1D ont conservé une unique dimension, la tendance actuelle est d'employer plusieurs dimensions. Les thèmes de l'automatisation abordés ne sont pas toujours les mêmes, mais la décision est toujours importante, tant dans son aspect de l'autorité que dans celui de l'abstraction. L'action (la mise en œuvre) est également toujours présente.

Fig. 2.13 présente les filiations entre ces référentiels.

Le tableau 2.8 résume différentes caractéristiques de ces six référentiels.

TABLE 2.8 – Les référentiels présentés avec certaines de leurs caractéristiques. [42]

	Sheridan 1D (1978)	AGARD (1986)	PACT (2000)	Sheridan 4D (2000)	LoA <sup>3</sup> (2008)	7D (2012)
Homogénéité des dimensions	Non applicable (dimension unique)	Non applicable (dimension unique)	Non applicable (dimension unique)		✓	✓
Précision des niveaux	✓	✓	✓			✓
Même nombre de niveaux dans toutes les dimensions	Non applicable (dimension unique)	Non applicable (dimension unique)	Non applicable (dimension unique)	Non applicable (niveaux imprécis)	Non applicable (niveaux imprécis)	✓
Vue d'ensemble de qui fait quoi				✓		
Thème de la perception				✓		
Thème de la décision ou de l'abstraction ou de l'autonomie	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Thème de l'autorité	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Thème de la mise en œuvre	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Thème du feedback	✓					
Dimension explicite dédiée à l'adaptation ou au temps						✓
Dimension explicite dédiée à l'agrégation					✓	✓

## 2.2.9 Conclusion sur la description de l'automatisation partielle

En 2012, le *Defence Science Board* du Département de la Défense des États-Unis a dressé le constat suivant dans un *Task Force Report* : [7]

“The Task Force reviewed many of the DoD-funded studies on “levels of autonomy” and concluded that they are not particularly helpful to the autonomy design process. These studies attempt to aid the development process by defining taxonomies and grouping functions needed for generalized scenarios. They are counter-productive because **they focus too much attention on the computer rather than on the collaboration between the computer and its operator/supervisor to achieve the desired capabilities and effects.**”

Cela signifie que pour les auteurs de ce rapport, il faut que la réflexion sur les niveaux d'autonomie n'offusque par le rôle de l'humain dans les divers aspects de l'automatisation.

Nous nous efforcerons, dans la seconde partie, d'apporter une réponse pertinente à cet objectif fixé par *Defence Science Board* et qui s'inscrit dans la lignée des recommandations de l'OTAN. [14] Notre réponse est un référentiel dénommé LOA4 qui considère l'autonomie comme le complément de la contribution humaine : si la contribution humaine est systématique alors l'autonomie est nulle (niveau 0) ; si la contribution humaine est au contraire systématiquement inexiste alors l'autonomie est totale (niveau 1) ; sinon le niveau est 0.x.

## 2.3 Optimiser l'automatisation partielle

Les référentiels de niveaux d'automatisation permettent d'apporter une information synthétique sur les systèmes dans lesquels collaborent l'humain et les systèmes automatisés. Certains référentiels s'inscrivent en plus dans un écosystème d'approches décrivant le fonctionnement de ces systèmes. C'est le cas de LoA<sup>3</sup> dont les auteurs ont mis en avant Playbook pour décrire les phases de la mission sous la forme d'un graphe. [47] C'est aussi le cas de PACT dont les auteurs font la promotion de COGSIM pour compléter PACT avec deux dimensions, l'une consacrée aux phases de la mission, l'autre à l'agrégation des systèmes entre eux. [11] Mais si la possibilité de décrire des situations d'automatisation partielle demeure fondamentale, l'objectif est de les implémenter et de les optimiser. À cette fin, plusieurs propositions ont été faites. Nous en distinguerons trois types :

1. Celles qui sollicitent l'humain.
2. Celles qui élicitent le comportement de l'humain.
3. Les autres propositions.

### 2.3.1 Solliciter l'humain

Plébiscitée par la DGA [5, 6] et le *Defence Science Board*, [7] cette approche est celle d'un "joint cognitive system" [2, 3]. Une contribution de THALES est "Joint Human-Automation Cognition through a Shared Representation of 4D Trajectory Management" [43] en 2012.

Cette approche a de solides racines (c.f. : Sheridan et Parasuraman, 2005, "Human-automation interaction" [50]) mais elle ne manque pas de soulever des difficultés (c.f. : Christoffersen et Woods, 2002, "How to make automated systems team players" [51]; Klein *et al.*, 2004, "Ten challenges for making automation a team player in joint human-agent activity" [52]). Plusieurs auteurs se sont spécifiquement intéressés au côté humain de la collaboration homme-machine. [53, 54, 55]

#### Considérer l'humain comme une ressource

Toutes les phases d'une mission ne sollicitent pas équitablement l'humain. À la vue des exemples déjà cités, plusieurs tendances se dégagent :

- Les phases permettant la gestion de l'imprévu sont typiquement plus dépendantes de l'humain. C'est ce qui a été constaté avec l'exemple du drone RESSAC [41] lorsque la pluie s'est déclenchée. C'était aussi le cas de la phase "Manage unexpected" de la mission du drone sous-marin (c.f. : Fig. 2.7).
- Les phases lancement/récupération ou décollage/atterrissement et les phases d'urgence sont également typiquement plus dépendantes de l'humain. L'approche LOA4, qui sera plus tard détaillée en tant que contribution, rend particulièrement bien compte de ce phénomène en Fig. 2.14. Dans cette figure, qui transcrit visuellement l'information déjà présentée dans Fig. 2.7, la zone verte correspond à l'autonomie des systèmes automatisés et en complément la zone blanche correspond au recours à l'humain.

En présence de plusieurs drones, une approche pertinente pour éviter une surcharge de travail pour les humains est de répartir dans le temps ces phases qui sollicitent d'avantage son attention. C'est l'approche proposée par Cummings *et al.* dans leur article de 2007 : "Operator performance and intelligent aiding in unmanned aerial vehicle scheduling". [56] Tirée d'un article similaire de 2008

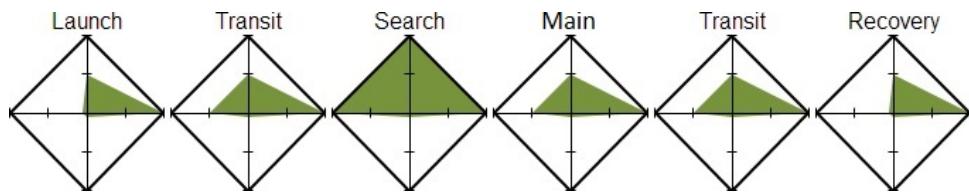


FIGURE 2.14 – Cette figure transcrit visuellement l’information de Fig. 2.7 par phase de la mission : plus de blanc signifie que les systèmes automatisés sont plus dépendants de l’humain. Cette figure utilise l’approche LOA4 qui sera plus tard détaillée en tant que contribution. Cette Fig. 2.14 est un extrait de Fig. 3.9 à venir.

(c.f. : [57]), Fig. 2.15 illustre comment les phases qui sollicitent intensivement l’humain, en rouge, peuvent être réparties dans le temps pour ne pas se superposer.

Fig. 2.16 (source : [56]) montre le déroulement d’une mission avec une planification faite selon ce principe de la répartition dans le temps des tâches sollicitant intensivement l’humain (en rouge). L’alternance des drones dans la sollicitation de l’humain est ici très régulière. Ces travaux sont résumés dans l’article “Global vs. local decision support for multiple independent UAV schedule management” de Cummings *et al.* en 2010.

Cummings *et al.* envisagent plusieurs stratégies pour gérer cette répartition des tâches qui sollicitent intensivement l’humain : la première est de les répartir automatiquement ; la seconde est de laisser l’humain le faire manuellement ; la troisième permet à l’humain d’amender la répartition produite par les systèmes automatisés. Il s’avère qu’il est contre-productif de laisser l’humain “optimiser” la planification des tâches car cela lui demande plus de travail que ça ne lui en ôte.

Pour rendre compte de comment les tâches d’allocation de ressources sollicitent l’humain, les auteurs ont mis au point TRACS (*Tracking Resource Allocation Cognitive Strategies*). TRACS a été proposé dans un article de 2006 de Bruni et Cummings : “Tracking resource allocation cognitive strategies for strike planning”. [58] Cette représentation a deux axes, l’un est le niveau d’information (LOID pour *level of information detail*), l’autre est le mode. Ces axes sont détaillés comme suit :

- Axe LOID (*level of information detail*) :
  - Partie données
    - Un élément
    - Un groupe d’éléments
    - Un candidat
    - Un groupe de candidats
  - Partie critères
    - Un critère
    - Un groupe de critères
- Axe mode :
  - Actions observées chez les opérateurs tentant de résoudre un problème d’allocation de ressources :
    - Parcourir (*browse*)

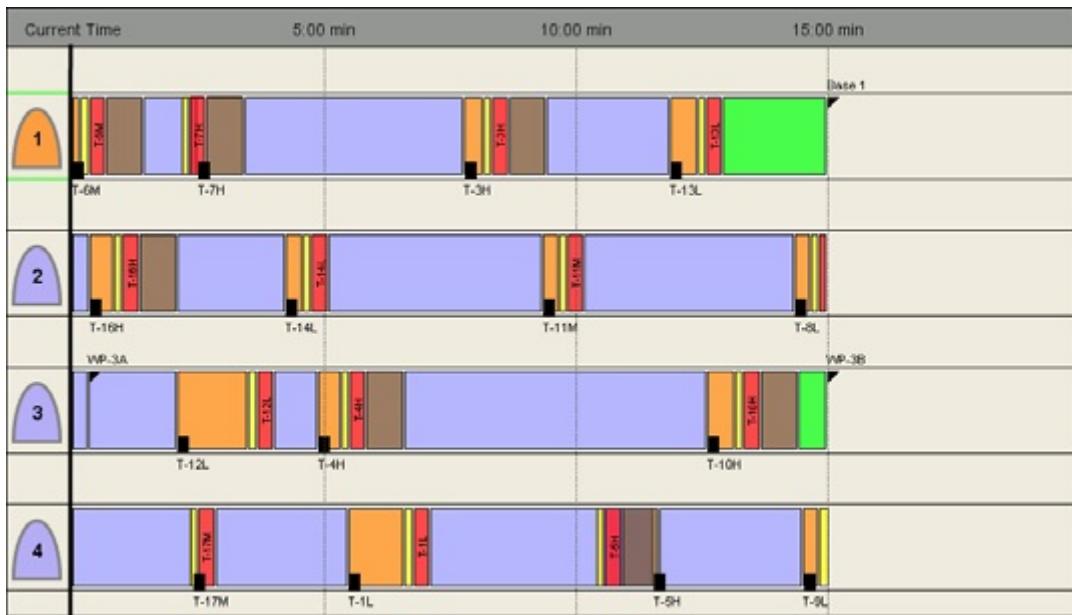


FIGURE 2.15 – Tirée d'un article de Cummings *et al.*, [57] cette figure illustre comment les phases qui sollicitent intensivement l'humain, en rouge, peuvent être réparties dans le temps pour ne pas se superposer.

- Chercher
- Sélectionner
- Filtrer
- Évaluer
- Changer d'avis (*backtrack*)
- Deux actions liées aux interfaces
  - Sélection automatique (*automatch*)
  - Rafraîchir (*update*)

La partie données de TRACS évoque les niveaux 2 – 4 du référentiel Sheridan 1D qui se diffèrent par le nombre d'alternatives portées à l'attention de l'opérateur.

L'information produite par l'observation des opérateurs peut ensuite être visualisée de façon plus ou moins sophistiquée.

- Sous la forme d'un graphe : Fig. 2.17 (source : [58]).
- Sous la forme de ce même graphe, mais en rendant compte visuellement de l'importance de chaque nœud et de chaque transition : Fig. 2.18 (source : Bruni *et al.*, 2006, “Visualizing operators' cognitive strategies in multivariate optimization”).
- Sous la forme de ce même graphe avec la même pondération visuelle des nœuds et des transitions, mais avec une troisième dimension consacrée au temps pour rendre précisément compte de la trajectoire cognitive de l'opérateur (source : Bruni *et al.*, 2007, “Visualizing Cognitive Strategies in Time-Critical Mission Replanning”).

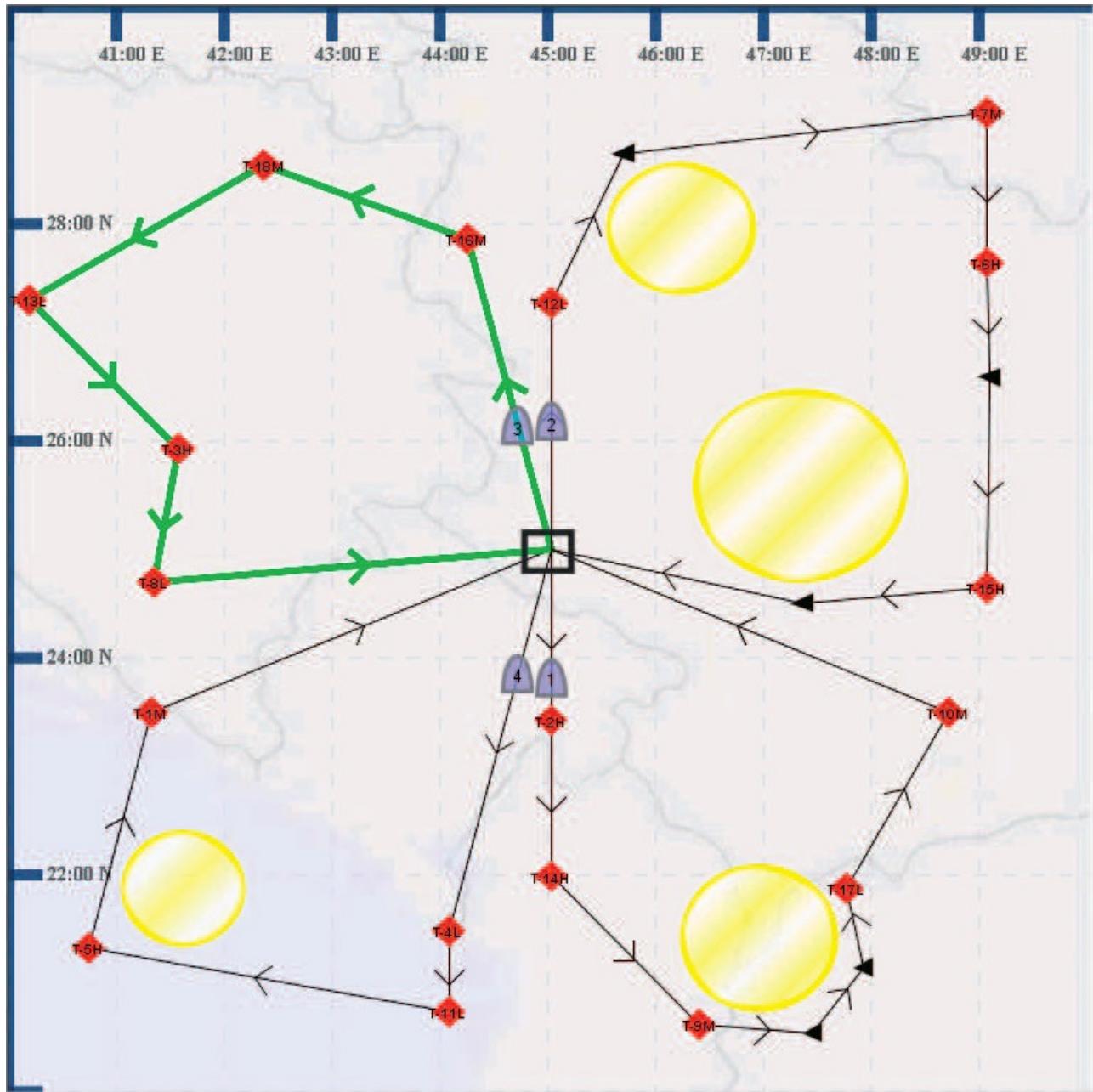


FIGURE 2.16 – Déroulement d'une mission avec une planification faite selon le principe de la répartition dans le temps des tâches sollicitant intensivement l'humain en rouge (source : [56]).

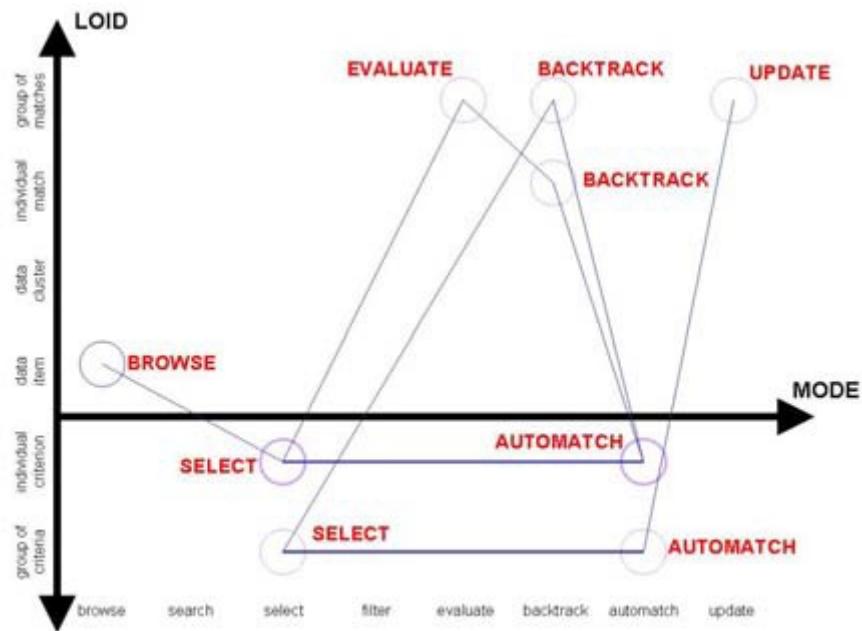


FIGURE 2.17 – CAPS. [58]

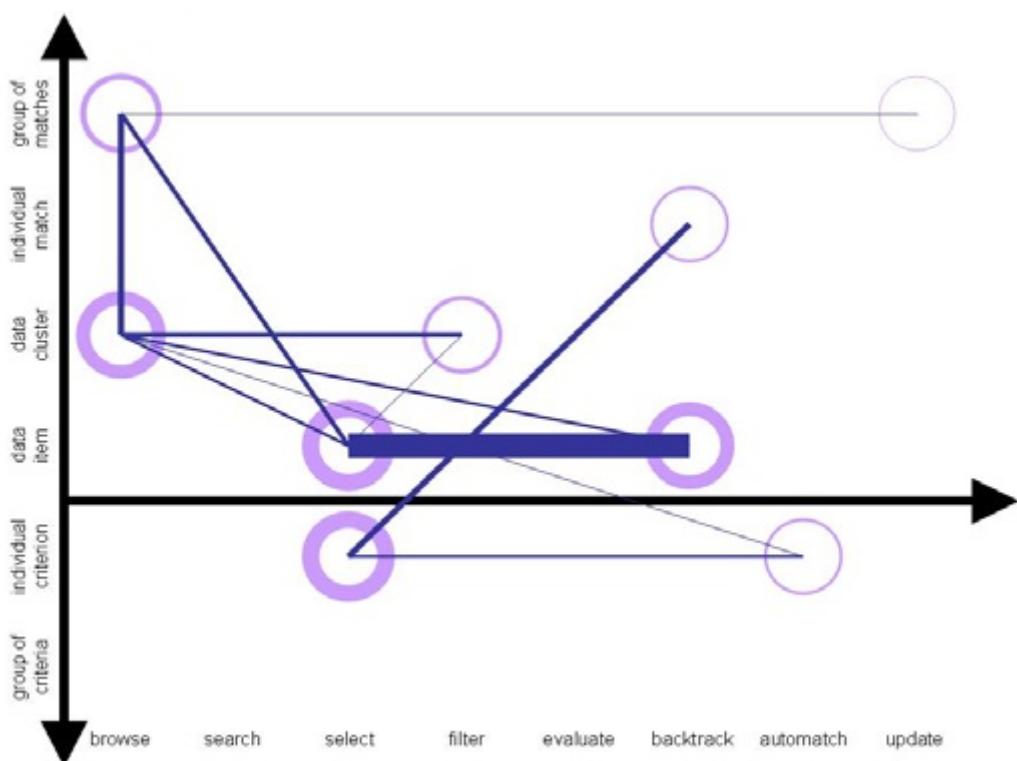


FIGURE 2.18 – CAPS avec pondérations. [59]

Ce qu'il faut retenir de ces travaux est qu'il est possible d'évaluer précisément la façon dont une tâche peut solliciter l'humain et qu'il est possible de tenir compte de cette information dans la planification d'une mission de drones. **La disponibilité humaine peut être exprimée comme une contrainte de plus à prendre en compte.**

Certains outils à base de satisfaction de contraintes (e.g. : basés sur Choco ; c.f. : Jussien *et al.*, "Choco : an open source java constraint programming library" [60]) peuvent être facilement adaptés pour prendre en compte cette contrainte supplémentaire. Les outils plus spécialisés pour calculer les trajectoires des drones, comme Airplan, [61] sont hélas souvent compliqués à adapter du fait de leurs optimisations complexes.

### Mobiliser l'humain en tant que ressource

Une fois que la disponibilité de l'humain est acquise au moment opportun grâce à une planification adéquate, il faut décider comment employer cette disponibilité.

Une approche est de lui proposer des alternatives parmi lesquelles il peut choisir celle qui lui convient le mieux, ou du moins exclure celles qui lui conviennent le moins. Cela peut se faire par le biais d'une adaptation du très classique CNP (pour *Contract Net Protocol*), un protocole d'appel d'offres proposé en 1980 par Smith dans "The contract net protocol : High-level communication and control in a distributed problem solver". [18] Ce protocole est présenté dans Fig. 2.19 tel qu'il est présenté sur le site de la FIPA ([62]).

Un concept important du CNP est l'engagement (*commitment*) qui impose à l'agent qui fait une offre de ne pas compromettre sa capacité à se comporter conformément à cette offre tant que celle-ci est susceptible d'être acceptée.

Dans Fig. 2.20, un commanditaire envisage que soit visité l'objectif *A*. Un petit robot en bleu est candidat pour visiter cet objectif *A*. Les termes de son engagement est de "visiter l'objectif *A* dans les 4 minutes qui suivent l'ordre du commanditaire de visiter cet objectif si le commanditaire l'ordonne avant midi". Il faut une minute au petit robot pour parcourir le côté d'un carreau. Pour respecter son engagement, il doit donc se maintenir dans le cercle orange jusqu'à midi, ou jusqu'à ce que le commanditaire lui ait ordonné de visiter *A* et qu'il l'a fait, ou jusqu'à ce que le commanditaire le libère de son engagement. Dans la mesure où il respecte cet engagement, le petit robot peut faire ce qu'il veut.

Dans une situation plus complexe, les termes de l'engagement pourraient être plus complexes, et les contraintes en résultant le seraient aussi. Ces contraintes seraient aussi certainement plus difficiles à visualiser.

L'engagement donne du temps au commanditaire pour prendre sa décision, ainsi que des garanties quant à la bonne mise en œuvre de sa décision. Dans un contexte dynamique, il faut accepter que la fiabilité de l'engagement soit limitée par la capacité de l'agent qui s'engage à prédire l'avenir. Cette capacité est nécessairement limitée, autrement la décision qui se négocie par le biais de l'appel d'offres aurait déjà été prise. Le prix de ce temps pour que le commanditaire prenne sa décision – et des garanties qui y sont associées – est une plus grande contrainte de l'agent candidat.

Dans Fig. 2.21, l'engagement vis-à-vis de l'objectif *A* dans Fig. 2.20 est compatible avec un nouvel engagement similaire vis-à-vis de l'objectif *B*, mais le petit robot doit maintenant se maintenir à moins de un carreau de distance de *A* ou de *B* pour pouvoir visiter l'autre objectif moins de trois minutes plus tard dans le cas où les visites de *A* et de *B* seraient ordonnées simultanément. C'est une illustration de la croissance rapide de la complexité quand les contraintes se combinent.

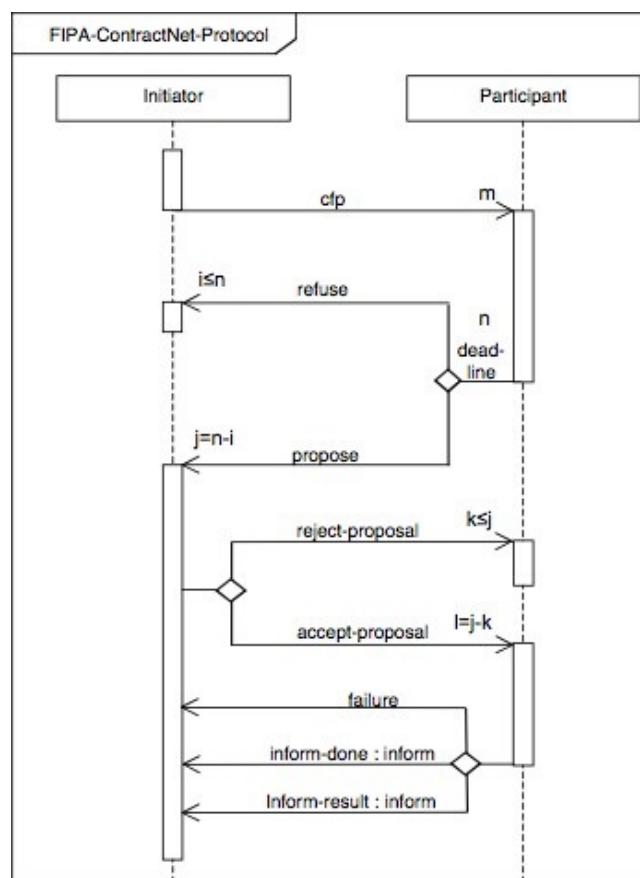


FIGURE 2.19 – Le CNP tel que présenté par la FIPA (source : [62]).

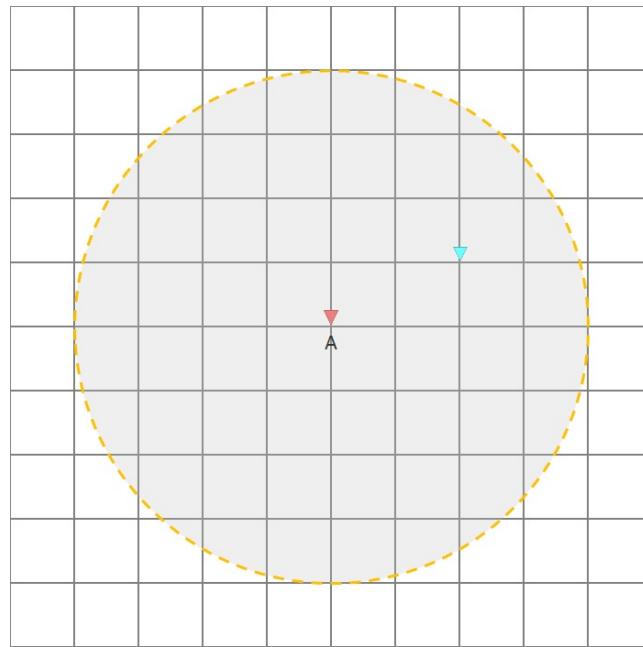


FIGURE 2.20 – Un petit robot en bleu qui est contraint (zone grisée) dans ses déplacements par son engagement vis-à-vis d'un unique objectif *A*.

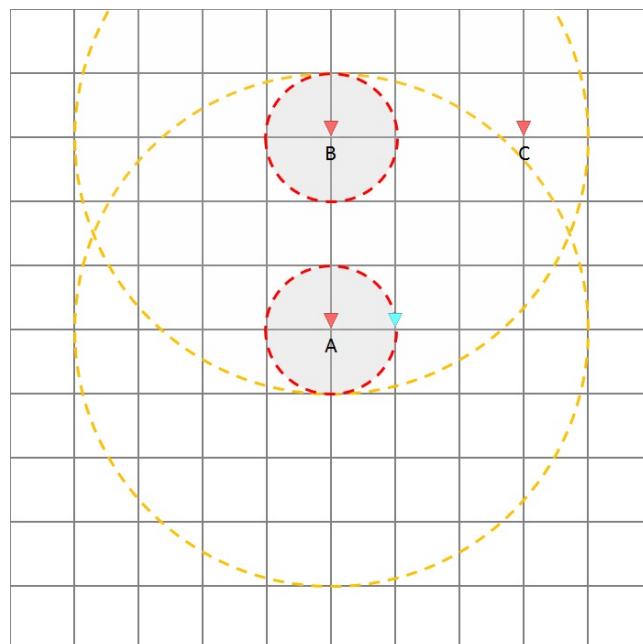


FIGURE 2.21 – Un petit robot en bleu qui est contraint (zone grisée) dans ses déplacements par ses engagements vis-à-vis de deux objectifs *A* et *B*.

Dans ces conditions, un troisième engagement similaire vis-à-vis d'un troisième objectif  $C$  n'est pas possible. L'ordre est donc très important.

Cette contrainte de ne pouvoir répondre à un nouvel appel d'offres que dans la limite de tout engagement résultant d'une participation à un appel d'offres antérieur et toujours en cours peut vite devenir très contraignante. Certains auteurs ont tenté d'en réduire la portée (e.g. : Sandholm [17] et ses messages explicites aux perdants) alors que d'autres ont tenté de la relâcher partiellement (e.g. : Aknine [63] avec son CNP à deux tours).

Sandholm [17] utilise un message explicite aux perdants pour faire que l'engagement cesse aussi vite que possible. Par exemple, dans Fig. 2.20, si le commanditaire renonce explicitement à ce que le petit robot visite l'objectif  $A$  – le libérant ainsi de son engagement vis-à-vis de l'objectif  $A$  – cela permet au petit robot de contracter un nouvel engagement similaire vis-à-vis de l'objectif  $C$ .

Depuis Sandholm la sémantique autour de l'engagement n'a cessé de s'étoffer. Singh a par exemple introduit la possibilité d'informer un agent tierce d'un engagement entre deux agents. [64, 65] L'utilisation d'un tableau noir (ou affichage public) des engagements (également “*commitment store*”) permet d'alléger les communications au sujet des engagements (e.g. : amgoud2000arguments).

Aknine *et al.* [63] introduisent un premier tour à l'issue duquel les offres les moins intéressantes cessent de contraindre les agents qui les ont émises, au risque qu'elles soient quand même acceptées sans pour autant être demeurées possibles ou intéressantes. Il est fréquent [66] que l'engagement soit brisé de façon unilatérale en fonction d'une évaluation locale du bien commun. Avec Aknine *et al.*, *Bid*, *accept* et *reject* deviennent *PreBid*, *PreAccept*, *PreReject*, *DefinitiveBid*, *DefinitiveAccept* et *DefinitiveReject*.

Cette approche se distingue du travail de Colombetti sur le pre-engagement (*pre-commitment*). Soit deux agents  $A$  et  $B$  tels que  $A$  fait une offre à  $B$  :

- Avec Aknine *et al.* l'agent  $B$  peut en substance dire à l'agent  $A$  : “je ne pense pas accepter ton offre, fais ce que tu veux”. L'engagement initial est relâché.
- Avec Colombetti l'agent  $B$  peut en substance dire à l'agent  $A$  : “tu n'est pas encore engagé mais je souhaite que tu le sois, veux-tu l'être ?”. Il n'y a pas eu d'engagement initial.

Mais plutôt que de réduire la durée de l'engagement – ou de le relâcher occasionnellement –, il est possible de le conditionner au temps écoulé depuis qu'il a été contracté : plus ce temps est important, et moins l'engagement devrait être contraignant. C'est ce que propose Sandholm dans “An implementation of the contract net protocol based on marginal cost calculations” en 1993. [17] Sandholm propose que l'offre ne mentionne pas un coût fixe mais en coût croissant en fonction du temps. Plus l'offre est acceptée tard, plus ce coût est important. Ce coût plus important est justifié soit par l'effort nécessaire pour se maintenir plus longtemps en situation de se comporter conformément à l'offre (i.e. : augmentation des ressources mobilisées ou consommées), soit par l'absence de cet effort et la dégradation des conditions permettant de se comporter conformément à l'offre (i.e. : baisse des performances).

C'est ce qu'illustre Fig. 2.22. Un drone prévoit une tournée de plusieurs villes. Dans un contexte dynamique, il est envisagé de lui faire visiter en plus la ville centrale. Plus la décision de le faire est tardive, plus le trajet en sera allongé, comme en témoigne la courbe croissante. L'engagement du drone est de pouvoir visiter en plus la nouvelle ville, quel que soit le moment où cela lui est demandé avant qu'il n'atterrisse, mais pour un coût toujours croissant. L'aspect (très)

contraignant de cet engagement ne se manifeste que si une seconde nouvelle ville doit être visitée. Cet engagement, à la fois très permissif pour l'objectif vis-à-vis duquel il est contracté et très contraignant pour d'éventuels autres objectifs est approprié pour des objectifs critiques.

D'autres propositions de modification du CNP ont été faites. Par exemple, Sandholm *et al.* mentionnent dans "Issues in automated negotiation and electronic commerce : Extending the contract net framework" [67] de 1995 la possibilité de faire payer des frais de proposition d'une offre. Ces frais constituent un moyen de réguler l'enthousiasme des agents à prendre des engagements dès qu'un appel d'offres est émis. Cette régulation bénéficie à d'éventuels appels d'offres concurrents émis plus tard.

Le CNP a donc souvent été étendu et transformé. Dans sa forme initiale, il était simple et fonctionnait avec peu de messages, ce qui peut être bénéfique dans quand la bande passante est limitée (c.f. : Clot, 2000, "Communications Command and Control : the Crowded Spectrum" [68]). Dans ses versions étendues, la simplicité cède la place à plus de sophistication.

### 2.3.2 Élucider le comportement de l'humain

Avec le CNP, nous avons vu que l'engagement est souvent brisé de façon unilatérale en fonction d'une évaluation locale du bien commun. Nous avons également vu que certaines offres peuvent ne pas être soumises, par exemple en raison de frais de soumission trop élevés. Dans ces cas, l'agent qui émet des offres doit anticiper leur accueil par l'agent susceptible de les accepter. Si les agents qui répondent à l'appel d'offres sont des systèmes automatisés et si l'agent qui peut accepter ces offres est un humain, alors les systèmes automatisés doivent être dotés de la capacité d'émuler au mieux l'humain.

Pour émuler l'humain, les systèmes automatisés ont besoin d'une expression mathématique de la préférence de l'humain. Obtenir cette expression mathématique est l'élicitation.

Miller *et al.* donnent l'exemple suivant dans leur article de 2005. *mill2005playbook* Supposons qu'un opérateur veuille qu'une action de surveillance débute à un certain moment et dure un certain temps. Les systèmes automatisés pourraient trouver qu'aucun drone n'est disponible suffisamment longtemps au bon moment. Ils pourraient alors abandonner la recherche et informer l'opérateur qu'il n'y a pas de solution. Un subordonné humain pourrait par contre comprendre qu'une surveillance plus courte est mieux que pas de surveillance du tout et proposer une alternative avec des contraintes relâchées. En intégrant cette connaissance dans les systèmes automatisés, on permet aux systèmes automatisés de mieux émuler l'humain.

Afin d'éliciter ces connaissances, Miller *et al.* emploient tout un ensemble de contraintes pour décrire une tâche. Certaines contraintes sont de haut niveau pour les rendre *user friendly*. Certains auteurs préfèrent parler de buts. [69] De notre point de vue, les buts sont des contraintes molles.

L'élicitation s'inscrit dans un processus à trois étapes :

1. **La représentation des préférences.** Celle-ci vise à se doter d'un modèle mathématique à l'aune duquel juger de la supériorité d'une alternative sur une autre (c.f. : Vincke *et al.*, 2001, "Preferences and numbers"[70] ; Öztürké *et al.*, 2005, "Preference modelling" [71]).

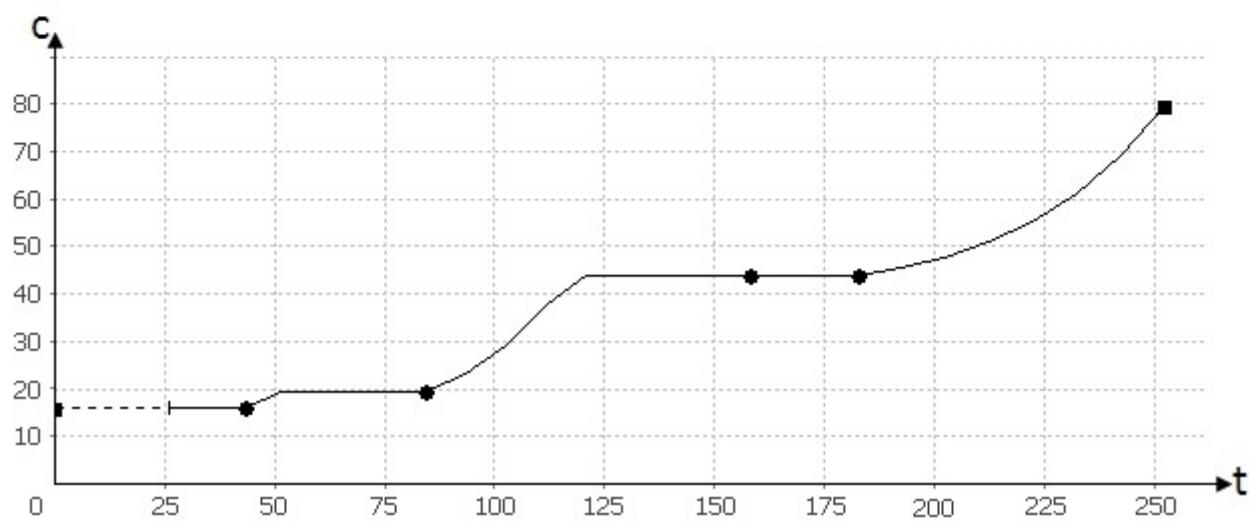
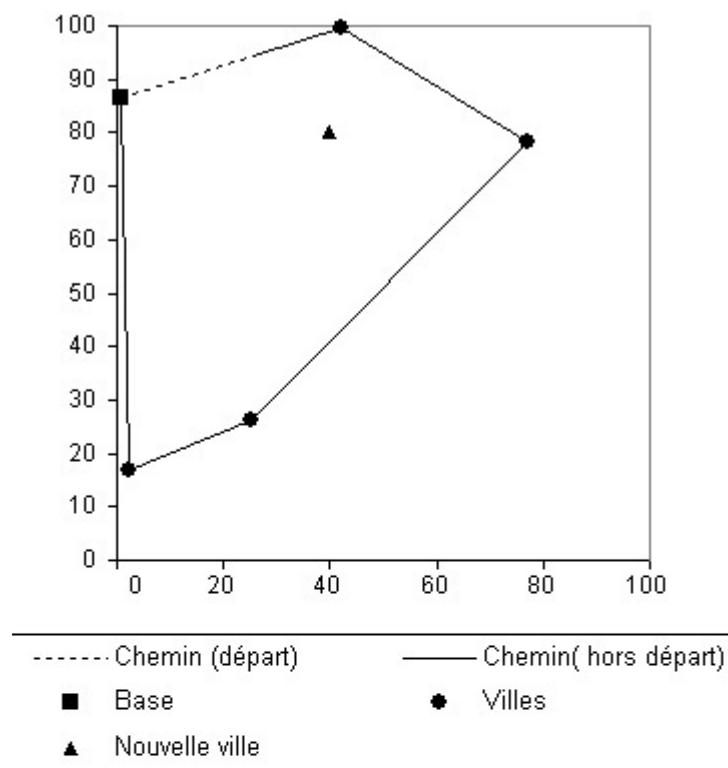


FIGURE 2.22 – Temps supplémentaire s'il est décidé de visiter la ville centrale en plus de toutes les autres villes en fonction de quand cela est décidé.

Vidal *et al.*, dans “Online Behavior Recognition : A New Grammar Model Linking Measurements and Intents” en 2010, proposent une grammaire pour exprimer des relations entre mesures et intentions.

2. **L'élicitation des préférences.** Celle-ci qui est le processus permettant à un preneur de décision humain d'expliquer son processus décisionnel. Le résultat de ce processus est la représentation des préférences. L'élicitation n'est pas une problématique exclusive à l'automatisation (e.f. : Savage, 1971, “Elicitation of personal probabilities and expectations” [72]). C'est un processus délicat car il n'est pas naturel pour un humain preneur de décisions. Certains auteurs ont travaillé sur cet aspect là (c.f. : Abdellaoui, 2000, “Parameter-free elicitation of utility and probability weighting functions” [73]). C'est aussi un processus qui génère facilement des contradictions (c.f. : Braga *et al.*, 2005, “Preference anomalies, preference elicitation and the discovered preference hypothesis” [74]). Pour éviter ces contradictions, Rachmawati *et al.* ont proposé un algorithme qui maintient la consistance au fur et à mesure que sont élicitées de nouvelles préférences. [16]
3. **L'intégration des préférences.** La prise en compte des préférences lors de l'implémentation.

À l'issue de ce processus en trois étapes, l'élicitation des préférences humaines permet aux systèmes automatisés de décider *a priori* des meilleures solutions candidates.

Cela n'est cependant pas suffisant pour être certain de la capacité des systèmes automatisés à décider aussi bien que l'humain en raison de la capacité unique de l'humain à analyser les risques liés à la sécurité et à anticiper dans des situations incertaines et inédites.

Comme nous l'avons déjà dit en discutant de la surveillance maritime, il est judicieux de ne pas préjuger favorablement de la capacité des systèmes automatisés à discriminer avec pertinence des situations d'importances voisines. Il est donc bon que les systèmes automatisés puissent considérer plusieurs solutions candidates comme également attractives (c.f. : Rachmawati et Srinivasan, 2010, “Incorporating the notion of relative importance of objectives in evolutionary multiobjective optimization” [16]).

Du fait de la possible équivalence de certaines offres – *a priori* et du point de vue des systèmes automatisés – les offres présentées à l'humain peuvent être multiples. Elles doivent cependant ne pas être trop nombreuses au risque de saturer les capacités d'analyse de l'humain.

Un moyen de réduire le nombre de ces offres est de se concentrer sur les solutions présentant un intérêt marginal important (c.f. : Rachmawati *et al.*, 2006, “A multi-objective evolutionary algorithm with weighted-sum niching for convergence on knee regions” [75], exemples repris dans Fig. 2.23).

Il est ensuite possible de clustérer les solutions dans ces genoux de Pareto pour obtenir des solutions représentatives.

### 2.3.3 Autres propositions

L'élicitation est un processus difficile et somme toute incertain : il peut échouer à être exhaustif ou pire, trahir les intentions de ceux qui y contribuent. Plutôt que de se focaliser sur l'élicitation des processus de la décision humaine, une possibilité est de se focaliser sur les performances en dotant les systèmes automatisés d'outils pour s'adapter.

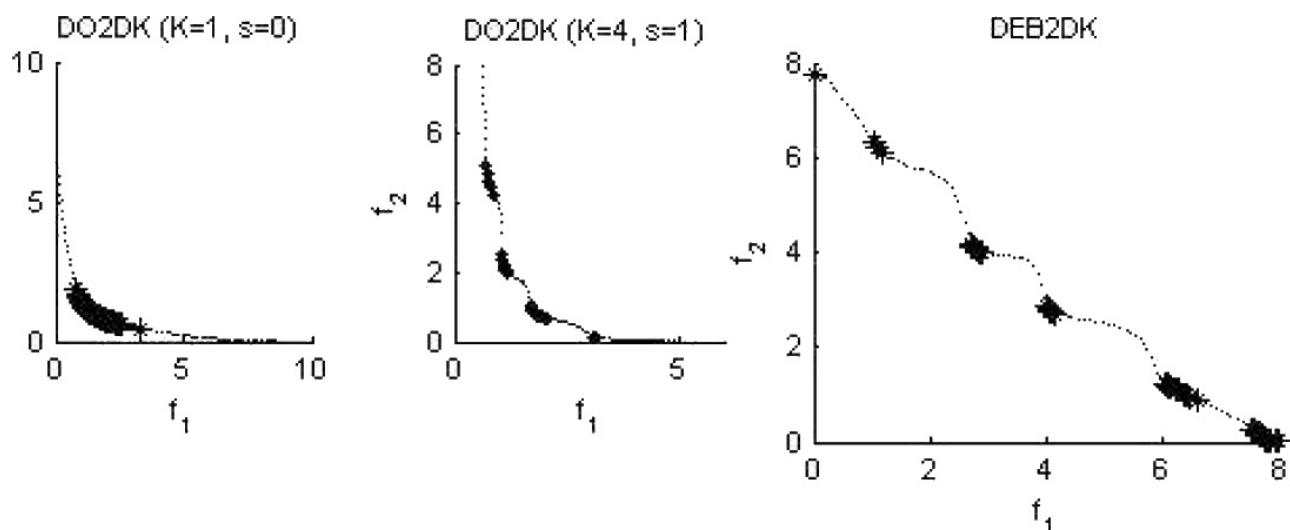


FIGURE 2.23 – En présence d'un front de Pareto susceptible de saturer les capacités de l'humain car contenant trop de solutions, il est possible de se concentrer sur les solutions présentant un intérêt marginal plus important. Ces solutions se trouvent dans des régions en forme de genoux. [75]

Si ces outils évitent l'écueil des malentendus résultant d'une élicitation incomplète ou erronée, un écueil équivalent est celui des autres erreurs qu'ils peuvent commettre.

Deux inconvénients majeurs sont les suivants :

- Il faut une base d'apprentissage ou une très bonne simulation. Il faut donc une expérience conséquente dont les clients des missions de drones aiment éviter de faire les frais.
- Il faut une bonne tolérance à l'échec. Pour divers raisons (humanitaires ou pragmatiques), l'échec statistique peut être intolérable.

Malgré ces inconvénients, les outils permettant aux systèmes automatisés de s'adapter peut contribuer à la prise de décision. Ils constituent aussi un palliatif intéressant lorsque l'élicitation s'avère trop difficile.

Certains des outils permettant aux systèmes automatisés de s'adapter sont les suivants :

- L'apprentissage supervisé.
- L'apprentissage non supervisé.
- L'apprentissage semi-supervisé.
- Réseaux de neurones.
- Algorithmes génétiques.
- Le Q-learning.

#### 2.3.4 Mettre en place des garde-fous pour mieux gérer l'imprévu

Solliciter l'humain, l'émuler ou permettre aux systèmes automatisés de s'adapter sont autant de moyens de deviner ce qu'il faut faire.

Un problème complémentaire est de deviner ce qu'il faut ne pas faire, et au besoin de filtrer des solutions résultant de l'utilisation des méthodes qui précédent.

Cette problématique est ancienne. Nous avons par exemple vu dans l'état de l'art en parlant du référentiel AGARD comment un pilote automatique (niveau 4, coopératif) peut être complété par un système limitant (niveau 3, manuel augmenté et limité) pour refuser une instruction si elle est dangereuse au moment où elle est donnée. Au demeurant, l'expression de "limited" rappelle que même une décision humaine peut gagner à être bridée (c.f. : exemple de l'ABS).

Les systèmes automatisés doivent être bridés. Ils ne doivent pas l'être trop, au risque d'empêcher l'émergence de solutions inédites, que ce soit en rupture avec les solutions connues (c.f. : Serugendo, 2004, *et al.* : "Self-organisation : Paradigms and applications" [76]) ou en réaction à l'émergence de l'imprévu. Mais ils doivent l'être suffisamment pour présenter des garanties à même de rassurer les utilisateurs et les clients de ces systèmes. Chopinaud, pour THALES Systèmes Aéroportés, a traité du sujet dans sa thèse de 2007 : "Contrôle de l'Émergence de Comportements dans les Systèmes d'Agents Cognitifs Autonome". [77]

Il vaut mieux quelques bonnes règles que trop de règles. Cynefin Manifesto donne l'exemple suivant (ici traduit de l'anglais, source : [78]) : "Imaginez l'organisation d'une fête d'anniversaire pour un groupe de jeunes enfants. Décideriez-vous d'un ensemble d'objectifs d'apprentissages avec leurs parents avant la fête ? Est-ce que ces objectifs refléteraient la mission d'éducation dans la société à laquelle vous appartenez ? Créeriez-vous un plan de projet pour la fête avec des objectifs intermédiaires associés à des mesures empiriques de réussite ? [...] Non ! À la place, comme la plupart des parents, vous créeriez des barrières pour empêcher certains types de comportements ; vous utiliseriez des sources d'intérêts (*attractors*) (des parties de jeux, un ballon de foot, une cassette vidéo) pour encourager la formation d'entités largement auto-organisées ; vous interrompriez précocement les patterns négatifs, pour éviter que la fête ne devienne chaotique, ou ne nécessite l'imposition draconienne de l'autorité. À la fin de la fête, vous sauriez qu'elle a été un succès, mais vous ne pourriez pas définir (autrement qu'en des termes génériques) ce à quoi ressemblerai ce succès à l'avance."

De façon humoristique, Cynefin Manifesto invite à se méfier de la normalisation à outrance et de la mesure à tout prix de la performance. Ces excès peuvent peser sur l'humain mais aussi sur les systèmes automatisés.

Il peut donc être plus important d'interdire ce qui ne peut être fait que d'imposer ce qui doit être fait. Si cette proposition remporte facilement des suffrages quand elle implique de laisser une plus grande autonomie aux humains, elle est plus discutée quand elle implique de laisser une plus grande autonomie aux systèmes automatisés.

Il s'agit pourtant d'une nécessité. Le caractère inévitable de l'imprévu a été mis en avant par Lanir en 1986 dans son livre "Fundamental surprises". [79] Kurtz et Snowden en 2003 suggèrent que l'application stricte de règles peut conduire au chaos et qu'aucune solution n'est alors à attendre de plus de règles (c.f. : Kurtz & Snowden, 2003, "The new dynamics of strategy : Sense-making in a complex and complicated world" [80] étayé par [81]). **Face à l'émergence fatidique de l'imprévu perturbateur, il faut permettre l'émergence de réponses adaptées inédites.**

À cet égard, un exemple de ce que peut apporter l'intelligence artificielle en matière d'émergence de réponses adaptées est l'algorithme "T-Resilience" (c.f. : Koos *et al.*, 2013, "Fast Damage Recovery in Robotics with the T-Resilience Algorithm" [82]) qui permet à des robots de rapidement découvrir des mouvements compensatoires pour adapter leurs mouvements à des pannes imprévues.

Un autre intérêt à mettre en place des garde-fous est de pouvoir se concentrer sur les objectifs plutôt que sur la mise en œuvre. Cela rend plus évident le *sens* d'un système. Cela s'avère de plus en plus précieux à mesure que les systèmes se complexifient. Cela permet en corolaire de gérer ce *sens*, et donc très concrètement de **réorienter le comportement d'un système** (c.f. : Caval *et al.*, 2014, “Keeping a clear separation between goals and plans” [69]).

### 2.3.5 Conclusion sur l'optimisation de l'automatisation partielle

Faire interagir efficacement l'homme et la machine n'est pas simple, comme l'ont montré Parasuraman et Riley dans “Humans and automation : Use, misuse, disuse, abuse”, [30] Mais l'association de l'homme et la machine demeure une approche nécessaire [9] et souhaitée [1]. Plusieurs contributions ont visé à améliorer l'efficacité de cette association. De nombreuses propositions ont visé à améliorer la performance des systèmes automatisés. D'autres ont proposés d'améliorer les opérateurs. Mais les propositions à la suite desquelles nous nous inscrirons dans la seconde partie sont celles qui s'intéressent à l'intégration de l'humain dans un système partiellement automatisé. Ce type de contributions est essentiel au développement d'une cognition jointe entre l'humain et les systèmes automatisés.

Une de ces contributions les plus remarquables est celle Cummings et Mitchell [57] permettant d'allouer du temps de disponibilité humaine comme une ressource ordinaire dans un problème d'affectation. Elle présente pourtant l'inconvénient de concerner principalement l'opérateur. Il est vrai que l'opérateur est une ressources essentielle à la réalisation d'opération. Mais par cognition conjointe, il faut entendre décision conjointe, c'est donc au coordinateur de mission qu'il faut s'intéresser. Or le travail du coordinateur de mission consiste justement à planifier ce qui doit être fait, il n'est donc pas possible de planifier *son* travail qui est la conséquence de l'imprévu en cours de mission.

Nous montrerons dans la seconde partie comment nous avons choisi de solliciter le coordinateur de mission : en lui proposant quelques alternatives dont les systèmes automatisés n'arrivent pas à décider des meilleures afin qu'il puisse trancher.



# **Contributions**



# Chapitre 3

## Contributions

### 3.1 LOA4 : un référentiel innovant pour classifier les situations d'automatisation

Comme le soulignent Box et Drapper (c.f. : Box *et al.*, 1987, “Empirical model-building and response surfaces” [83]), “Tous les référentiels se trompent, mais certains référentiels sont utiles”. Le mérite d’un référentiel LOA est de pouvoir mettre en valeur certains aspects des situations d’automatisation, y compris au dépend d’autres aspects.

**Nous avons fait le choix de nous focaliser sur la contribution de l’humain : est-elle systématique, ponctuelle ou impossible ?**

Cette intérêt central pour la contribution de l’humain répond à la critique des référentiels actuels par le *Task Force Report* de 2012 sur l’autonomie : [7] “[The DoD-funded studies on “levels of autonomy”] are counter-productive because they focus too much attention on the computer rather than on the collaboration between the computer and its operator/supervisor to achieve the desired capabilities and effects.”

Du fait de son intérêt pour la place de l’humain – qui limite de fait l’autonomie des systèmes automatisés – le “LOA” de LOA4 correspond ici à “Level Of Autonomy” plutôt qu’à “Level Of Automation”.

#### 3.1.1 Structure

L’affiliation de LOA4 avec les référentiels antérieurs, et plus précisément l’affiliation de ses caractéristiques, est détaillée dans le tableau 3.1.

Les caractéristiques du référentiel LOA4 sont les suivantes :

- Quatre dimensions thématiques, comme avec le référentiel Sheridan 4D, abordant chacune un aspect distinct de l’automatisation : la perception (l’établissement des croyances), l’autorité (la gestion des objectifs), l’action (la mise en œuvre) et l’adaptation (le changement de fonctionnement).
- Une approche similaire à celle du référentiel PACT quant à l’agrégation et à la temporalité, à savoir l’usage au besoin de dimensions complémentaires.

TABLE 3.1 – Les caractéristiques de LOA4 (en dernière colonne), et l'historique de ces caractéristiques dans les référentiels antérieurs (colonnes antérieures). [42].

	Sheridan 1D (1978)	AGARD (1986)	PACT (2000)	Sheridan 4D (2000)	LoA <sup>3</sup> (2008)	7D (2012)	LOA4
Homogénéité des dimensions	Non applicable (dimension unique)	Non applicable (dimension unique)	Non applicable (dimension unique)		✓	✓	✓
Précision des niveaux	✓	✓	✓			✓	✓
Même nombre de niveaux dans toutes les dimensions	Non applicable (dimension unique)	Non applicable (dimension unique)	Non applicable (dimension unique)	Non applicable (niveaux imprécis)	Non applicable (niveaux imprécis)	✓	✓
Vue d'ensemble de qui fait quoi				✓			✓
Dimension dédiée à la perception				✓			✓
Dimension dédiée à l'aide à la décision ou à l'abstraction ou à l'autonomie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Dimension dédiée à l'autorité	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Dimension dédiée à la mise en œuvre	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Dimension dédiée au feedback	✓						
Dimension explicite dédiée à l'adaptation ou au temps						✓	
Dimension explicite dédiée à l'agrégation					✓	✓	

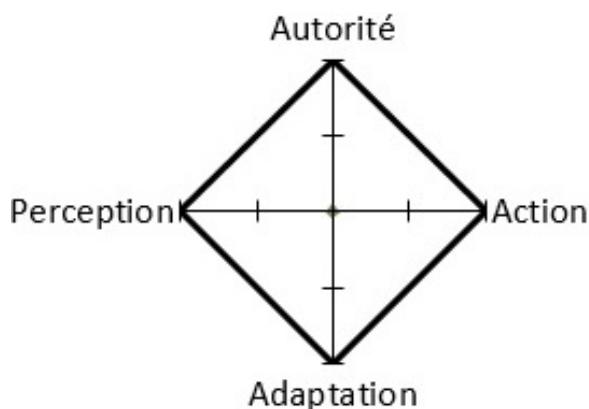


FIGURE 3.1 – Un positionnement LOA4 se fait typiquement dans un diagramme radar régulier de quatre axes. La valeur au centre est 0, la valeur aux extrêmes est 1, la valeur médiane est  $0.x$ .

- Des niveaux bien définis, et ce dans toutes les dimensions, comme les référentiels She-ridan 1D, AGARD, PACT et 7D.
- Le même nombre de niveaux dans toutes les dimensions, comme avec le référentiel 7D. Ce nombre est de 3 pour LOA4 alors qu'il est de 7 pour 7D.
- Les mêmes trois niveaux dans toutes les dimensions : 0,  $0.x$  et 1. Comme dans le référentiel PACT le niveau 0 est le plus bas. Le niveau 0 correspond à l'absence d'autonomie, le niveau 1 est une autonomie complète, le niveau  $0.x$  est une autonomie ponctuelle.

L'ambition de LOA4 est de faire mieux que tous les référentiels précédents. Mieux, mais pas nécessairement plus, car comme l'a prouvé la réception sceptique du référentiel 7D, avec sept dimensions de sept niveaux, il n'est pas bon d'en faire trop. LOA4 n'a que quatre dimensions de trois niveaux. Et surtout, caractéristique inédite, ces 3 niveaux sont chaque fois les mêmes.

### Trois niveaux identiques dans chaque dimension

Dans le référentiel PACT, le niveau 0 est celui de l'absence d'automatisation. La plupart des autres référentiels considèrent qu'il s'agit là du niveau 1, mais le chiffre 0 évoque d'avantage l'*absence* d'automatisation. Dans LOA4, comme dans le référentiel PACT, le niveau 0 est aussi celui d'une absence, mais cette fois il s'agit de l'absence d'autonomie, car l'humain doit systématiquement être présent.

Dans la même logique, le niveau 1 dans LOA4 est celui de l'autonomie, car 1 évoque la complétude. Ce niveau se caractérise par l'absence de l'humain.

Entre ces deux niveaux extrêmes, LOA4 n'a qu'un seul niveau, le  $0.x$ , qui indique une autonomie ponctuelle. Ce niveau se caractérise par la contribution possible – mais pas systématique – de l'humain.

Ces trois niveaux échelonnent chacune des quatre dimensions de LOA4. Comme avec le référentiel 7D, il est possible de produire des diagrammes radars. Voir Fig. 3.1.

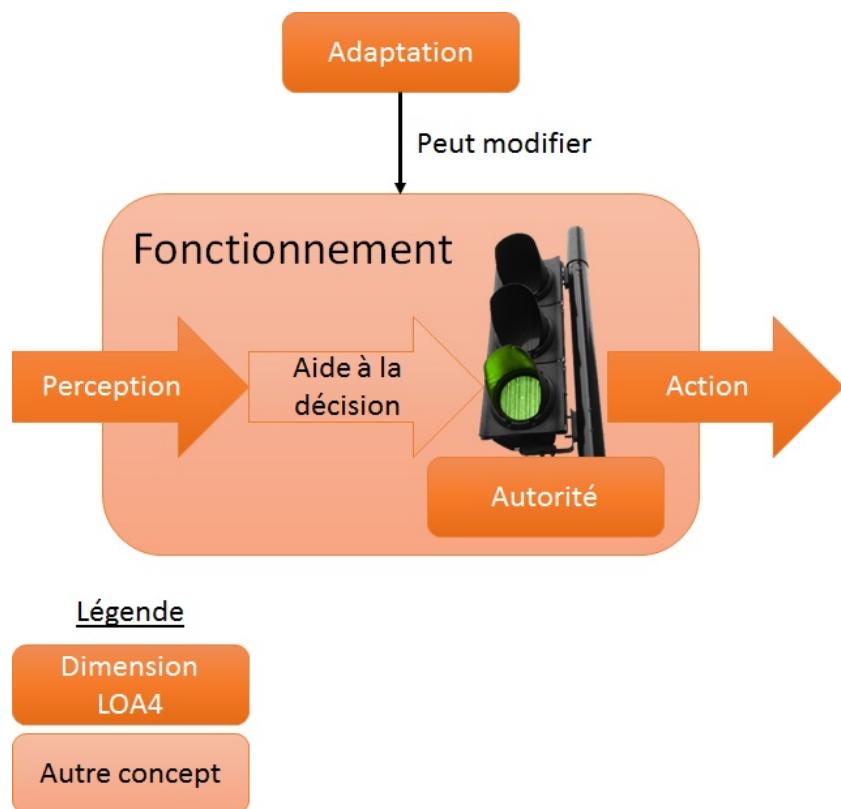


FIGURE 3.2 – LOA4 a quatre dimensions : trois pour décrire un fonctionnement, une pour changer ce fonctionnement.

### Quatre dimensions pour une vue d'ensemble

Les quatre dimensions de LOA4 portent respectivement sur la perception, l'autorité, l'action et l'adaptation. Les trois premières visent à décrire un fonctionnement : comment établir les croyances, comment modifier les objectifs et comment planifier la mise en œuvre. La quatrième vise à décrire comment changer de fonctionnement. Voir Fig. 3.2.

Ces quatre dimensions ont été inspirées par les missions de drones et y correspondent donc assez bien. Par exemple la mission d'un CU-161 Sperwer dépend de trois humains dont la plupart des fonctions peuvent être réparties comme suit :

- Perception : l'opérateur des senseurs.
- Autorité : le coordinateur de mission.
- Action : l'opérateur de vol.
- Adaptation : à définir.

Attention cependant à ne pas généraliser. Ainsi, si l'opérateur des senseurs gère la perception directe, l'établissement des croyances dépend également des entités suivantes :

- La plateforme qui réalise physiquement l'acquisition des données.
- Les systèmes de communication qui acheminent ces données.

- Les logiciels qui transforment ces données, directement à bord de la plateforme ou dans la CGS.
- Le coordinateur de mission qui pondère la confiance qu'il accorde aux informations qui lui sont transmises.
- Parfois un expert tierce et/ou une autorité supérieure afin de résoudre une indécision.
- D'autres sources, émanant de personnels déployés, de leur commandement ou des renseignements (*intelligence*).

Nous avons vu avec les Tableaux 2.1, 2.2 et 2.3 (source : THALES Syèmes Aéroportés [20]) que si il est fréquent qu'un opérateur soit dominant pour un type d'activités, il en a rarement le monopole.

### 1<sup>re</sup> dimension : la perception

Cette dimension interroge sur la nature des croyances : sont-elles, au moins pour partie, établies par l'humain ? La réponse est : "Toujours" (niveau 0), "Parfois" (niveau 0.x) ou "Jamais" (niveau 1).

Une question équivalente est : les systèmes automatisés sont-ils autonomes pour établir les croyances ? La réponse est : "Jamais" (niveau 0), "Parfois" (niveau 0.x) ou "Toujours" (niveau 1).

LOA4 se focalise sur les plus hauts niveaux d'automatisation, ceux qui relèvent de l'autonomie. Aussi, même au niveau 0 de perception LOA4, les systèmes automatisés peuvent être sollicités (et ils le sont probablement) pour établir des croyances. La seule certitude au niveau 0 de perception LOA4 est qu'un humain est indispensable à l'établissement de toutes les croyances.

La perception est ce qui établit les croyances pour le raisonnement. Cette première dimension vise à établir si l'humain est pris à partie dans l'établissement de ces croyances.

- 0 : aucune croyance n'entre en compte dans la décision à moins de ne faire intervenir l'humain, par exemple pour validation.
- 0.x : l'humain n'est pas systématiquement impliqué dans l'établissement des croyances.
- 1 : l'humain est absent de l'établissement des croyances.

En amont de la décision, le référentiel Sheridan 4D a deux dimensions : l'acquisition et l'analyse. Le référentiel Sheridan 4D considère pour ces deux dimensions la complexité des fonctions automatisées, sans préciser de niveaux. La perspective de LOA4 est très différente : il ne s'agit pas d'évaluer la complexité des fonctions automatisées, mais leur autonomie vis à vis de l'humain.

### 2<sup>e</sup> dimension : l'autorité

Cette dimension interroge sur la nécessité d'un accord humain pour mettre à jour les objectifs : y en a-t-il une ? La réponse est : "Toujours" (niveau 0), "Parfois" (niveau 0.x) ou "Jamais" (niveau 1).

Une question équivalente est : les systèmes automatisés sont-ils autonomes pour commander que soit mis à jour les objectifs ? La réponse est : “Jamais” (niveau 0), “Parfois” (niveau 0.x) ou “Toujours” (niveau 1).

LOA4 se focalise sur les plus hauts niveaux d’automatisation, ceux qui relèvent de l’autonomie. Aussi, même au niveau 0 d’autorité LOA4, les systèmes automatisés peuvent être sollicités (et ils le sont probablement) pour gérer les objectifs. La seule certitude au niveau 0 d’autorité LOA4 est qu’un humain est indispensable à la gestion de tous les objectifs.

La *décision* se subdivise en *l’aide à la décision*, d’une part, et en *l’autorité*, d’autre part. L’aide à la décision permet d’établir des plans pour accomplir certains objectifs. L’autorité permet d’assigner des objectifs. Dans la pratique, il est rare que les systèmes automatisés n’aident pas à la décision, à moins que la situation ne soit très simple. C’est donc sur l’autorité que se focalise cette seconde dimension de LOA4. Elle vise à établir qui de l’humain ou des systèmes automatisés est en position d’autorité suffisante pour assigner des objectifs.

- 0 : l’humain doit donner son consentement explicite à toute mise à jour des objectifs.
- 0.x : dans certaines circonstances, le consentement de l’humain est facultatif ou implicite. Par exemple, la situation correspondant au niveau 6 du référentiel Sheridan 1D (lorsque l’humain ne dispose que d’un temps limité pour opposer son droit de véto avant qu’un plan ne soit mis en œuvre par les systèmes automatisés) correspond à ce niveau 1.x de cette dimension de LOA4 consacrée à l’autorité. De même, si la suppression d’un objectif nécessite l’accord de l’humain si c’est un objectif majeur mais ne le nécessite pas si c’est un objectif mineur, l’autorité LOA4 est aussi de 1.x.
- 1 : les systèmes automatisés ont pleine autorité pour ordonner la mise en œuvre d’un plan, et ce dans toutes les circonstances.

Cette attention pour l’autorité, avec une dimension dédiée, est la même que dans LoA<sup>3</sup>, même si dans le détail LOA4 décrit l’autorité comme la capacité à assigner des objectifs. Et comme dans LoA<sup>3</sup>, cette dimension est la plus importante : elle est la première dans la liste des dimensions de LoA<sup>3</sup>, et elle est centrale et dominante dans le diagramme radar de LOA4. Cette dimension est également centrale (quatrième parmi sept, sous l’appellation d’“autonomie”) dans le référentiel 7D qui hérite de LoA<sup>3</sup>.

### 3<sup>e</sup> dimension : l’action

Cette dimension interroge sur la contribution humaine à la mise en œuvre : y en a t-il une ? La réponse est : “Toujours” (niveau 0), “Parfois” (niveau 0.x) ou “Jamais” (niveau 1).

Une question équivalente est : les systèmes automatisés sont-ils autonomes mettre en œuvre un plan ? La réponse est : “Jamais” (niveau 0), “Parfois” (niveau 0.x) ou “Toujours” (niveau 1). LOA4 se focalise sur les plus hauts niveaux d’automatisation, ceux qui relèvent de l’autonomie. Aussi, même au niveau 0 d’action LOA4, les systèmes automatisés peuvent être sollicités (et ils le sont probablement) pour la mise en œuvre. La seule certitude au niveau 0 d’action LOA4 est qu’un humain est indispensable à toute mise en œuvre.

L'action est la mise en œuvre.

- 0 : l'humain est indispensable à la mise en œuvre une fois que celle-ci a été ordonnée. C'est par exemple souvent le cas pendant le décollage d'un drone.
- 0.x : l'humain est susceptible d'affiner la mise en œuvre, soit par un contrôle direct, soit par des changements de modalités dans les marges prévues par le plan.
- 1 : l'humain n'intervient pas dans la mise en œuvre.

Cette dimension correspond à celle du même nom du référentiel Sheridan 4D. Comme pour l'autorité, le thème était déjà présent dans Sheridan 1D et se trouve dans tous les référentiels présentés dans l'état de l'art.

#### 4<sup>e</sup> dimension : l'adaptation

Cette dimension interroge sur le consentement humain au changement de fonctionnement : est-il nécessaire ? La réponse est : "Toujours" (niveau 0), "Parfois" (niveau 0.x) ou "Jamais" (niveau 1).

Une question équivalente est : les systèmes automatisés sont-ils autonomes pour décider d'un changement de fonctionnement ? La réponse est : "Jamais" (niveau 0), "Parfois" (niveau 0.x) ou "Toujours" (niveau 1).

LOA4 se focalise sur les plus hauts niveaux d'automatisation, ceux qui relèvent de l'autonomie. Aussi, même au niveau 0 d'adaptation LOA4, les systèmes automatisés peuvent être sollicités (et ils le sont probablement) pour changer de fonctionnement. La seule certitude au niveau 0 d'adaptation LOA4 est qu'un humain est indispensable à tout changement de fonctionnement.

Si les trois dimensions précédentes décrivent un fonctionnement lors d'une certaine phase, cette quatrième dimension décrit les modalités du changement de fonctionnement, souvent lié à la possibilité de décréter un changement de phase.

On parle d'automatisation adaptable quand le changement est à l'initiative de l'humain et d'automatisation adaptive quand le changement est à l'initiative des systèmes automatisés. On parlera ici d'automatisation adaptive et adaptable si les deux possibilités co-existent, par exemple si la règle est celle du "premier venu, premier servi".

Les auteurs des référentiels PACT et Sheridan 4D sont partisans de l'automatisation adaptive, au motif que l'automatisation adaptable soulève de nombreux problèmes. Cela ne signifie pourtant pas que l'automatisation adaptable n'est jamais employée. Reprenons l'exemple déjà citée dans l'état de l'art d'un drone Ressac surpris par une courte pluie. [41] Le drone est initialement en mode "nominal – auto-pilote". Lorsqu'il commence à pleuvoir, le pilote de sécurité prend le contrôle, le drone passe alors en mode "urgence – manuel". Lorsqu'il cesse de pleuvoir, le pilote de sécurité rend au drone son autonomie et le drone repasse en mode "nominal – auto-pilote". À chaque fois, le changement de mode se fait à l'initiative de l'humain, c'est de l'automatisation adaptable.

LOA4 prend le parti inédit de dédier une dimension à ce choix d'une automatisation adaptive, ou adaptable, ou des deux.

Les trois niveaux de cette dimension de l'adaptation sont les suivants :

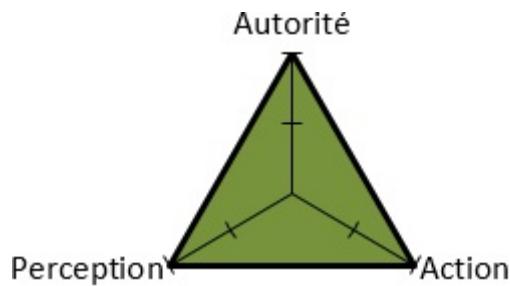


FIGURE 3.3 – Si un système n'a qu'un unique mode de fonctionnement et donc si la dimension dédiée à l'adaptation n'a pas d'intérêt, il est possible de la supprimer sans perturber la lecture du diagramme radar. Ici un fonctionnement complètement automatisé, et ce de façon irréversible.

- 0 : automatisation adaptable (changements de fonctionnement à l'initiative de l'humain).
- 1.x : automatisation adaptive et adaptable (changements de fonctionnement à l'initiative des systèmes automatisés ou (non exclusif) de l'humain).
- 1 : automatisation adaptive (changements de fonctionnement à l'initiative des systèmes automatisés).

Sur le diagramme radar, l'adaptation est l'axe opposé à celui de l'autorité. L'adaptation est une mét-autorité puisqu'elle confère l'autorité de changer l'autorité à travers le changement du mode de fonctionnement. La position de l'adaptation relative à celle de l'autorité est donc porteuse de sens.

Si l'adaptation n'a pas d'intérêt pour un système car celui-ci n'a qu'un mode de fonctionnement unique, il est possible de la supprimer sans perturber la lecture du diagramme radar (Fig. 3.3).

Il est judicieux de documenter les transitions possibles entre les modes de fonctionnement en précisant les événements déclencheurs et qui, de l'humain ou des systèmes automatisés, dispose de l'autorité pour ordonner chaque transition.

### Récapitulatif des dimensions et des niveaux

Le tableau 3.2 récapitule les quatre dimensions et leurs niveaux.

### Exemples

Le cas du drone Ressac surpris par une courte pluie [41] peut se modéliser comme dans Fig.3.4

Le cas du drone ressac illustre bien l'intérêt de la quatrième dimension de LOA4 dédiée à l'adaptation : il est clair que c'est à chaque fois l'humain qui est en situation d'autorité pour modifier le mode de fonctionnement.

En mode “nominal – auto-pilote”, le comportement du drone (spécifié par les trois premières dimensions de LOA4) est parfaitement autonome. Cela se manifeste par exemple lors du retour à ce mode : le drone détermine lui-même sa position (perception à 1), décide de lui-même qu'il doit se rendre au point beta (autorité à 1) et procède de lui-même à la mise en œuvre (action à 1).

TABLE 3.2 – Le tableau récapitulatif de LOA4.

Dim.	Lv.	Description
Perception	0	<i>Chaque</i> croyance est établie (créeée / modifiée / supprimée) avec le consentement explicite d'un humain.
	0.x	<i>Certaines</i> croyances sont susceptibles de ne pas être établies (crées / modifiées / supprimées) avec le consentement explicite d'un humain.
	1	<i>Aucune</i> croyance n'est établie (créeée / modifiée / supprimée) avec le consentement explicite d'un humain.
Autorité	0	<i>Chaque</i> objectif est mis à jour (créé / modifié / supprimé) avec le consentement explicite d'un humain.
	0.x	<i>Certains</i> objectifs sont susceptibles d'être mis à jour (crées / modifiés / supprimés) avec le consentement explicite d'un humain.
	1	<i>Aucun</i> objectif n'est mis à jour (créé / modifié / supprimé) avec le consentement explicite d'un humain.
Action	0	<i>Chaque</i> mise en œuvre nécessite un humain.
	0.x	<i>Certaines</i> mises en œuvre sont susceptibles de ne pas nécessiter un humain.
	1	<i>Aucune</i> mise en œuvre ne nécessite un humain.
Adaptation	0	Automatisation adaptable : <i>Chaque</i> changement de fonctionnement nécessite le consentement explicite d'un humain.
	0.x	Automatisation adaptive et adaptable : <i>Certains</i> changement de fonctionnement sont susceptibles de ne pas nécessiter le consentement explicite d'un humain.
	1	Automatisation adaptive : <i>Aucun</i> changement de fonctionnement ne nécessite le consentement explicite d'un humain.

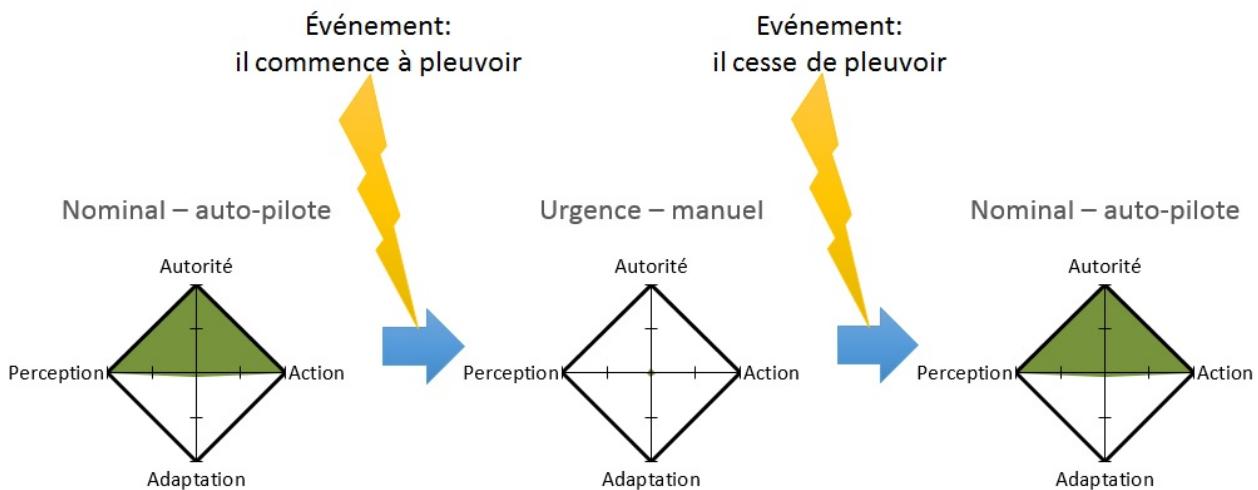


FIGURE 3.4 – Le drone Ressac surpris par une courte pluie [41] est initialement en mode “nominal – auto-pilote”. Quand la pluie débute, le pilote de sécurité provoque la transition vers le mode “urgence – manuel”. Quand la pluie cesse, le pilote de sécurité provoque le retour vers le mode “nominal – auto-pilote”.

Au contraire, en mode “urgence – manuel”, le comportement du drone n'est nullement autonome : c'est le pilote de sécurité qui prend les décisions, sur la base de ses perceptions, et qui les met en œuvre.

Un niveau d'autorité à 1 pour le drone avant qu'il ne pleuve et après qu'il est cessé de pleuvoir peut surprendre. Il peut par exemple sembler inapproprié de considérer que le drone décide de lui-même qu'il doit se rendre au point beta puisqu'il s'y rend conformément à ses instructions. C'est pourtant bien le drone qui détermine que le moment est venu de mettre en œuvre un comportement à même d'accomplir cet objectif. L'autonomie est l'absence de guidage et non pas l'absence de guidance.

Il faut prendre garde à ne pas sur-interpréter les données de LOA4. Les trois premières dimensions de LOA4 – perception, autorité et action – portent seulement sur le comportement du drone. Par exemple, en mode “nominal – auto-pilote”, l'humain est absent de l'établissement des croyances (perception à 1), du choix de la mise en œuvre (autorité à 1) et de la mise en œuvre elle-même (action à 1). Il en résulte que le drone dispose d'une immense autonomie. Pour autant, cela ne signifie pas que l'humain, en mode “nominal – auto-pilote”, soit aveugle, indécis et impuissant. “Drone autonome” ne veut pas dire “drone hors de contrôle”.

L'exemple du drone Ressac utilise uniquement l'automatisation adaptable. Un exemple d'adaptation adaptive est donné – avec humour – par Tom Cheney (Fig. 3.5).

Enfin, le diagramme radar peut mentionner des limites inférieures ou supérieures à l'autonomie. Par exemple, si l'on considère que l'humain doit toujours pouvoir reprendre la main s'il le souhaite, il faut une adaptation à 0 ou à 0.x pour toutes les activités. De même, si l'usage des armes nécessite l'autorisation de l'humain, l'autorité ne peut-être qu'à 0 pour les activités concernées. Fig. 3.6 illustre l'usage de ces limites.

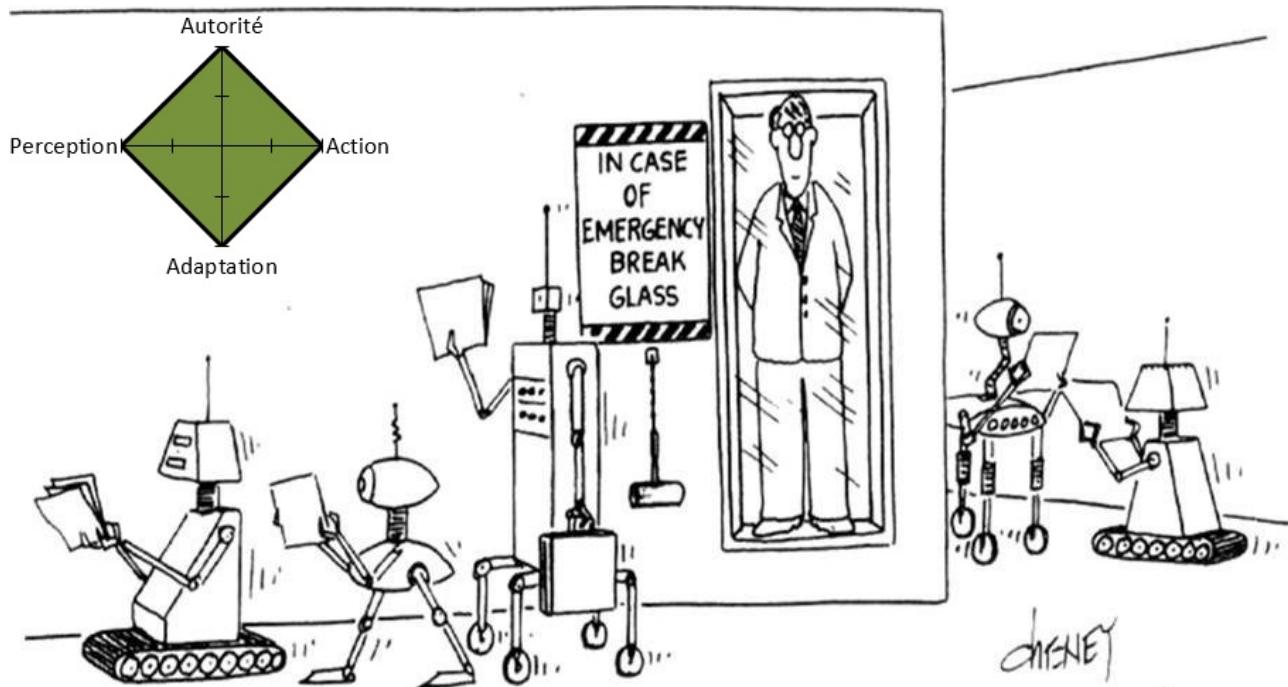


FIGURE 3.5 – Diagramme radar LOA4 superposé à une illustration de Tom Cheney d'un système complètement automatisé, y compris dans sa possibilité de cesser de l'être (adaptation à 1).

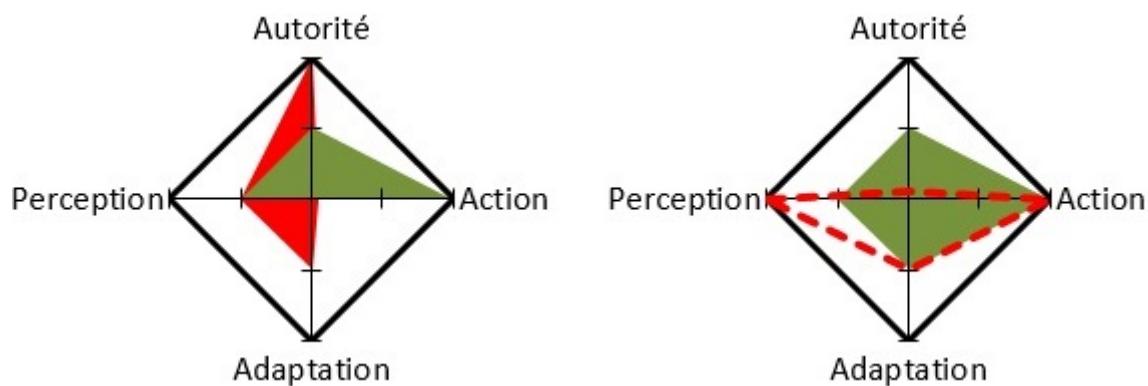


FIGURE 3.6 – Diagrammes radars LOA4 où sont figurées des limites à l'autonomie. Ces limites sont inférieures à gauche et supérieures à droite. À gauche l'espace rouge devrait être complètement caché par l'espace vert pour respecter les limites inférieures. À droite l'espace vert devrait être contenu dans l'espace délimité par des pointillés rouges pour respecter les limites supérieures.

## Publication

Nous avons présenté LOA4 en interne à THALES et en public en 2012 à MAST (Maritime Systems and Technologies).

La présentation à MAST s'est faite sous le titre "LOA5 : a new five-dimension model to design automatic systems". [10] Les retours ont conduit à l'intégration du feedback à la perception. Devenu LOA4, le référentiel initialement nommé LOA5 s'est allégé et a gagné en élégance :

- L'ensemble est maintenant plus symétrique, avec l'autorité au centre, la perception en amont (à gauche) et l'action en aval (à droite). Cette symétrie souligne que l'autorité autorise à agir en fonction de ce qui est perçu. Cet aspect est conservé dans la représentation triangulaire (Fig. 3.3) dont l'adaptation est absente.
- L'adaptation est également centrale, rappelant ainsi qu'elle est aussi une autorité, et plus précisément une méta-autorité.

### 3.1.2 Représentation

LOA4 vise à dégager une vue d'ensemble de l'autonomie relative d'un agent. Cette vue d'ensemble est ce qui fait l'intérêt du référentiel Sheridan 4D. L'absence de cette vue d'ensemble est ce qui fait le plus défaut au référentiel PACT. LOA4 est à la fois une synthèse et une extension PACT. LOA4 complète PACT notamment en lui adjoignant cette vue d'ensemble.

Le diagramme radar LOA4 restitue une vue d'ensemble du fonctionnement actuel de l'agent automatisé et des modalités de changement de ce fonctionnement. Ce diagramme radar LOA4 peut-être employé de nombreuses fois dans une IHM pour rendre compte du fonctionnement courant d'autant d'agents. C'est ce qu'illustre Fig. 3.7.

Fig. 3.7 figure la surveillance d'une zone maritime dans le cadre d'une démonstration du système BOBAC [84] développé par THALES Systèmes Aéroportés. BOBAC permet d'émettre des hypothèses et de les réfuter. Ceci est accompli par la confrontation des faits à des règles élicitées au préalable et exprimées grâce à une grammaire adéquate.

Dans le contexte d'une telle surveillance, le diagramme radar LOA4 est un composant d'IHM pratique qui pourrait efficacement permettre de rendre compte efficacement du fonctionnement courant des divers drones. En l'occurrence, dans Fig. 3.7, il rend compte des informations suivantes :

- Un des drones est dépendant d'un humain pour établir ses croyances, ce qui dans ce contexte signifie qu'il est dans l'attente d'un point de vue humain sur ce qu'il vient de percevoir.
- Un des drones est en mode manuel.
- Les autres drones sont autonomes mais disponibles.

Le diagramme radar LOA4 n'est qu'un composant IHM : il n'a pas vocation à être exhaustif et d'autres éléments d'IHM peuvent venir compléter l'information qu'il met à disposition.

Un exemple d'information qui n'est pas contenue dans le diagramme LOA4 lui-même et qui peut-être judicieusement complétée par le reste de l'IHM est le libellé du fonctionnement courant du drone. Un même état LOA4 peut en effet caractériser plusieurs fonctionnements distincts (et donc avec des transitions distinctes vers d'autres fonctionnements).



FIGURE 3.7 – Simulation démontrant le système BOBAC à laquelle est superposée la visualisation du comportement des drones grâce au diagramme radar LOA4.

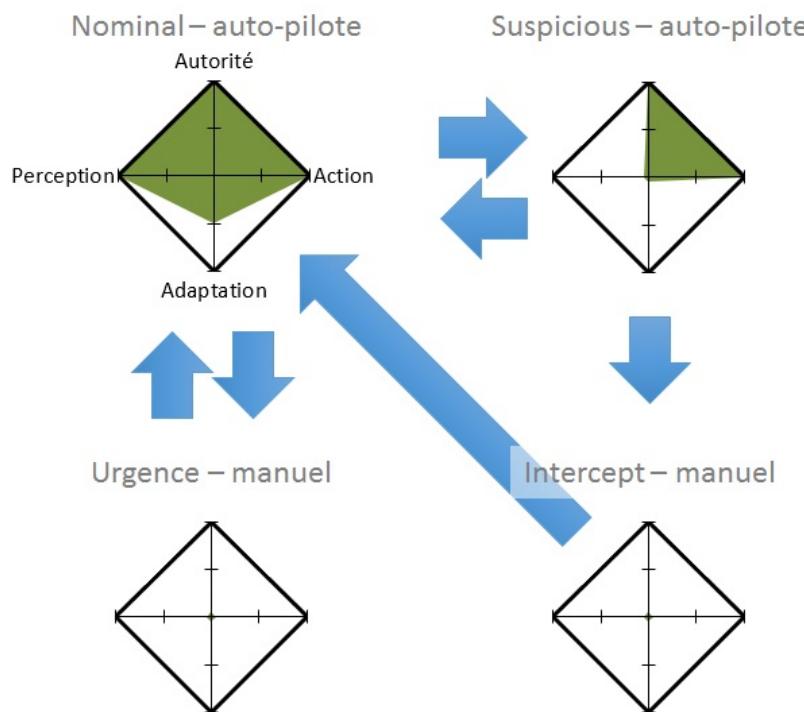


FIGURE 3.8 – Les transitions possibles entre les quatre fonctionnements LOA4 à l’œuvre dans l’expérience illustrée par Fig. 3.7.

Dans Fig. 3.7, il y a plusieurs fonctionnements en mode pilotage manuel. L’ensemble des fonctionnements et des transitions entre eux est représenté dans Fig. 3.8. Les deux fonctionnements en mode pilotage manuel ont les mêmes transitions vers les autres fonctionnements, il peut-être cependant quand même intéressant de les distinguer. Un drone en mode urgence pourrait ainsi être en rouge, alors qu’un drone en mode interception pourrait être en orange. Il ne s’agit là que de suggestions, c’est aux créateurs d’IHM de s’emparer de la question.

Le diagramme radar LOA4 pourrait devenir un composant standard des IHM des systèmes de mission et faciliter les rapprochements d’un système à un autre pour les opérateurs comme pour les concepteurs.

### 3.1.3 Reprise de l’existant PACT

LOA4 est à la fois une synthèse et une extension de PACT. En tant que synthèse, LOA4 a vocation à s’approprier l’existant PACT. Cet existant est conséquent dans des entreprises comme THALES. Nous proposons ici une méthode systématique mais seulement partiellement automatique.

Nous allons expliquer la procédure tout en l’illustrant au moyen d’un exemple. Cet exemple se base sur le tableau 3.3, un tableau PACT basé sur Fig. 2.7 reprise elle-même du rapport TR-HFM-078 de la RTO de l’OTAN.[1]

La synthèse se fait en trois étapes :

TABLE 3.3 – Le tableau PACT des niveaux d'automatisation des tâches d'un drone sous-marin, transcrit de Fig. 2.7, elle même reprise du rapport TR-HFM-078 de la RTO de l'OTAN [1].

		Launch	Transit	Search	Main	Transit	Recovery
Control Vehicle	Capture target			5			
	Avoid target			5			
	Terrain avoidance	5	5	5	5	5	5
Navigate	Monitor position		4		4	4	
	Update route plan	5	5	5	5	5	5
	Identify waypoints		3		3	3	3
Manage Systems	Manage DAS	4	4	5	4	4	4
	Manage weapons	0	0	5	0	0	0
	Manage fuel	5	5	5	5	5	5
Manage Mission	Manage unexpected	0	0	5	0	0	0
	Progress time mgt	2	2	5	2	2	2
	Assess situation	0	2	5	2	2	0

TABLE 3.4 – Agrégation de niveaux LOA4.

$a$	$b$	$\emptyset$	0	$0.x$	1
+		$\emptyset$	0	$0.x$	1
$\emptyset$		$\emptyset$	0	$0.x$	1
0		0	0	$0.x$	$0.x$
$0.x$		$0.x$	$0.x$	$0.x$	$0.x$
1		1	$0.x$	$0.x$	1

1. **L'affectation** Pour chaque tâche du tableau PACT, identifier la dimension LOA4 correspondante, ou les dimensions LOA4 correspondantes (c.f. : Tableau. 3.5).
2. **La transcription** Pour chaque niveau du référentiel PACT, utiliser le niveau LOA4 correspondant (c.f. : Tableau. 3.6). La correspondance se fait comme suit :
  - Pact 0 – 3 → LOA4 0
  - Pact 4 → LOA4 0.x
  - Pact 5 → LOA4 1
3. **L'agrégation** Agréger par dimension LOA4 les niveaux des activités correspondantes (c.f. : Tableau. 3.7). L'agrégation des niveaux de deux activités relevant d'une même dimension LOA4 peut se faire comme prescrit par le tableau 3.4. Cette agrégation est une opération commutative.

L'affectation des tâches aux dimensions de LOA4 nécessite une expertise humaine.

La transcription projette les deux premiers tiers des niveaux PACT, de 0 à 3, vers le seul niveau 0 de LOA4. C'est la manifestation de l'intérêt de LOA4 pour les niveaux supérieurs de l'automatisation, c'est à dire pour l'autonomie.

TABLE 3.5 – Le tableau 2.7 des niveaux d’automatisation des tâches d’un drone sous-marin après affectation des tâches aux quatre dimensions de LOA4.

		LOA4	Launch	Transit	Search	Main	Transit	Recovery
Control Vehicle	Capture target	Action			5			
	Avoid target				5			
	Terrain avoidance		5	5	5	5	5	5
Navigate	Monitor position	Perception		4		4	4	
	Update route plan		5	5	5	5	5	5
	Identify waypoints			3		3	3	3
Manage Systems	Manage DAS	Autorité	4	4	5	4	4	4
	Manage weapons		0	0	5	0	0	0
	Manage fuel		5	5	5	5	5	5
Manage Mission	Manage unexpected	Perception Décision Action	0	0	5	0	0	0
	Progress time mgt		Autorité	2	2	5	2	2
	Assess situation		Perception	0	2	5	2	0

TABLE 3.6 – Le tableau 2.7 des niveaux d’automatisation des tâches d’un drone sous-marin après transcription des niveaux PACT dans les trois niveaux LOA4.

		LOA4	Launch	Transit	Search	Main	Transit	Recovery
Control Vehicle	Capture target	Action	∅	∅	1	∅	∅	∅
	Avoid target		∅	∅	1	∅	∅	∅
	Terrain avoidance		1	1	1	1	1	1
Navigate	Monitor position	Perception	∅	0.x	∅	0.x	0.x	∅
	Update route plan		1	1	1	1	1	1
	Identify waypoints		∅	0	∅	0	0	0
Manage Systems	Manage DAS	Autorité	0.x	0.x	1	0.x	0.x	0.x
	Manage weapons		0	0	1	0	0	0
	Manage fuel		1	1	1	1	1	1
Manage Mission	Manage unexpected	Perception Décision Action	0	0	1	0	0	0
	Progress time mgt		Autorité	0	0	1	0	0
	Assess situation		Perception	0	0	1	0	0

TABLE 3.7 – Le tableau 2.7 des niveaux d'automatisation des activités d'un drone sous-marin après agrégation des tâches en fonction de leurs niveaux LOA4 pour le seul mode "nominal".

			Launch	Transit	Search	Main	Transit	Recovery
Control Vehicle	Action	1	1	1	1	1	1	1
Navigate	Perception	Ø	0.x	Ø	0.x	0.x	0	
	Action	1	1	1	1	1	1	1
Manage Systems	Autorité	0.x	0.x	1	0.x	0.x	0.x	
	Perception	1	1	1	1	1	1	1
Manage Mission	Autorité	0	0	1	0	0	0	
	Perception	0	0	1	0	0	0	
Overall	Perception	0	0.x	1	0.x	0.x	0	
	Autorité	0.x	0.x	1	0.x	0.x	0.x	
	Action	1	1	1	1	1	1	1

En absence d'information sur l'adaptation, nous faisons ici l'hypothèse qu'elle est toujours à l'initiative de l'humain. Ce besoin de faire cette hypothèse est symptomatique d'un intérêt inégal pour l'adaptation : occasionnel avec PACT, il est systématique avec LOA4.

L'activité "manage unexpected" produit beaucoup de 0.x, ce qui fait perdre trop de sens à l'agrégation, il est préférable de l'isoler dans un fonctionnement dédié que nous nommons "unexpected". Ce fonctionnement est à opposer à un fonctionnement "nominal".

Cette activité "manage unexpected" est un classique des missions de drones, nous avions par exemple vu dans l'état de l'art la tâche "A7.5.1.12 Carry out Emergency Procedure for AV in Flight Fault" (c.f. : tableau 2.2, source : THALES Systèmes Aéroportés [20]) et le mode "urgence – manuel" du drone RESSAC. [41]

Distinguer des fonctionnements distincts nécessite une expertise humaine. Cela contribue à empêcher une automatisation de la synthèse de PACT dans LOA4.

La synthèse LOA4 d'un tableau PACT peut-être visualisée à l'aide d'un arbre. Ainsi, la synthèse du tableau 2.7 dans LOA4 après la troisième et dernière étape ayant pour résultat le tableau 3.7 peut-être visualisée dans l'arbre de Fig. 3.9.

L'arbre LOA4 pour le fonctionnement nominal tiré du tableau 2.7 est dominé par des valeurs à 0.x, ce qui est révélateur d'une co-dépendance très forte de l'humain et des systèmes automatisés.

Nous constatons à la ligne des phases de la mission que l'humain est surtout présent au lancement et à la récupération. Un parallèle peut-être fait avec, souvent, la présence plus importante de l'humain au décollage et à l'atterrissement pour les drones aériens.

De même, la totale automatisation de la phase de recherche est bien mise en évidence. Dans le tableau original dans le référentiel PACT, la colonne de 5 délivre la même information, mais la percevoir demande une lecture plus attentive.

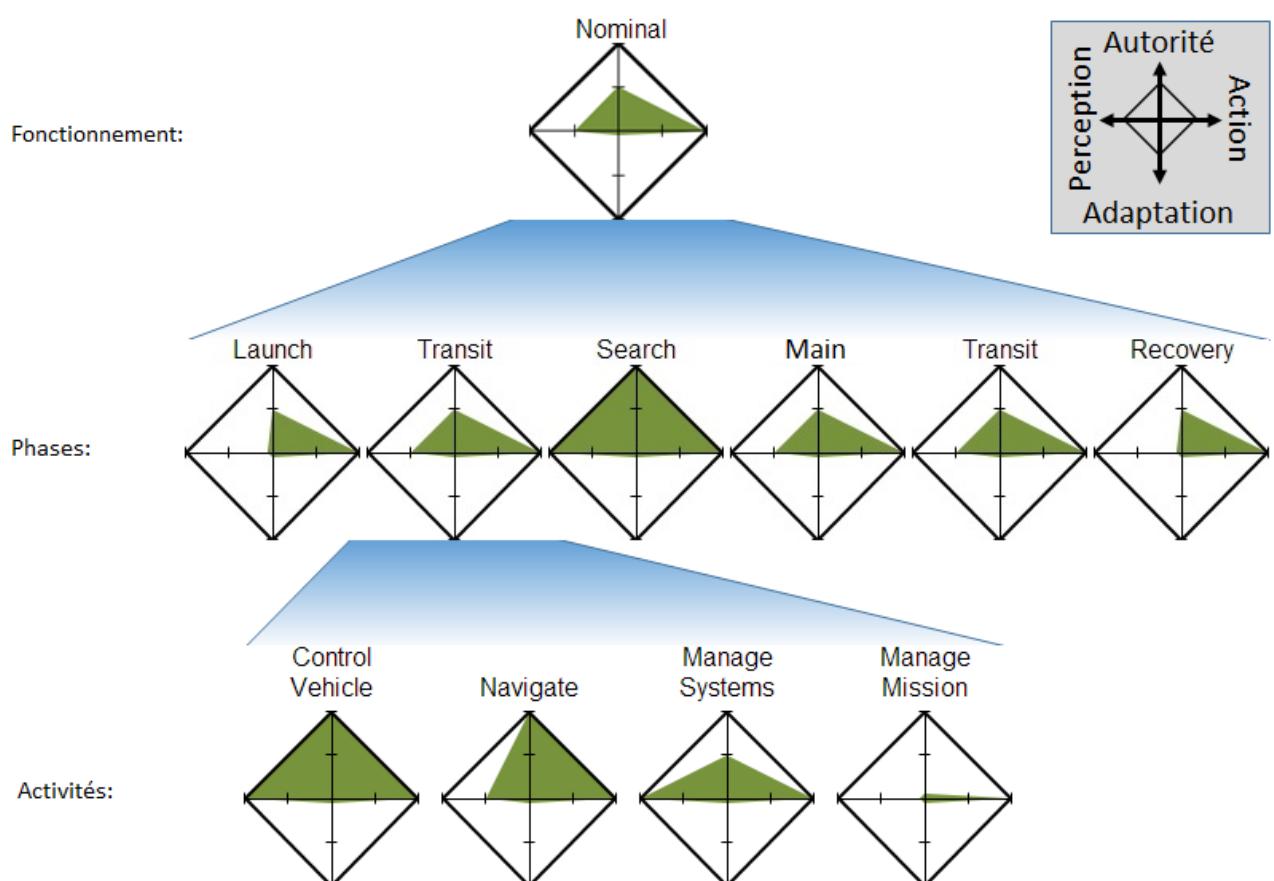


FIGURE 3.9 – L'arbre de l'agrégation par LOA4 du tableau 2.7. Le niveau 0 pour l'adaptation est une hypothèse. Ø vaut 1 car il correspond à l'absence de l'humain.

Le diagramme radar, permis par la régularité des trois mêmes niveaux par dimension, délivre ici une information très semblable à un tableau PACT, mais plus rapide à visualiser, ce qui est un bénéfice majeur.

### 3.1.4 Reprise de l'existant UML

L'information PACT est souvent elle-même la transcription d'une vision modélisée sous la forme de diagrammes UML comme celui échantilloné en Fig 3.10 et rendu public par THALES Systèmes Aéroportés. [20]

Dans le détail, le fonctionnement est donc connu. L'objectif de LOA4 est de faire émerger une information plus synthétique.

À cet égard, l'approche PACT a l'inconvénient de beaucoup fragmenter là où LOA4 peut agréger. Une approche efficace est de documenter comme pour PACT mais en anticipant la synthèse LOA4, ce qui implique en particulier :

- De distinguer les fonctionnements.
- D'affecter les tâches aux quatre dimensions de LOA4.
- De s'interroger systématiquement sur l'adaptation.

Pour illustrer cette approche, reprenons le diagramme de séquences UML dans Fig. 3.10 pour y identifier les thématiques de LOA4.

- Il s'agit globalement d'une boucle de rétro-contrôle sous la directive de l'opérateur des senseurs pour maintenir la qualité de l'acquisition. L'opérateur doit donc établir des croyances quant à la qualité de l'acquisition et il doit, en conséquence, impacter la mise en œuvre. La perception et la mise en œuvre sont donc les deux dimensions LOA4 concernées.
- L'objectif sous-jacent de maintenir la qualité de l'acquisition n'est jamais remis en cause. Plus globalement la procédure UML ne concerne pas la gestion des objectifs. L'autorité n'est donc pas une dimension LOA4 concernée.
- Le fonctionnement n'est pas appelé à changer, l'adaptation n'est donc pas non plus une dimension LOA4 concernée.

Dans un premier temps nous identifions les tâches pour pouvoir choisir ensuite celles à affecter aux dimensions LOA4.

Nous identifions les tâches grâce aux messages émis :

- Download the sensors image → (pour l'émetteur) Input (Aeronautical Segment).
- Out of the field of view → (pour l'émetteur) Evaluate the need for another scope (Payload Operator).
- Request a change of trajectory → (pour l'émetteur) Evaluate the need for a change of directory (Payload Operator).
- Request a change of the flight plan → (pour l'émetteur) Evaluate the need for a change of the flight plan (CGS Navigation System).

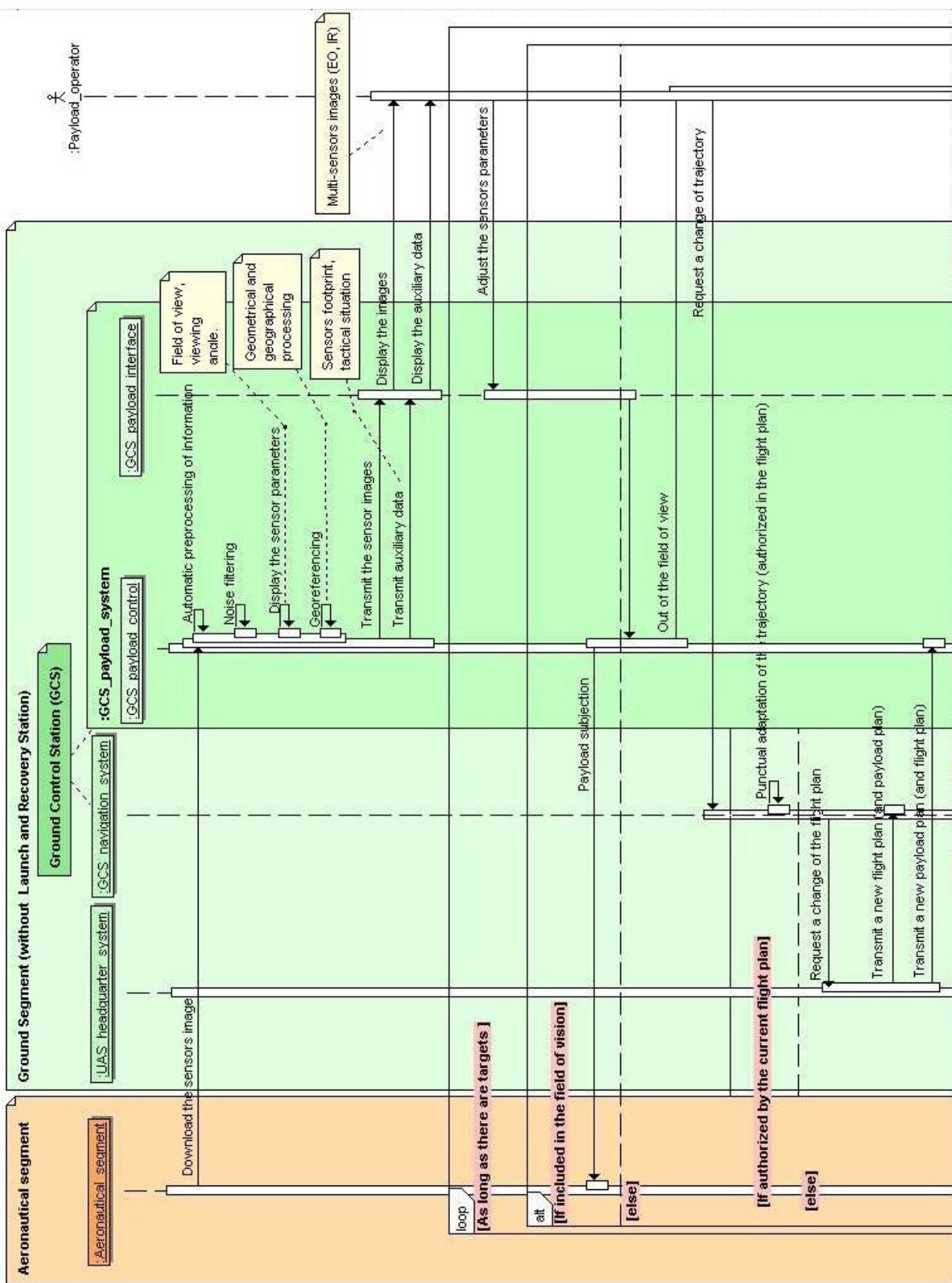


FIGURE 3.10 – Extrait d'un diagramme de séquences UML proposé par THALES Systèmes Aéropor  ts et décrivant un scénario opérationnel dans lequel un opérateur des senseurs interagit avec une plateforme par le biais d'une station de contrôle au sol (source : [20]).

- Request a change of the flight plan → (pour le destinataire) Produce a new flight and payload plan (CGS Navigation System).
- Transmit a new flight plan (and payload plan) → (pour l'émetteur) idem (CGS Navigation System). Notons au passage qu'une même opération peut-être identifiée par plusieurs transactions.
- Payload subjection → (destinataire) Output (Aeronautical Segment).

Nous élaguons ce qui concerne l'IHM :

- Display the sensors parameters (CGS Payload Control).
- Display the images (CGS Payload Interface).
- Display auxiliary data (CGS Payload Interface).

Nous élagons aussi les transactions sans valeur ajoutée. C'est le cas de :

- Transmit the sensor images (CGS Payload Control).
- Transmit auxiliary data (CGS Payload Control).

Nous identifions les tâches qui relèvent de la dimension LOA4 perception parce qu'elles contribuent à établir des croyances :

- Perception (Aeronautic Segment) :
  - Input (Aeronautic Segment).
- Perception (CGS) :
  - Automatic preprocessing of information (CGS Payload System).
  - Noise filtering (CGS Payload System).
  - Georeferencing (CGS Payload System).
  - Evaluate the need for a change of flight.
- Perception (Payload operator) :
  - Evaluate the need for a change of trajectory.
  - Evaluate the need for another scope.
  - Adjust the sensors parameters.

Les tâches “evaluate the need for a change of flight”, “evaluate the need for a change of trajectory” et “evaluate the need for another scope” ne relèvent pas de l'autorité puisqu'elles ne modifient pas les objectifs. Elles relèvent par contre de l'établissement de croyances portant sur l'adéquation du vol, de la trajectoire ou de la perspective (*scope*).

La tâche “adjust the sensors parameters” suppose l'établissement d'une croyance comme quoi les senseurs ont besoin d'être ajustés. Il s'agit donc d'une perception. Il s'agit aussi d'une action. Cette tâche relève donc à la fois de la perception et de l'action, il s'agit d'une boucle de rétro-contôle typique.

Nous identifions ensuite les tâches qui relèvent de la dimension LO4 action parce qu'elles contribuent à la mise en œuvre :

TABLE 3.8 – Informations complémentaires sur le poste de l'opérateur de la charge utile œuvrant dans la procédure de Fig. 3.10 (source : [20]).

Role	To pilot the payload , request and interpretation of pictures
Responsabilities	To detect targets on the designated area of interest and send data to the UAS Command Post
Activity context	From the receipt of the mission order to the end of mission
Resources	HCI-PO, HCI-NAV, data link, EO sensor, IR sensor
Comments	HCI shared on two screens, control by joystick and mouse HCI-NAV rewrite of HCI-NAV, used for coordination

- Action (Aeronautic Segment) :
  - Output (Aeronautic Segment).
- Action (CGS) :
  - Produce new flight and payload plan (UAS HQ System).
  - Punctual adaptation of the trajectory (CGS Navigation System).
- Action (Payload operator) :
  - Adjust the sensors parameters.

La tâche “adjust the sensors parameters” peut sembler être une action trop minime pour justifier d'être considérée comme une action. Mais il serait impossible de définir des paliers pour évaluer qu'une action en est bien une. Par exemple, à partir de quelle vitesse angulaire considérerait-on qu'actionner une pédale d'accélérateur est bien une action ?

Fig. 3.11 récapitule la classification des tâches identifiées dans Fig. 3.10.

Cette synthèse est exprimée par le tableau 3.9. En l'absence d'information sur l'autorité (mise à jour des objectifs) et sur l'adaptation (changement de fonctionnement), et en vue de construire un diagramme radar LOA4 complet, nous faisons l'hypothèse que l'autorité et l'adaptation sont pris en charge par l'humain. Avec ces deux hypothèses, le résultat doit être considéré avec prudence. Mais dans un contexte industriel où la totalité des modélisations UML sont disponibles, ainsi que les documentations les accompagnant (e.g. : les fiches de postes ; c.f. : Fig. 3.8), un tel diagramme radar pourrait être établi avec plus de certitude et permettre à un lecteur d'acquérir plus aisément une idée du processus.

Le diagramme LOA4 correspondant est présenté dans Fig. 3.12. Un schéma, Fig. 3.13, ne conserve que les aspects nécessaires à LOA4 parmi ceux présents dans Fig. 3.10 pour élaborer ce diagramme LOA4.

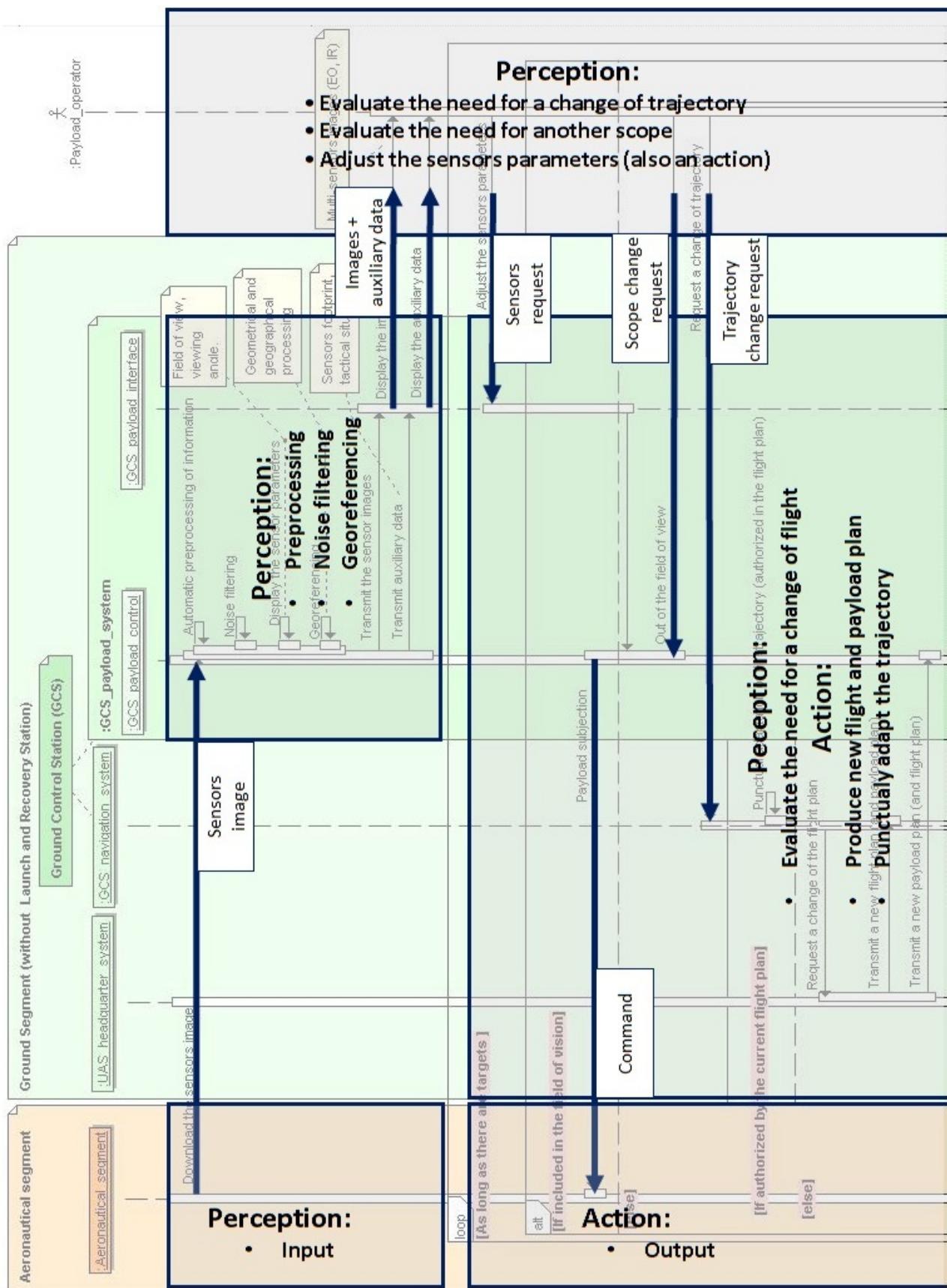


FIGURE 3.11 – Groupements des tâches identifiées dans Fig. 3.10.

TABLE 3.9 – Le diagramme LOA4 résultant 3.13 sous la forme d'un tableau.

	LOA4	Aeraunotical Segment	CGS	Payload Operator	$\Sigma$
Input	Perception	1			0.x
Automatic preprocessing of information			1		
Noise filtering			1		
Georeferencing			1		
Evaluate the need for a change of trajectory				0	
Evaluate the need for another scope				0	
Adjust the sensors parameters				0	
Autorité (hypothèse)				0	0
Evaluate the need for a change of flight			1		0.x
Adjust the sensors parameters				0	
Produce new flight and payload plan	Action		1		
Punctual adaptation of the trajectory			1		
Output			1		
Adaptation (hypothèse)				0	0

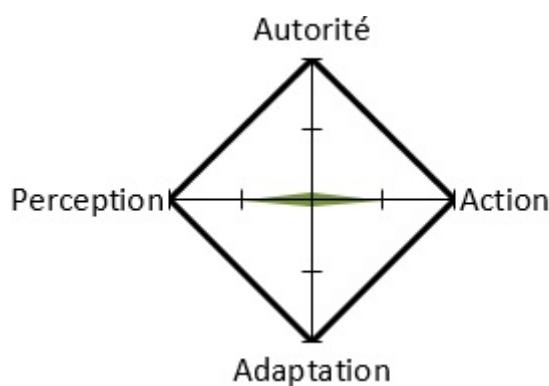


FIGURE 3.12 – Le diagramme radar LOA4 correspondant à l'information contenue dans le tableau 3.9. 3.10.

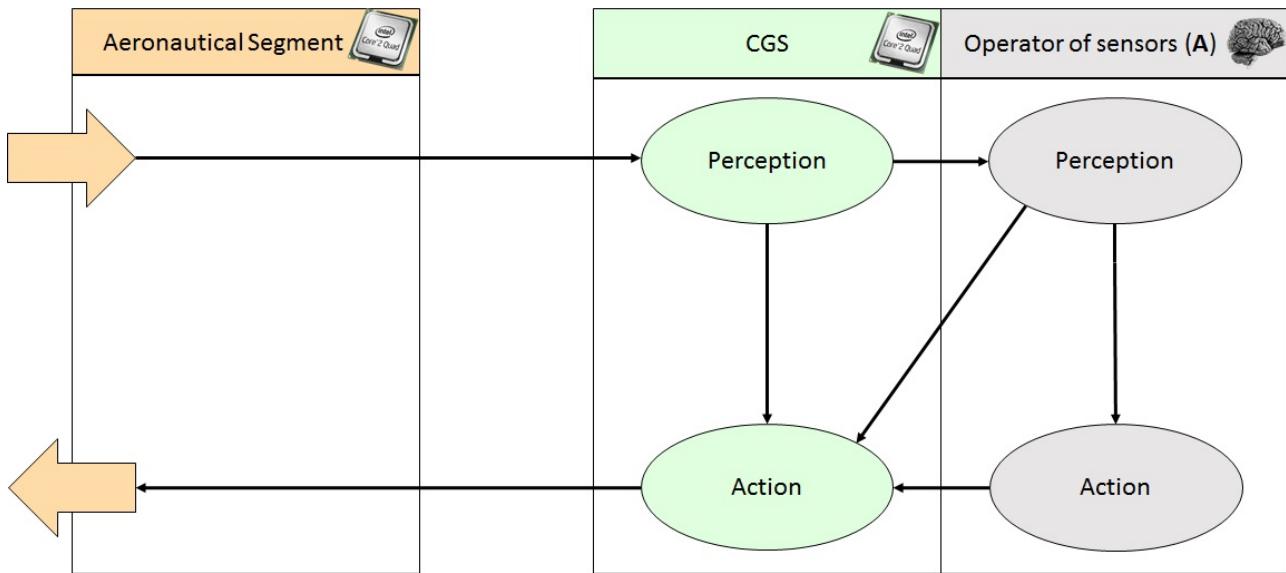


FIGURE 3.13 – Un schéma ne conservant que les aspects nécessaires à LOA4 parmi ceux présents dans Fig. 3.10. Le (A) en haut à droite indique que l'opérateur des senseurs a la possibilité de provoquer une transition vers un autre fonctionnement, conformément à notre hypothèse sur l'adaptation.

Cette procédure UML a vocation à s'inscrire dans un fonctionnement plus global. Nous pouvons par exemple envisager l'enchaînement qui suit avec cinq fonctionnements successifs *A*, *B*, *D* et *E* (c.f. : Fig. 3.14 et 3.15) :

- **Fonctionnement *A*** : La plateforme est initialement complètement autonome dans le cadre d'une mission de repérage. Elle prend ses propres décisions en fonction de ses propres perceptions et elle les met en œuvre de sa propre initiative. La perception, l'autorité et l'action sont donc au niveau 1. La plateforme peut, de sa propre initiative, modifier son fonctionnement en sollicitant la CGS, ce qui provoque la transition vers le fonctionnement *B*. La CGS et le coordinateur de mission ont aussi la possibilité de prendre l'initiative de changer le fonctionnement de la plateforme pour la mobiliser.
- **Fonctionnement *B*** : Ayant repéré quelque chose d'intérêt, la plateforme demande à la CGS de mettre en œuvre une triangulation grâce à une deuxième plateforme pour procéder à un repérage plus précis. Cette action est en l'occurrence centralisée, mais elle serait aussi possible à organiser localement. Un autre exemple d'action collective organisée localement est le relais de communication qui évite aux drones d'émettre des signaux assez puissants pour trahir la présence ou la position des drones. Comme la plateforme est assujettie à la CGS, elle lui délègue la responsabilité de l'établissement des croyances, de la gestion des objectifs et de la mise en œuvre.
- **Fonctionnement *C*** : L'intérêt de l'élément repéré est maintenant confirmé et la situation justifie une action coordonnée avec des navires de la Marine, dont la disponibilité n'est pas encore connue. Cette prise de conscience par les systèmes automatisés provoque la transition vers le fonctionnement *C*. La plateforme devrait maintenant être utilisée en soutien et la CGS n'est plus responsable des objectifs la concernant. Au niveau de la CGS, les systèmes automatisés se tiennent prêts à recevoir une consigne du

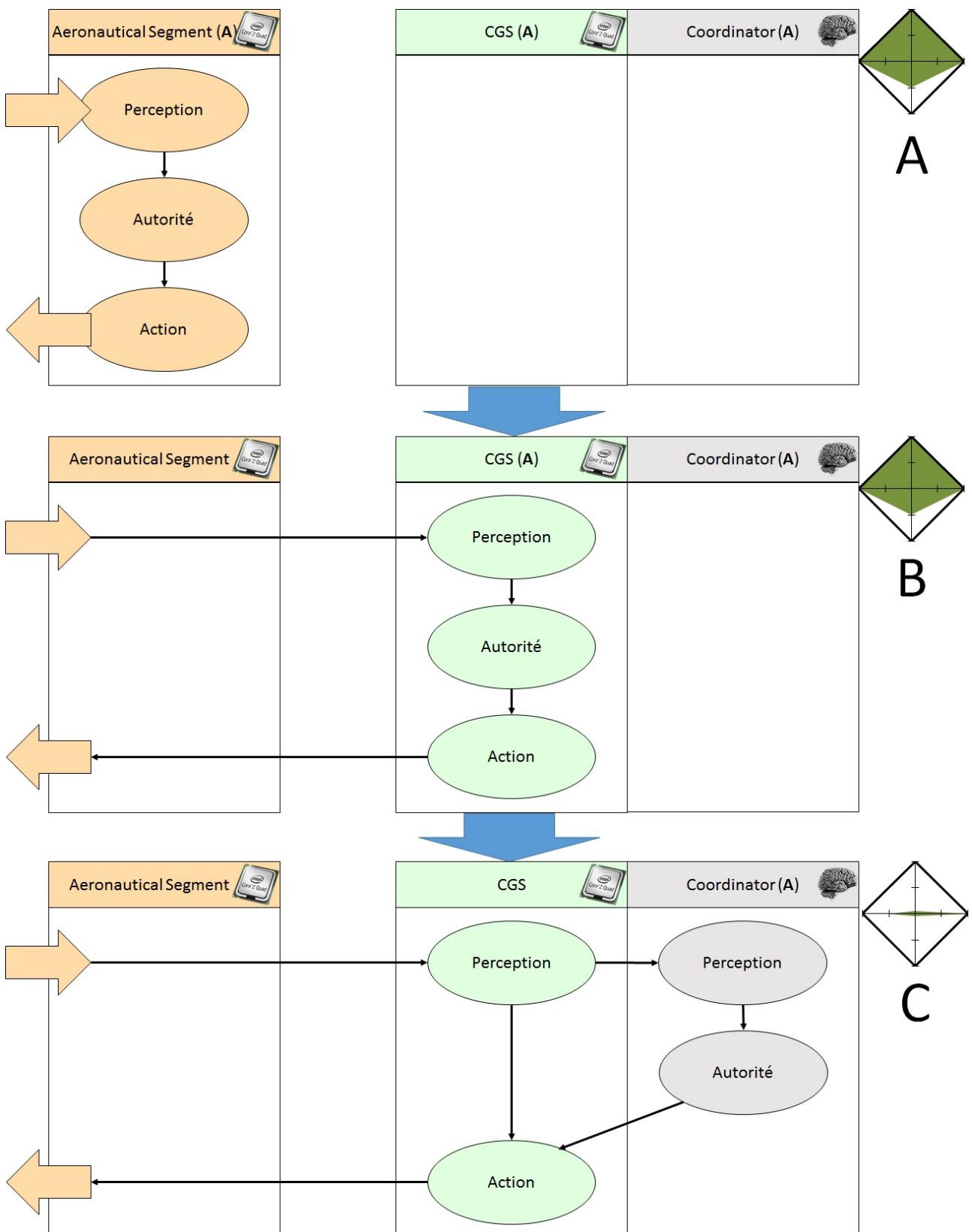


FIGURE 3.14 – Deux fonctionnements A et B pouvant conduire au fonctionnement C (c.f. : Fig. 3.13) par le biais de l'adaptation.

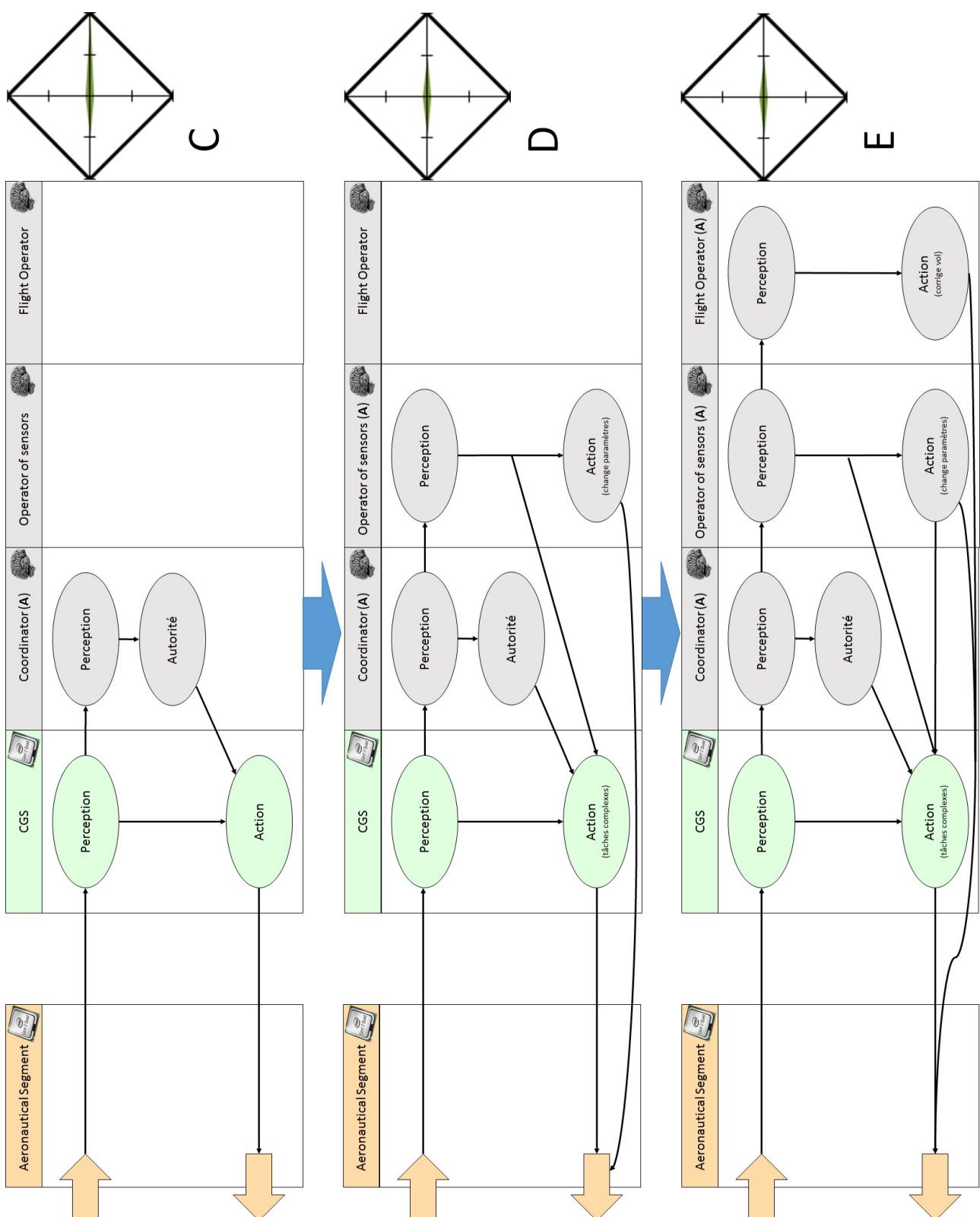


FIGURE 3.15 – Deux fonctionnements D et E pouvant succéder au fonctionnement C (c.f. : Fig. 3.13) par le biais de l'adaptation.

coordinateur de mission. Dans un contexte dynamique, se tenir prêt est une tâche à part entière et les systèmes automatisés ont la responsabilité de sa mise-en œuvre. À cette fin, ils continuent à prendre activement part à l'établissement des croyances. Ils n'ont aucune autorité : un objectif leur a été assigné (de façon automatique lors de la transition au fonctionnement *C*) et il ne leur appartient ni de remettre cet objectif en cause, ni d'en acquérir de nouveaux.

- **Fonctionnement *D*** : Le coordinateur de mission souhaite s'assurer de la qualité de l'acquisition, à cette fin il mobilise l'opérateur des senseurs et l'implique dans la boucle de rétro-contrôle de la plateforme. Cela provoque la transition vers le fonctionnement *D*. Cette sollicitation différée de l'opérateur des senseurs à l'initiative du coordinateur de mission est de nature à augmenter le ratio *nombre de drones / nombre d'humains*. L'opérateur des senseurs établit de nouvelles croyances relatives à la qualité de l'acquisition. Il met lui-même en œuvre les ajustements des paramètres des senseurs. Il peut aussi demander à la plateforme de changer de trajectoire ou de perspective (*scope*). C'est le fonctionnement déjà vu dans Fig. 3.13 et qui correspond à la procédure UML de Fig. 3.10 en ne conservant que les éléments nécessaires à LOA4.
- **Fonctionnement *E*** : Finalement l'opérateur des senseurs n'est pas satisfait de la qualité de l'acquisition en réponse à ses sollicitations concernant les trajectoires : le vol qu'il envisage s'inscrit mal dans les directives qu'il peut facilement donner à la plateforme et l'opérateur de vol comprendrait mieux ce qu'il faut faire. L'opérateur des senseurs demande donc à l'opérateur de vol de prendre le contrôle du vol de la plateforme, ce qui provoque la transition vers le fonctionnement *E*. Encore une fois cette sollicitation différée d'un humain – cette fois l'opérateur de vol – est de nature à augmenter le ratio *nombre de drones / nombre d'humains*. Comme l'opérateur des senseurs, l'opérateur de vol n'a pas d'autorité pour décider des objectifs, il vient juste complexifier la boule de rétro-contrôle permettant à la plateforme de se tenir prête pour le moment où le coordinateur de la mission décidera de s'en servir.

Le fonctionnement *D* est celui qui correspond le mieux à la procédure UML de Fig. 3.11, on y voit l'opérateur des senseurs susceptible d'ordonner :

- Un changement de trajectoire.
- Un changement d'observation (*scope*).
- Un changement des paramètres des capteurs.

Ordonner de tels changements consiste à prendre des décisions et prouve certainement un certain degré d'autorité. Mais dans la perspective LOA4, la seule autorité significative est celle qui conduit à mettre à jour les objectifs, ce qui n'est pas le cas ici.

### 3.1.5 Conclusion sur LOA4

LOA4 se focalise sur quatre aspects de l'automatisation : la perception, l'autorité, l'action et l'adaptation. Pour chacun de ces aspects, LOA4 se focalise sur la contribution humaine. Si la contribution humaine est indispensable, alors l'autonomie des systèmes automatisés est nulle et le niveau LOA4 correspondant est 0. Si au contraire la contribution humaine n'est jamais requise, alors l'autonomie des systèmes automatisés est totale et le niveau LOA4 correspondant est 1. Entre ces deux extrêmes, l'autonomie est partielle et le niveau LOA4 correspondant est 0.x.

À cet égard, LOA4 est plus une mesure de l'autonomie qu'une mesure de l'automatisation. L'avancée des technologies justifie de se focaliser comme le fait LOA4 sur la partie la plus automatisée du spectre de l'automatisation. Aujourd'hui, un niveau 1 de Sheridan 1D (aucune automatisation) ou un niveau 2 de Sheridan 1D (proposition de l'ensemble exhaustif des possibilités), ne correspondent plus aux solutions technologiques que les industriels comme THALES cherchent à développer pour répondre aux besoins exprimés par leurs clients. En particulier dans le contexte des drones, et avec cette volonté d'augmenter le ratio *nombre de drones / nombre d'humains*, il est bien probable que les systèmes automatisés vont être systématiquement et massivement mis à contribution. À l'heure actuelle, la question est bien d'avantage celle de ce que l'humain doit continuer à faire et du degré d'autonomie dont doivent disposer les systèmes automatisés. Les deux aspects de cette question sont complémentaires : ils se définissent réciproquement.

LOA4 permet la représentation élégante de l'autonomie dans un diagramme radar. Les positions centrales de l'autorité et de l'adaptation sont judicieuses. L'autorité se voit flanquée en amont de la perception et en aval de l'action. Ces positions sont porteuses de sens, intelligibles et faciles à retenir.

Les trois niveaux [0, 0.x, 1] de LOA4 permettent d'inférer le degré d'autonomie d'un système à partir des degrés d'autonomie des sous-systèmes qui le composent. C'est une approche *bottom-up* systématique qui permet certaines automatisations.

Enfin LOA4 permet de capitaliser sur l'existant PACT et UML tout en ajoutant une attention nouvelle pour l'adaptation.

Nous espérons que ses qualités donnerons envie à nos lecteurs de tester eux-mêmes LOA4 pour se l'approprier et le diffuser.



## 3.2 Proposition d'un système décisionnel

LOA4 peut être descriptif ou prescriptif : il s'agit de s'intéresser à la contribution humaine, soit comme elle est, soit comme on souhaiterait qu'elle soit. En l'occurrence nous souhaitions proposer un système décisionnel où l'humain et les systèmes automatisés se complètent, ce qui correspond à un niveau 0.x dans la dimension de LOA4 consacrée à l'autorité. L'ambition sous-jacente, comme annoncée dans l'introduction et conformément au rapport de l'OTAN de 2007, [1] est de proposer un système d'information et de décision qui protège et préserve le rôle clé de l'utilisateur humain, et ce parce que les connaissances humaines, l'expérience humaine et le jugement humain fournissent une capacité unique à analyser les risques liés à la sécurité et à anticiper dans des situations incertaines et inédites.

Nous avons proposé un tel système à travers un prototype, Aerial, [15] qui pour l'essentiel est un CNP [18] modifié. À travers cette proposition, nous nous sommes attachés dès le départ [19] à optimiser le temps dont l'humain dispose pour faire des choix critiques quand des objectifs majeurs sont en conflit. Nous verrons en conclusion de cette partie une expérimentation visant à augmenter ce temps grâce au sacrifice d'objectifs mineurs.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre consacré à la surveillance maritime par des drones, un objectif consiste à survoler un navire suspect. L'importance de l'objectif résulte de la combinaison entre l'intensité de la suspicion et l'objet de la suspicion. Dans un contexte dynamique, des événements peuvent remettre en cause des croyances établies – ou en ajouter de nouvelles – ce qui peut résulter dans une augmentation ou une diminution de l'importance d'objectifs.

Deux objectifs peuvent avoir des scores d'importance si proches qu'il n'est pas possible d'avoir une certitude quant à l'objectif le plus important, la méthode de scoring pouvant être prise en défaut. Il est alors justifié de considérer que ces objectifs relèvent d'une même catégorie d'importance.

Quand au contraire les différences des scores d'importance entre deux objectifs est significative, les catégories d'importance – ici mineure et majeure – permettent aux systèmes automatisés de traiter distinctement ces objectifs avec la certitude que l'un est plus important que l'autre.

L'intérêt des catégories d'importance est de permettre d'envisager des permutations aveugles aux nuances entre les objectifs d'une même catégorie. De nombreux algorithmes, comme ceux qui s'intéressent au très classique problème du voyageur de commerce et comme ceux qu'utilisent Airplan [61] font usage de ces permutations.

Être indifférent à certaines nuances entre des objectifs d'une même catégorie d'importance est parfaitement légitime :

- Dans le cas de conflits entre des objectifs mineurs, les nuances entre des objectifs mineurs ne justifient pas l'intérêt de l'utilisateur.
- Dans le cas de conflits entre des objectifs majeurs, les nuances justifient au contraire l'intérêt de l'utilisateur. Il vaut alors mieux ne pas préjuger favorablement de la capacité des systèmes automatisés à se substituer à l'expertise de l'utilisateur (c.f. : [16]) pour décider de quels objectifs majeurs sont effectivement les plus importants.

Quand des objectifs majeurs sont en conflit, des formules mathématiques obtenues par élicitation pourraient abusivement conduire à traiter comme une certitude la plus grande importance

d'un objectif majeur par rapport à un autre. Mais dans ces situations critiques, l'humain est le seul à pouvoir rendre un avis final sur la question parce qu'il est témoin de la réalité de la situation et qu'il est conscient de paramètres pouvant de pas avoir été élicités, ou pouvant avoir été improprement élicités. Il est aussi parfois le seul à pouvoir assumer moralement un tel avis final.

C'est pour cela que lorsque deux objectifs majeurs sont en conflit, c'est l'humain qui est le plus à même de décider du plus important. **Faire que les systèmes automatisés considèrent comme équivalents entre eux des objectifs majeurs permet de ne pas usurper le rôle de l'humain dans le processus décisionnel.**

Pour autant, les nuances entre les objectifs d'une même catégorie d'importance – mineure ou majeure – demeurent disponibles et peuvent au besoin être mises à contribution. Si des alternatives sont équivalentes, elles ne sont pas pour autant nécessairement égales. Les nuances entre les objectifs d'une même catégorie d'importance sont sollicitées dans plusieurs cas :

- Quand les systèmes automatisés sont contraints à prendre immédiatement une décision *avant* que l'humain n'émette éventuellement un avis contraire, ce qui se justifie dans un contexte dynamique où le besoin premier peut être de décider vite.
- Quand les systèmes automatisés sont contraints à prendre une décision parce qu'il n'est pas judicieux – ou pas possible – de solliciter l'avis de l'humain.
- Quand les systèmes automatisés sollicitent l'avis de l'humain et l'informent de leur préférence a priori. Les nuances ont alors valeur d'indication (dans les deux cas qui précédent, elles ont valeur de prescription).

En somme, les systèmes automatisés ont à traiter deux types de problèmes :

- Quand ils souhaitent solliciter l'avis de l'humain, ils préparent des alternatives qu'ils considèrent comme équivalentes parce que c'est à l'humain de décider de quels objectifs doivent être priorisés. Pour ce faire, ils considèrent comme interchangeables les objectifs d'une même catégorie d'importance. Les systèmes automatisés font néanmoins usage des nuances d'importance entre les objectifs d'une même catégorie d'importance pour ordonner les alternatives qu'ils proposent.
- Quand ils ne souhaitent pas solliciter l'avis de l'humain, au moins dans l'immédiat, et qu'ils doivent prendre eux-mêmes une décision pour mise en œuvre immédiate, les systèmes automatisés font usage des nuances qu'ils ont établies pour guider au mieux leur jugement.

Il en va de même pour les modalités d'accomplissement. Si par exemple deux objectifs strictement égaux en matière d'importance sont en conflit et qu'ils se distinguent en ce que l'un nécessite un détour plus important que l'autre :

- Si les systèmes automatisés souhaitent solliciter l'avis de l'humain, les deux alternatives correspondantes seront équivalentes, mais les systèmes automatisés ne mentionneront que l'objectif nécessitant un détour moindre à leur préférence.
- Si les systèmes automatisés doivent décider d'eux-même de quel objectif prioriser, alors ils prioriseront celui qui a leur préférence : celui qui nécessite un détour moindre.

L'importance d'un objectif et les modalités pour l'accomplir sont deux paramètres qui se télescopent. Dans un contexte dynamique où l'imprévu peut subvenir et où de nouveaux besoins

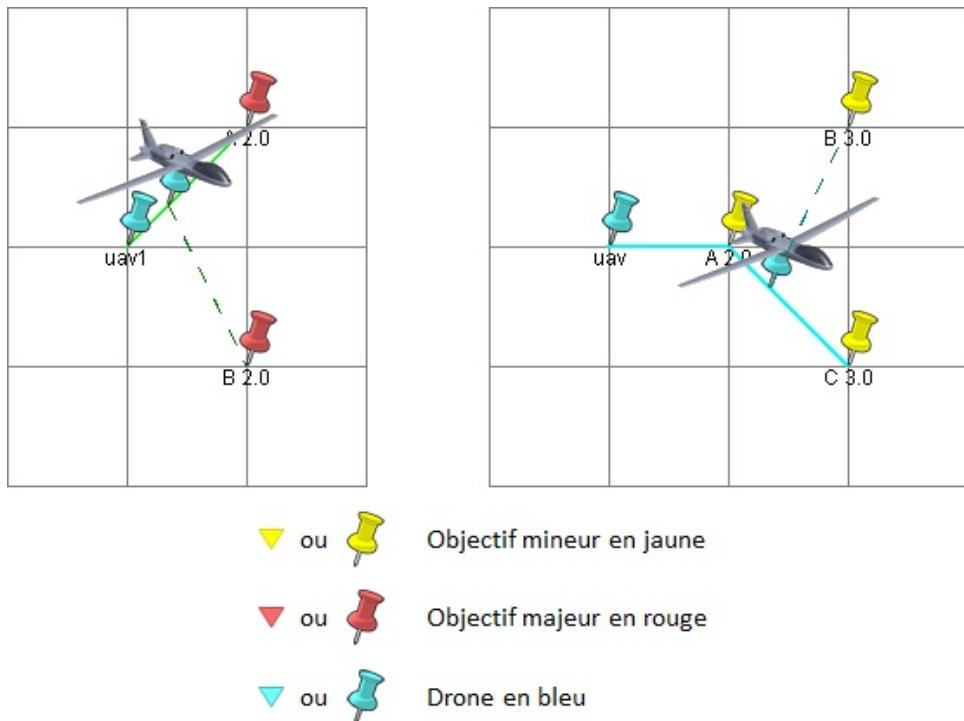


FIGURE 3.16 – Exemple de cartes que nous allons employer. En bleu un drone, en jaune un objectif mineur, en rouge un objectif majeur, en trait plein l’itinéraire de référence du drone, en pointillé une divergence possible.

peuvent émerger, il n'est pas pertinent de planifier d'agir au maximum de ses capacités. En effet, un objectif prévu pour être accompli tard a plus de chances d'être abandonné au profit d'un autre objectif apparu entre-temps (*i.e.* : après la planification et avant l'accomplissement). De même un objectif nécessitant beaucoup de ressources a plus de chance que ses ressources soient réaffectées au profit d'un autre objectif apparu entre-temps. Les systèmes automatisés doivent donc, pour décider de leur préférence, prendre en compte un mixte de l'importance (nuances comprises) des objectifs et de la facilité à les accomplir.

Nous allons maintenant illustrer notre problème, avant d'expliquer sa portée puis de détailler comment nous l'avons abordé. Nous préciserons comment nous maîtrisons la complexité et pourquoi cela résulte à faire de l'importance des objectifs une valeur dynamique. Nous conclurons avec une expérience pour améliorer les conditions de décision quand des objectifs majeurs sont en conflit.

### 3.2.1 Illustration du problème

Nous illustrerons notre propos avec des cartes telles que dans Fig.3.16. La légende est la suivante :

- Balise bleue : un drone avec au dessous son identifiant.
- Balise jaune : un objectif mineur avec au dessous son identifiant à gauche et le temps qu'il reste pour l'atteindre à droite.

- Balise rouge : un objectif majeur avec de même son identifiant à gauche et le temps qu'il reste pour l'atteindre à droite.
- En trait plein : l'itinéraire de référence du drone.
- En trait pointillé : une divergence possible par rapport à un itinéraire de référence.

Pour deux objectifs d'une même catégorie d'importance, les systèmes automatisés peuvent avoir un avis plus favorable pour l'un du fait des nuances d'importance et des modalités d'accomplissement. En cas d'égalité stricte les systèmes automatisés peuvent aussi décider au hasard. Ainsi, dans Fig.3.16, l'équidistance indique que l'objectif majeur A est vraisemblablement préféré à l'objectif majeur B (à gauche) et que l'objectif mineur C est vraisemblablement préféré à l'objectif mineur B (à droite).

Dans Fig.3.16, à gauche, il y a un choix à faire lors de la planification entre deux objectifs de même importance. Du fait des temps imposés pour atteindre ces objectifs, l'un ou l'autre peut être atteint, mais pas les deux. L'itinéraire de référence est d'aller vers A. Cet itinéraire a été choisi par les systèmes automatisés. L'itinéraire divergeant permettant de diverger au plus tard pour atteindre B est indiqué en pointillés. L'humain a jusqu'à ce que le drone atteigne le point de divergence pour indiquer qu'il préfère B à A et provoquer une divergence effective du drone.

Les systèmes automatisés peuvent avoir une légère préférence pour A. Il est aussi possible qu'ils n'aient pas de préférence – ni pour A ni pour B – et que A ait été choisi au hasard. C'est généralement le cas dans les situations générées à des fins d'illustration. Dans tous les cas, il n'y a pas de certitude que A soit vraiment plus important que B, et c'est l'humain qui peut confirmer ou infirmer cette hypothèse grâce à ses capacités spécifiques de discrimination. Il peut également changer d'avis.

Le problème se présente régulièrement avec des instances plus complexes telles que celle dans Fig.3.17. Les systèmes automatisés y ont fait en sorte que les objectifs majeurs g2, g4 et g7, soient atteints. Parmi les six objectifs mineurs, un parmi g1, g3, g5 et g9 ne peut être atteint. Il serait intéressant que l'humain puisse trancher. Mais même s'il ne le fait pas, la solution mise en œuvre sera de toute façon très satisfaisante puisque seul un objectif mineur ne sera pas atteint.

**Ce problème donne l'opportunité à l'humain d'améliorer une solution produite par les systèmes automatisés.** La contribution de l'humain est donc marginale, au sens mathématique du terme, mais elle est appréciable.

Même si le problème posé dans Fig. 3.17 n'est pas critique puisqu'il ne porte que sur des objectifs mineurs, il peut être quand même intéressant de solliciter l'humain à son propos, ne serait-ce que pour entretenir l'attention de l'humain. Cette mise à contribution de l'humain lui permet de rester actif et compétent (c.f. : [30]).

Par ailleurs, même s'il est plus fréquent de solliciter une contribution humaine pour arbitrer entre des objectifs mineurs parce que les systèmes automatisés s'efforcent en amont de garantir que tous les objectifs majeurs sont atteints, il n'est pas non plus rare que cette contribution humaine puisse porter sur des objectifs majeurs. Dans l'expérience que nous reportons en fin de cette section 21,2% des conflits portent sur des objectifs majeurs.

Solliciter l'humain ponctuellement pour amender les décisions des systèmes automatisés permet de tirer profit au mieux de ses capacités de discrimination. Cette approche a un ratio

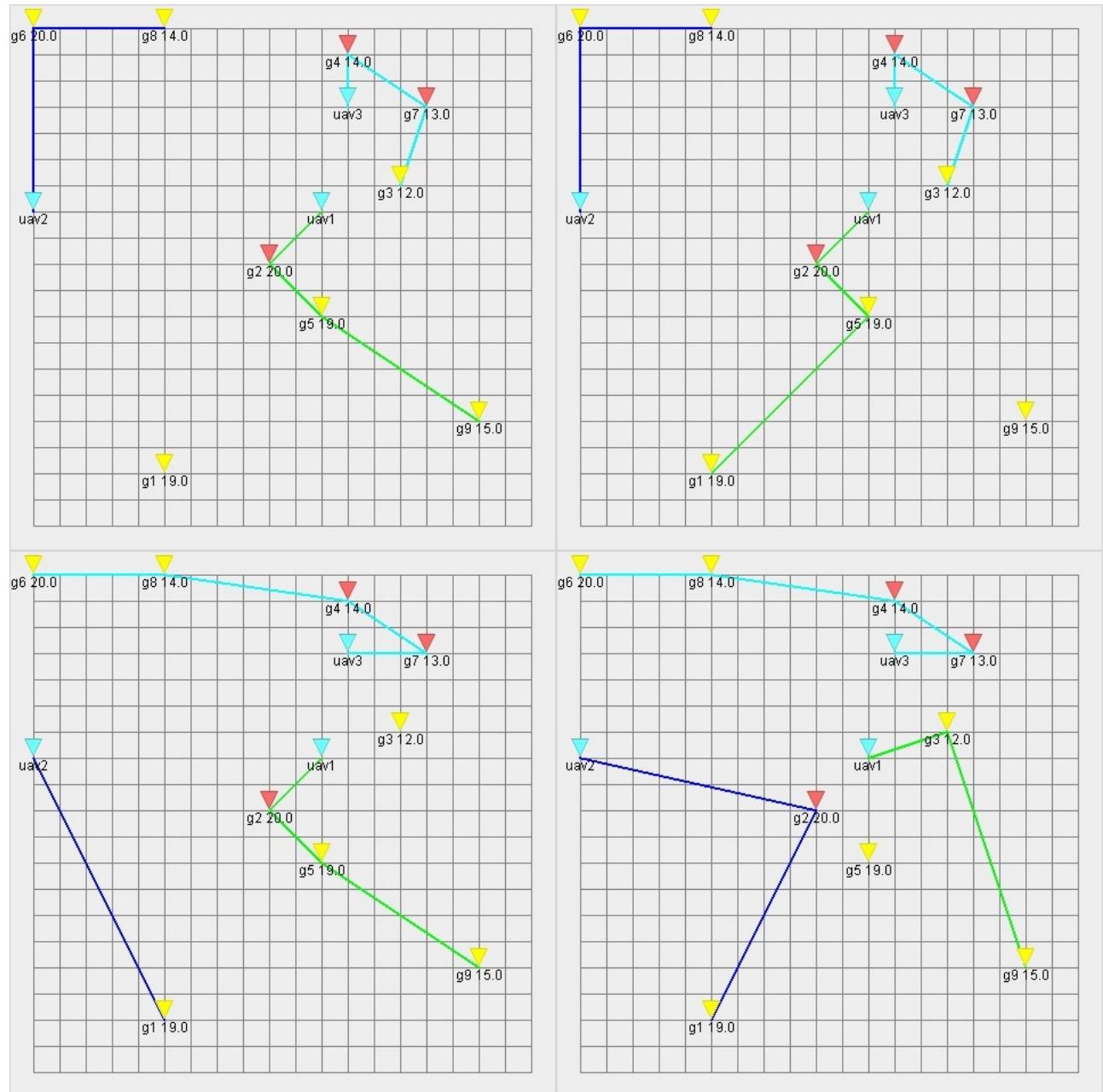


FIGURE 3.17 – Un problème de même nature que dans Fig.3.16, mais avec quatre alternatives.

*nombre de drones / nombre d'humains* élevé car l'humain n'y fait que ce qu'il fait mieux que les systèmes automatisés.

### 3.2.2 Positionnement du problème

#### Dans la perspective de la planification

Les exemples en Fig. 3.16 et en Fig. 3.17 ne sont pas réalistes, mais ils sont révélateurs de la complexité minimale de situations telles que la surveillance d'un espace maritime par une flottille de drones.

Il importe peu qu'il n'y ait ici que deux catégories d'importance, ce qui compte est qu'il existe du point de vue des systèmes automatisés à la fois :

- une certitude de quel objectif est plus important que l'autre pour deux objectifs dans des catégories d'importance distinctes.
- une incertitude de quel objectif est plus important que l'autre pour deux objectifs de la même catégorie d'importance. C.f. : [75, 16] pour l'intérêt de ne pas préjuger favorablement de ce que peuvent discriminer avec pertinence les systèmes automatisés grâce à l'élicitation des préférences humaines.

L'indécision peut aussi résulter d'un score multi-objectifs qui pour certaines combinaisons d'objectifs permet de dégager une certitude (pour des différences de score significatives) mais qui pour d'autres est indécise (pour des différences de score non significatives). L'idée est cependant de demander à l'humain de lever cette indécision, il faut donc prendre garde à ce que la complexité de la situation soit à sa portée. Si la situation est trop complexe, il est préférable de privilégier une approche computationnelle. L'exemple de Fig. 3.17 est à cet égard bien représentatif de la complexité – assez modeste – des alternatives que nous entendons proposer à l'humain.

Les trajectoires sont ici de simples lignes droites alors qu'une situation réaliste voudrait qu'on utilise un planificateur tel qu'Airplan (c.f. : [28]), capable de planifier la meilleure trajectoire d'un drone en prenant en compte les spécificités d'un environnement physique complexe (obstacles fixes et mobiles, vents variables, ...).

Les lignes droites ont cependant plusieurs avantages :

- Elles facilitent l'implémentation et réduisent les temps de calcul.
- Elles génèrent des situations plus intelligibles et se focalisent sur l'essentiel : le déplacement d'un agent dans un espace.
- Elles sont neutres quand on expérimente, contrairement aux approches complexes d'un planificateur comme Airplan dont le fonctionnement est susceptible d'avoir des conséquences difficiles à prévoir.

#### Dans la perspective LO4

Nous distinguons deux types d'interventions humaines selon qu'elles sont planifiées ou non. Par exemple, si un humain doit participer au décollage et à l'atterrissement, cela constitue des interventions planifiées. La disponibilité de l'humain peut dès lors être interprétée comme une

contrainte et être prise en compte lors de la planification. Les travaux de Cummings *et al.* (c.f. : [57]) s'intéressent à ces interventions humaines planifiées.

Mais en l'occurrence, les interventions humaines qui nous intéressent ne sont pas planifiées car elles contribuent elles-mêmes à la planification.

Nous allons nous focaliser sur les interventions consistant pour l'humain à arbitrairement décider qu'un objectif doit être favorisé par rapport à d'autres objectifs d'une même catégorie d'importance, et ce en contradiction avec la préférence initiale des systèmes automatisés.

Le niveau LOA4 correspondant est *autorité – 0.x* : l'intervention humaine n'est ni systématique (niveau 0) ni impossible (niveau 1), elle est seulement possible (niveau 0.x).

Comme toujours avec LOA4, un niveau 0.x est l'agrégation des niveaux de composants qui au plus bas niveau de décomposition sont nécessairement soit 0, soit 1. Ici le niveau 0.x résulte de l'association de :

- Proposition d'alternatives et mise en œuvre de l'une d'elles par les systèmes automatisés : *autorité – 1*.
- Possibilité pour l'humain d'ordonner la mise en œuvre d'une autre de ces alternatives : *autorité – 1*.

Même si l'humain a le dernier mot, il choisit parmi les alternatives que les systèmes automatisés ont choisies pour lui et il ne le fait qu'après que les systèmes automatisés aient déjà mis en œuvre (ou commencé de le faire) l'alternative de leur choix. Le niveau *autorité – 0.x* correspond donc bien ici à un partage de l'autorité.

L'autorité des systèmes automatisés est importante car c'est l'alternative de leur choix qui constitue l'alternative de référence et qu'ils implémentent dans un premier temps, avant de diverger le cas échéant vers l'alternative ayant la préférence de l'humain. C'est pour cette raison que, dans LOA4, nous avons choisi de parler d'"autorité" plutôt que de "décision" : c'est bien de la capacité à provoquer la mise en œuvre d'une décision dont il est question.

L'avantage d'une situation LOA4 *autorité – 0.x* est de concilier les avantages respectifs de l'humain et des systèmes automatisés. Les systèmes automatisés permettent dans un premier temps une réactivité rapide et de qualité. L'humain, grâce à ses capacités de discrimination, permet dans un second temps une réactivité moins rapide mais parfois de plus grande qualité.

Pour maîtriser les effets de l'autorité importante des systèmes automatisés, il faut mettre en place des garde-fous. Ces garde-fous permettent aux systèmes automatisés de devancer l'humain sans s'affranchir de son consentement explicite.

Par exemple, supposons que le survol au plus tôt d'une cible soit un objectif majeur mais qu'il ne puisse être effectivement mis en œuvre qu'avec l'accord d'un humain. Les systèmes automatisés peuvent ordonner immédiatement de s'approcher de la cible en interdisant le survol effectif de la cible. Un humain peut alors décider d'autoriser le survol effectif de la cible, ou au contraire de l'annuler.

Dans ce scénario, l'humain ne perd pas sa prérogative sur le survol effectif de la cible, mais les systèmes automatisés n'y sont pas indifférents non-plus car ils s'engagent à tout mettre en œuvre pour favoriser ce survol effectif. Il s'agit là d'une collaboration harmonieuse de l'humain et des systèmes automatisés.

### 3.2.3 Proposition d'un CNP spécifique

Sandholm [17] définit l'engagement (*commitment*) d'un agent comme étant ce qui lui impose de se maintenir en situation de se comporter conformément à une offre tant que celle-ci est susceptible d'être acceptée. L'idée est que si une proposition est faite, elle doit pouvoir être honorée.

Ce concept nous intéresse parce que nous souhaitons que les systèmes automatisés s'engagent vis-à-vis de l'humain, garantissant à celui-ci que les décisions qu'il prend ne sont pas prises en vain.

Dans la pratique, cela consiste à considérer la proposition d'accomplir un objectif comme une contrainte d'accomplir cet objectif.

L'engagement peut être borné dans le temps et limité dans ses modalités. L'humain n'a alors que jusqu'à une "date au plus tard" pour décider que l'objectif doit bien être accompli et les modalités pour accomplir cet objectif peuvent être de moins en moins avantageuses.

Il est aussi possible pour l'humain de renoncer explicitement à accepter une proposition, ce qui libère immédiatement les systèmes automatisés de l'engagement correspondant.

Dans des systèmes multi-agents, il arrive fréquemment que des dilemmes se pose pour gérer des appels d'offres concurrents : s'engager dans un premier appel d'offres limite la capacité à s'engager dans un deuxième appel d'offres, ce qui peut ne pas être pertinent si les chances que la proposition émise dans le cadre du premier appel d'offres soit acceptée sont minces.

Dans notre système, cependant, ce problème ne se présente pas car il n'y a que deux agents, un qui représente l'humain et un qui représente les systèmes automatisés. L'agent des systèmes automatisés peut par contre émettre plusieurs offres simultanément. Il s'agit des alternatives portant sur différents ensembles d'objectifs en conflit.

Les modalités de l'engagement sont assez simples à définir, il suffit d'évaluer jusqu'à quand chacune des alternatives peut-être acceptée sans compromettre la capacité des systèmes automatisés à l'honorer, sous l'hypothèse qu'aucun événement imprévu ne vienne compromettre cette capacité.

Le concept de l'engagement était latent dans la proposition de Smith en 1980 du Contract Net Protocol, un protocole d'appel d'offres (c.f. : [18]). Sandholm (c.f. : [17, 67]) a ensuite formalisé l'engagement et en a précisé certains aspects dans ses propres versions du CNP. Le CNP n'est jamais qu'un protocole pour gérer un contrat entre des agents collaborant dans d'un réseau, il est donc normal de l'adapter et de se l'approprier.

Nous proposons notre propre version du CNP (c.f. : Fig. 3.18) comme ossature pour la gestion de notre problème. Les offres correspondent ici aux différentes alternatives, par exemple celles de Fig. 3.17. Les systèmes automatisés déterminent celle qui a leur préférence, puis l'humain peut en choisir une autre plus à sa convenance.

Contrairement à la version originale de Smith, l'appel d'offres n'est pas initié par celui qui décide finalement de la meilleure alternative. Ici les offres sont générées spontanément quand les croyances sont actualisées et remettent en cause la consistance du choix de l'alternative actuellement mise en œuvre.

Conformément à la proposition de Sandholm, [17] nous utilisons des messages explicites aux perdants pour faire que l'engagement cesse aussi vite que possible.

Conformément à la proposition de Sandholm et Lesser, [67] nous précisons dans les offres jusqu'à quand elles sont valides (date de divergence au plus tard). Une alternative est en effet toujours de plus en plus difficile à implémenter, et ce jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible de l'implémenter ou que cela devienne absurde. Pour rendre compte de cette difficulté croissante, nous utilisons une fonction du coût d'une alternative engendré par le délai avant que cette alternative ne soit accepté. Sandholm utilise aussi une telle fonction (c.f. : [17]).

Précisons que l'alternative est définie par les objectifs qu'elle permet d'accomplir, et non par l'itinéraire permettant de les accomplir. De plus, l'identité du drone accomplissant l'objectif est ici indifférente. L'alternative n'est donc pas nécessairement un plan unique, elle peut aussi être une succession de plans, chacun moins avantageux que le précédent mais pouvant y être substitué si le plan précédent n'a pas été choisi assez vite.

Précisons aussi qu'une alternative n'a pas à être exhaustive quant à ses objectifs. Quand deux alternatives se distinguent par les objectifs majeurs qu'elles permettent d'accomplir, il est pertinent de focaliser l'attention de l'humain sur le choix des objectifs majeurs et ce au mépris des objectifs mineurs. Par exemple, considérons que les alternatives disponibles soient  $\{X, a, b\}$ ,  $\{X, b, c\}$ ,  $\{X, c, a\}$ ,  $\{Y, a, b\}$ ,  $\{Y, b, c\}$ ,  $\{Y, c, a\}$ ,  $\{Z, a\}$ ,  $\{Z, b\}$  et  $\{Z, c\}$  avec  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  des objectifs majeurs et  $a$ ,  $b$  et  $c$  des objectifs mineurs. Plutôt que de submerger l'humain avec neuf alternatives, ou au contraire de ne pas le solliciter, il est préférable de lui proposer les alternatives suivantes :  $\{X(+2 \text{ mineurs})\}$ ,  $\{Y(+2 \text{ mineurs})\}$  et  $\{Z(+1 \text{ mineur})\}$ .

Précisons enfin que le nombre d'objectifs dans un ensemble d'objectifs n'est pas suffisant pour présumer de l'importance relative de cet ensemble. Ainsi, dans l'exemple précédent,  $\{Z(+1 \text{ mineur})\}$  n'est pas disqualifié au motif qu'il permet d'accomplir un objectif mineur de moins. C'est d'autant plus justifié que dans un contexte dynamique, il est fréquent qu'une alternative ne soit pas menée à son terme et que des objectifs mineurs soient finalement sacrifiés au bénéfice d'objectifs majeurs. Il peut même être intéressant de sacrifier des objectifs mineurs simplement pour donner plus de temps à l'humain pour décider des objectifs majeurs à accomplir quand tous ne peuvent pas l'être. Nous étudierons expérimentalement cette possibilité avant de conclure. Il en va de même avec deux ensembles d'objectifs contenant différents objectifs majeurs, en nombres différents mais sans qu'un ensemble subsume l'autre. Ainsi, avec  $A$ ,  $B$  et  $C$  des objectifs majeurs,  $\{A, B\}$  est a priori plus avantageux que  $\{C\}$ , mais  $\{C\}$  ne peut être totalement exclu d'emblée et silencieusement car il s'agit quand même d'un objectif majeur.

Générer ces alternatives demande un gros travail en amont de l'appel d'offres. Ce travail sera détaillé dans la partie consacrée à l'implémentation.

Présenter ces alternatives peut être fait dans un treillis (les propositions dominées sont ignorées). C'est cette information qui contient le message *unbounded proposals*.

L'humain peut préciser un coût maximal  $C^{max}$  (ou un score minimal). Il peut aussi spécifier une date  $\delta^{min}$  avant laquelle il ne compte pas être en mesure de donner un avis, et une date  $\delta^{max}$  au-delà de laquelle il aura certainement donné son avis. Ces trois limites –  $C^{max}$ ,  $\delta^{min}$  et  $\delta^{max}$  – sont envoyés dans le message *bounds*.

En fonction de ces trois limites, les systèmes automatisés calculent pour chaque alternative son coût  $C(\delta)$  en fonction de l'instant  $\delta$  auquel l'humain ordonne qu'elle soit mise en œuvre. Cette information est l'objet du message *bounded proposals*.

L'humain peut alors accepter une proposition et en informer les systèmes automatisés dans

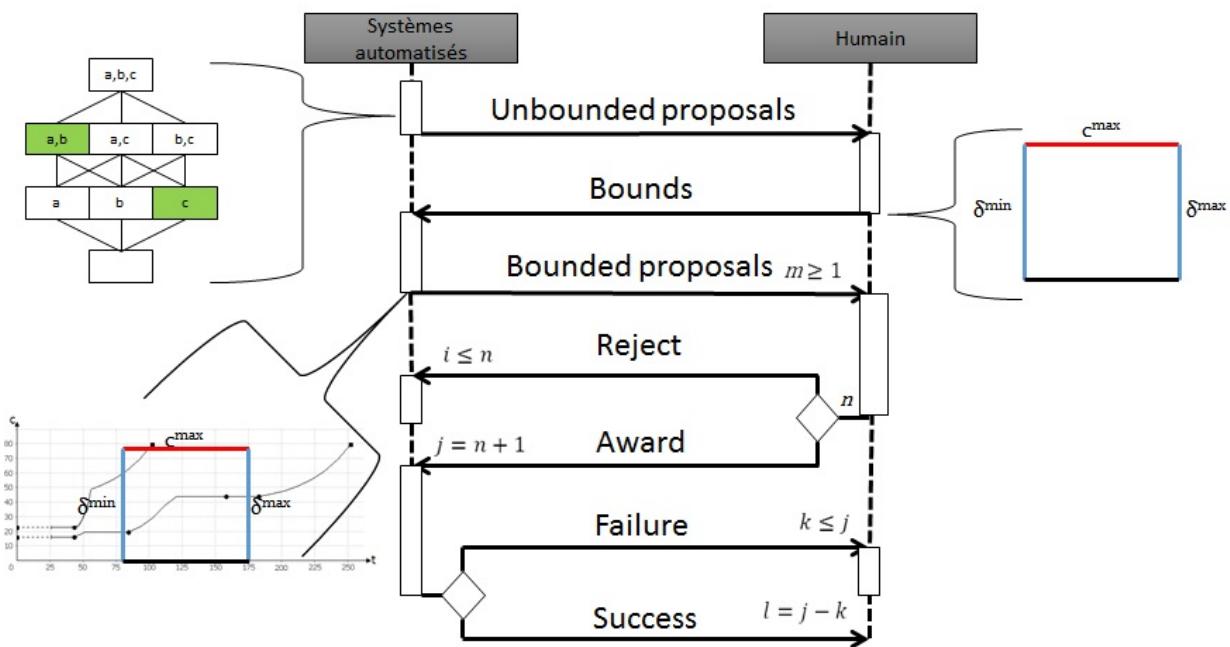


FIGURE 3.18 – Notre version du CNP (c.f. : Fig. 2.19 pour comparer avec la version FIPA).

le message *award*. Toutes les autres propositions sont alors automatiquement considérées comme rejetées.

L'humain peut aussi rejeter d'emblée certaines propositions avec le message *reject* afin de libérer les systèmes automatiques des engagements associés aux propositions de ces alternatives.

Les systèmes automatiques informent alors régulièrement l'humain des suites données à ce que l'humain a ordonné. Si l'engagement cesse de pouvoir être respecté, les systèmes automatiques en informent l'humain grâce au message *failure*. Si au contraire l'engagement a été totalement respecté (i.e. : si tous les objectifs de l'alternative ont été accomplis), les systèmes automatiques en informent l'humain grâce au message *success*.

### 3.2.4 Maitrise de la consistance

Les choix de l'humain sont mémorisés et sont pris en compte d'un appel d'offres à l'autre.

Comme le contexte est dynamique et que les drones en vol doivent bien continuer à voler vers quelque part quoiqu'il arrive, les systèmes automatisés décident d'emblée d'une alternative qui a leur préférence et la mettent en œuvre. Mais les préférences que l'humain explicite supplantent définitivement les préférences initiales des systèmes automatisés, si bien que les choix les plus récents des systèmes automatisés reflètent les choix précédents des humains. Cela permet une continuité dans les itinéraires et évite des comportement erratiques tels que ceux décrits par Legras *et al.* c.f. : [32]).

Cela permet aussi de réduire le nombre d'alternatives proposées. Le plus souvent il n'y en a que deux : l'alternative actuellement mise en œuvre, et une nouvelle alternative résultant de l'apparition d'un nouvel objectif, ou d'une modification de croyance. Il n'est cependant pas rare

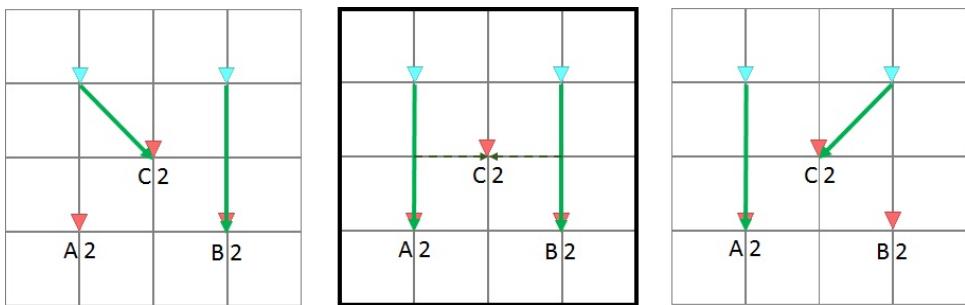


FIGURE 3.19 – L'apparition de  $C$  génère deux alternatives concurrentes (à droite et à gauche) à l'alternative mise en œuvre et reconduite par défaut (au centre et cerclée de noir).

qu'un unique nouvel objectif génère deux nouvelles alternatives ou plus, comme dans Fig. 3.19.

Dans Fig. 3.20, l'humain a indiqué à  $t = 1, 1$  préférer  $B$  à  $A$  alors que les systèmes automatisés avaient préféré  $A$  à  $B$  à  $t = 0$ . Donc à l'apparition d'un nouvel objectif  $C$  à  $t = 1, 7$ , les systèmes automatisés proposent de choisir entre  $B$  et  $C$  sachant que  $A$  est déjà dominé par  $B$ .

Cela implique qu'il est très utile pour l'humain de manifester son accord avec les systèmes automatisés s'il en a l'occasion. D'abord parce que, comme nous l'avons vu, cela libère les systèmes automatisés de l'engagement les contraignant à maintenir disponible (et donc faisable) les autres alternatives jusqu'à ce que les paliers  $t^{max}$  ou  $c^{max}$  soient atteints. Mais aussi parce que lors d'un choix ultérieur, cette préférence aura déjà été explicitée et sera prise en compte, comme dans Fig. 3.20, et contribuera à réduire la complexité.

De la même façon, les objectifs mineurs acceptés à un moment et intégrés à l'itinéraire y sont maintenus sauf si leur sacrifice est nécessaire pour permettre l'accomplissement d'un nouvel objectif majeur.

La contribution humaine a donc un aspect incrémentale. Au fur et à mesure de la mission, la plupart des objectifs qui apparaissent se voient associés par l'humain de nouvelles croyances quant à leurs importances relatives. C'est une élicitation en temps réel qui vient palier les limites de l'élicitation *a priori* (c.f. : [47]). **Cette élicitation en temps réel vient combler les incertitudes laissées à dessin (c.f. : rachmawati2010incorporating)** pour permettre à l'humain de juger en contexte.

### 3.2.5 Maitrise de la complexité

Comme lors d'une mission de drones tous les objectifs ne sont pas équivalents – et qu'il faut augmenter le ratio *nombre de drones / nombre d'humains* –, nous avons choisi de nous focaliser sur les conflits entre les objectifs les plus importants. Mais il se peut encore que ces conflits entre les objectifs les plus importants soient trop peu nombreux ou au contraire trop nombreux par rapport à la charge de travail optimale de humains. Les critères d'éligibilité d'un objectif à la catégorie des objectifs les plus importants doivent donc être calibrés directement sur la capacité des humains à traiter les conflits entre ces objectifs. L'importance devient dès-lors un concept dynamique et plus en adéquation avec la perception de l'opérateur/superviseur.

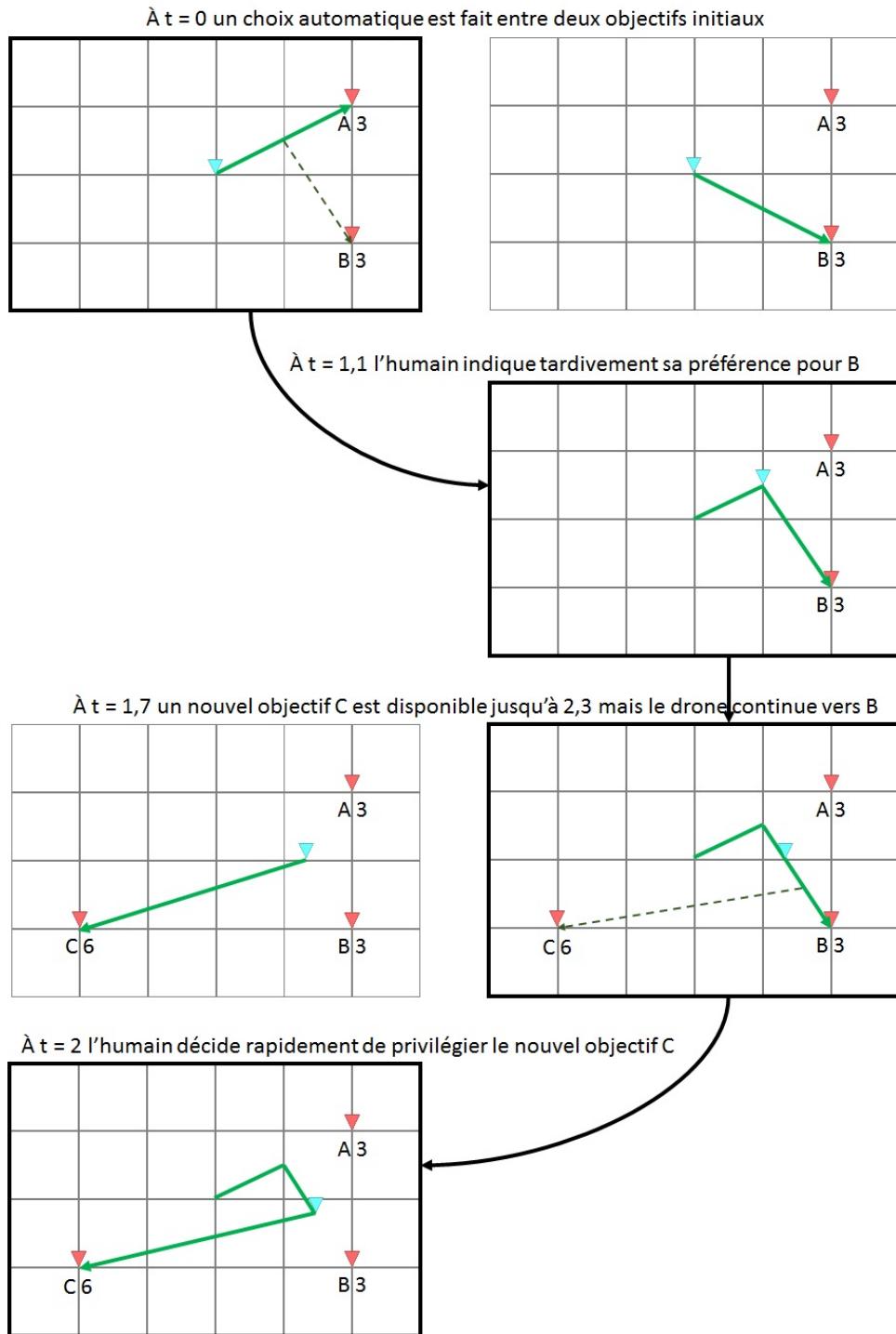


FIGURE 3.20 – La préférence de l'humain pour *B* plutôt que *A* n'est pas remis en cause à l'apparition de *C*.

### In a nutshell

Nous avons évoqué la compression, avec perte d'information, de certaines alternatives comme  $\{X(+2 \text{ mineurs})\}$ . Plutôt que de submerger l'humain avec trop d'alternatives, ou au contraire de ne pas le solliciter, il est préférable de compresser certaines alternatives et certains ensembles d'alternatives.

Pour ce faire, nous clusterrisons des alternatives (*i.e.* : nous regroupons ensemble celles qui se ressemblent). Nous utilisons pour cela une distance entre les alternatives calculées avec les règles suivantes :

- Si les objectifs majeurs divergent, les objectifs mineurs ne sont pas pris en compte (*i.e.* : ne comptent que les divergences de première importance).
- L'ordre n'a pas d'importance (*i.e.* : les alternatives sont considérées comme des ensembles (non ordonnés) et non comme des listes (ordonnées)). Note : si l'ordre n'a pas d'importance pour la clustérisation elle-même, il en va autrement pour le choix des alternatives sujettes à la clustérisation.
- Une substitution d'objectifs coûte 3.
- Ajouter ou supprimer un objectif coûte 2.

Considérons maintenant un exemple. Soit  $A, B, C, D, E$  et  $F$  des objectifs majeurs et un front de Pareto des alternatives :  $\{A\}$ ,  $\{B\}$ ,  $\{C, D\}$  et  $\{E, F\}$ . Afin de clustérer ces alternatives, nous mesurons les distances qui les séparent.

- $\{A\}$  et  $\{B\}$  sont distantes de 3.
- $\{A\}$  et  $\{C, D\}$  sont distantes de 5.
- $\{A\}$  et  $\{E, F\}$  sont distantes de 5.
- De même  $\{B\}$  et  $\{C, D\}$  d'une part et  $\{B\}$  et  $\{E, F\}$  d'autre part sont distants de 5.
- $\{C, D\}$  et  $\{E, F\}$  sont distantes de 6.

Si l'on choisit de faire trois clusters (l'utilisateur peut régler ce paramètre),  $\{A\}$  et  $\{B\}$  sont les plus proches et sont fusionnés en une alternative unique  $\{(+1 \text{ majeur})\}$ . L'utilisateur se trouve en présence des alternatives suivantes :

1.  $\{C, D\}$
2.  $\{E, F\}$
3.  $\{(+1 \text{ majeur})\}$

Si l'humain est intéressé par la troisième alternative, il peut demander un supplément d'information et apprendre que  $\{(+1 \text{ majeur})\}$  correspond ici à  $\{A\}$  ou  $\{B\}$ .

Si l'on choisit de faire deux clusters, un résultat possible, avec  $\{(+1 \text{ majeur})\}$  pour  $\{A\}$  ou  $\{B\}$ , est :

1.  $\{C, D\}$  (ou  $\{(+1 \text{ majeur})\}$ )
2.  $\{E, F\}$

Toujours avec deux clusters, un autre résultat possible est :

1.  $\{C, D\}$  (ou  $\{A\}$ )
2.  $\{E, F\}$  (ou  $\{B\}$ )

L'avantage de cette approche est que le nombre de clusters n'influence pas drastiquement la quantité d'information disponible.

Un inconvénient de cette approche est que si elle hiérarchise l'information, elle ne la synthétise peut-être pas assez.

Un autre inconvénient de cette approche est son aspect aléatoire. Dans l'exemple ci-dessus avec deux clusters, quatre résultats sont possibles et on peut supposer que l'un correspond à un affichage plus pertinent. Laisser au hasard la décision duquel privilégier est un peu léger. En même temps l'information essentielle est que le choix est a priori entre  $\{C, D\}$  et  $\{E, F\}$  et que les alternatives  $\{A\}$  et  $\{B\}$  sont peu probablement les plus avantageuses. Les alternatives  $\{A\}$  et  $\{B\}$  doivent cependant bien être mentionnées car il n'est pas judicieux de passer totalement sous silence le renoncement à des objectifs majeurs.

En somme nous pensons que cette approche basée sur la clustérisation est bien équilibrée.

Ne considérer que les divergences les plus importantes permet de réduire significativement le nombre d'alternatives. Par exemple si dans l'exemple précédent il y avait en plus des objectifs mineurs, un affichage pourrait être :

1.  $\{C, D\}$  (ou  $\{(+1 \text{ majeur})\}$ ) (+0, 2, 4 ou 5 mineurs)
2.  $\{E, F\}$  (+1 ou 3 mineurs)

Un tel affichage donne très peu d'informations sur les objectifs mineurs, il indique surtout qu'au besoin plus d'information est disponible.

Ne prendre en compte que les divergences majeures, c'est réduire la complexité (le nombre de dimensions) du front de Pareto. Plus généralement, si la clustérisation ne donne pas satisfaction, c'est que le front de Pareto contient trop d'alternatives. Cela peut avoir deux causes et deux types de critères de choix y correspondent :

- Trop de critères de choix portant sur l'intérêt des alternatives laissent indécis. Il faut donc hiérarchiser ces critères pour y renoncer au besoin afin de toujours avoir un nombre d'alternatives raisonnable.
- Trop de critères de choix portant sur l'importance des objectifs laissent indécis. Il faut donc hiérarchiser les critères décident de l'importance d'un objectif pour que d'emblée il y ait moins d'objectifs majeurs en conflit.

Dans la perspective LOA4, dans sa dimension consacrée à l'adaptation, cela pose la question intéressante de savoir qui de l'humain ou des systèmes automatisés peut décider de modifier les seuils d'éligibilité. L'humain peut ne pas souhaiter voir les systèmes automatisés avoir la possibilité de changer la façon d'apprécier l'importance d'un objectif ou l'intérêt d'une alternative. Mais laisser le système s'engorger n'est pas non plus nécessairement une bonne chose, surtout si l'humain est débordé par la tâche et qu'il n'a pas le recul suffisant pour décider qu'il doit modifier des paramètres de fonctionnement.

Quoiqu'il en soit, si un excès de critères génère de l'indécision, il faut réduire le nombre de ces critères. Et pour le faire intelligemment, il faut auparavant les avoir hiérarchisés.

Nous avons présenté cette approche à ICTAI en 2012 dans un article intitulé "Aerial : a framework to support human decision making in a constrained environment". [15]

## En détail

La résolution d'un problème d'optimisation de plusieurs objectifs peut se formuler comme suit : [85] trouver des valeurs pour les variables  $\mathbf{X}^* = [x_1, x_2, \dots, x_N]$  telles qu'elles vérifient

$p$  contraintes d'inégalités  $g_i(\mathbf{X}^*) \geq 0, i = 1, 2, \dots, p$  et  $q$  contraintes d'égalités  $h_i(\mathbf{X}^*) = 0, i = 1, 2, \dots, q$  et qui minimisent  $M$  fonctions objectifs en conflit :  $\mathbf{F} = [f_1(\mathbf{X}^*), f_2(\mathbf{X}^*), \dots, f_M(\mathbf{X}^*)]$  où  $f_m : R^N \rightarrow R$ .

Le conflit entre les fonctions objectives implique qu'en l'absence de préférences élicitées, elles sont susceptibles de ne pouvoir être toutes simultanément optimisées. L'égalité, l'incomparabilité et l'incommensurabilité produisent très fréquemment de tels conflits. Les solutions en conflit constituent un front de Pareto. Ces solutions ont pour caractéristique de ne pas être ordonnées entre elles par une relation binaire irréflexive, transitive et asymétrique de dominance de Pareto telle que pour deux solutions candidates  $X_i \succ_{\mathbf{F}} X_j \Leftrightarrow \forall m \in [1, M], f_m(X_i) \leq f_m(X_j) \wedge \exists m \in [1, M], f_m(X_i) < f_m(X_j)$ .

Un front de Pareto correspond à une indécision à une certaine étape d'un processus décisionnel. Réduire un front de Pareto permet de converger vers une solution finale. Cette réduction peut être faite en fonctions de préférences élicitées complémentaires, ou à l'aide d'heuristiques, ou sous la direction d'un humain, ou même aléatoirement. Ces approches pour réduire un front de Pareto peuvent aussi se combiner et s'enchaîner.

Une façon de converger vers le choix final d'une alternative unique est présentée dans Fig. 3.21. Deux fronts de Pareto y sont mentionnés comme étant *stratégiques* car dans la perspective d'augmenter le ratio *nombre de drones / nombre d'humains*, nous choisissons de ne solliciter l'humain que pour des décisions stratégiques. En réduisant le front de Pareto, l'humain *raffine* une décision autrement *brute*, y correspondent respectivement deux fronts de Pareto, l'un *raffiné* et l'autre *brut*.

D'autres successions de sélections sont envisageables, comme d'utiliser des heuristiques après que l'humain ait choisi mais avant de trancher au hasard. De plus, dans la pratique, il peut être intéressant pour maîtriser l'explosion combinatoire d'alterner l'usage d'heuristiques et de préférences élicitées. La succession de sélections dans Fig.3.21 est donc indicative.

Plus exhaustivement, nous considérons deux opérations de bases : ajouter des alternatives candidates et exclure des alternatives candidates. Dans une perspective ETL (e.g. : Microsoft SSIS), sur la base d'informations en entrée, nous faisons circuler à travers des "opérateurs" (tels que peut l'être une requête SQL) de l'information. En début de trajet cette information prend parfois la forme d'un fragment d'alternative. En fin de trajet cette information prend la forme d'alternatives candidates complètes. Parmi ces alternatives candidates, une seule arrive finalement en sortie.

Même si la succession de sélections dans Fig.3.21 n'est qu'indicative, elle présente les avantages suivants :

- Le hasard n'intervient qu'en dernier recours (lors des heuristiques après que les préférences élicitées aient été employées puis finalement dans le choix final s'y a encore plusieurs alternatives candidates).
- Au contraire, les préférences élicitées interviennent en premier, permettant une première sélection sans compromettre d'emblée la complétude.
- Les heuristiques servent à réguler au besoin la quantité d'information soumise à l'humain sur la base de l'information complète résultant des préférence élicitées.

Notons que par "réguler" cette quantité d'information, nous n'entendons pas que le but est de la minimiser. Si l'objectif est bien de maximiser le ratio *nombre de drones / nombre d'humains*,

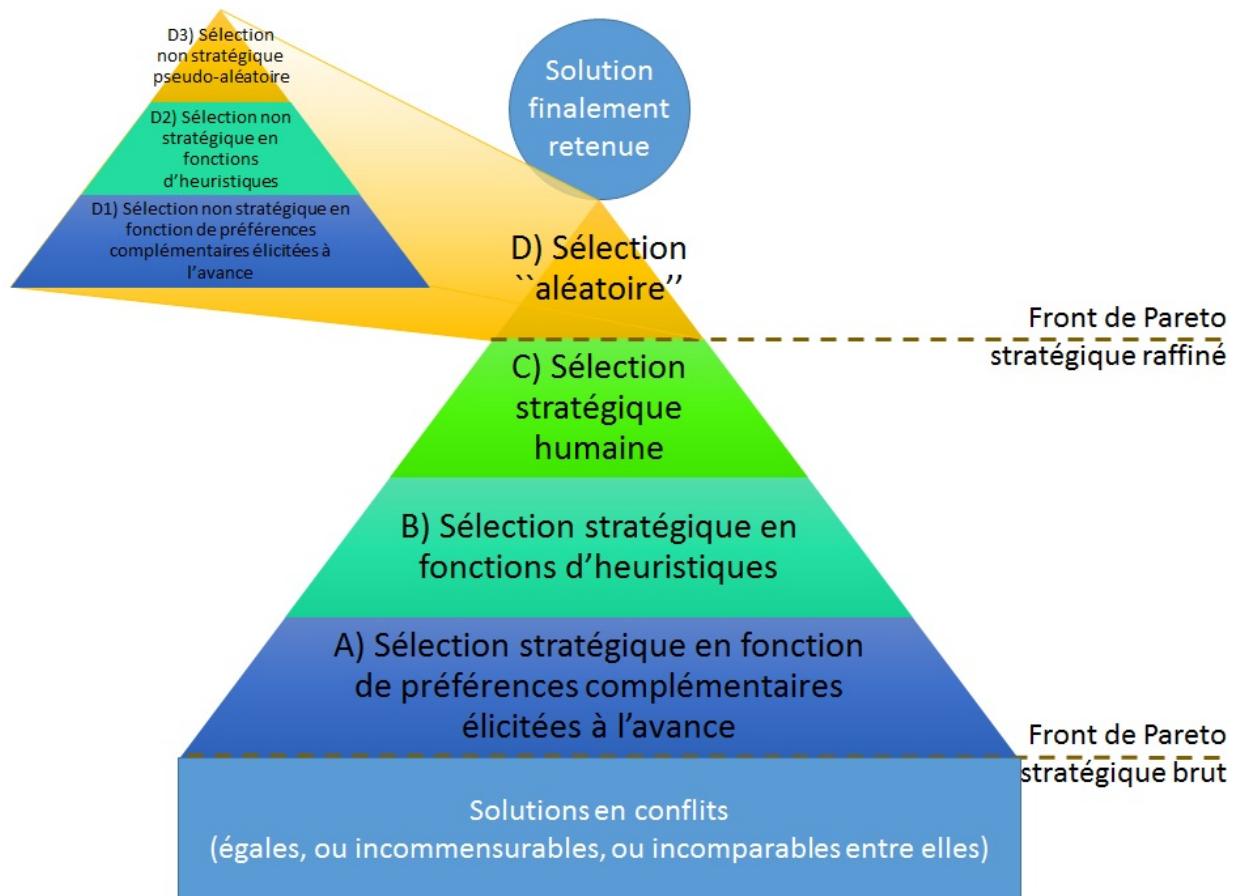


FIGURE 3.21 – Convergence vers le choix d'une alternative unique.

l'humain devient, une fois en poste, une ressource qu'il ne faudrait pas sous exploiter, tant pour bénéficier de ce qu'il peut apporter que pour limiter les risques de voir ses compétences et son attention décroître. [30]

Un exemple d'heuristique est de favoriser le nombre d'objectifs mineurs à nombre d'objectifs majeurs égal. La différence avec une préférence élicitée est que l'on est pas sûr ici que les objectifs mineurs en plus grand nombre aient bien une plus grande utilité que les objectifs mineurs en plus petit nombre. Par ailleurs, dans un contexte dynamique, il n'est même pas certains qu'aucun imprévu ne vienne empêcher l'accomplissement des objectifs mineurs les plus tardifs. Une préférence élicitée dégage une certitude, ce que ne fait pas une heuristique.

Dans la perspective de présenter à l'humain un nombre de solutions candidates adapté, nous devons modifier la relation de dominance de Pareto elle-même définie en fonction de  $\mathbf{F}$ . Pour cela nous allons réduire  $\mathbf{F}$  pour obtenir  $\mathbf{F}'$  de  $N$  fonctions  $f(\mathbf{X}^*)$  avec  $N < M$ . La nouvelle relation de dominance de Pareto est alors  $X_i \succ_{\mathbf{F}'} X_j \Leftrightarrow \forall n \in [1, N], f_n(X_i) \leq f_n(X_j) \wedge \exists n \in [1, N], f_n(X_i) < f_n(X_j)$ .

Nous obtenons ainsi mécaniquement plus de solutions candidates telles que  $X_i \succ_{\mathbf{F}'} X_j$  que de solutions candidates  $X_i \succ_{\mathbf{F}} X_j$ , ce qui implique un front de Pareto correspondant plus réduit.

Une conséquence importante est que si l'humain est systématiquement confronté à trop de choix entre des objectifs majeurs, il est judicieux de réduire le nombre d'objectifs considérés comme majeurs. Dans une telle situation, il faut des critères plus exigeants pour qualifier un objectif comme majeur.

Cela peut ressembler à une solution de facilité, surtout en simulation quand il suffit de déplacer un curseur pour modifier la probabilité qu'un objectif soit majeur ou la probabilité qu'un objectif quel qu'il soit apparaisse. Mais l'importance d'un objectif est bien relative à la situation. Si à un moment la plupart des objectifs affichés sur la carte apparaissent en rouge, l'humain ne perçoit plus quels sont les plus importants. La chose à faire est bien alors de redéfinir ce qui est majeur et ce qui ne l'est pas pour que de nouveau il y ait raisonnablement peu d'objectifs majeurs.

Par exemple, soit un premier critère  $tre_{rouge}(X)$  disant qu'être rouge contribue à être majeur et un second critère  $tre_{gros}(X)$  disant qu'être gros contribue à être majeur. Soit trois cibles,  $A$  grosse et rouge,  $B$  rouge et  $C$  grosse. Soit  $\mathbf{F} = \{tre_{rouge}(X), tre_{gros}(X)\}$ . Soit enfin le désir de l'humain de voir affichées exactement deux cibles majeures.  $A$  est dominante. En l'absence de  $A$ , les cibles  $B$  et  $C$  sont Pareto dominants, ce qui ferait trois cibles majeures au total. Pour n'obtenir que les deux cibles désirées par l'humain, on réduit alors  $\mathbf{F}$  à  $\mathbf{F}' = \{tre_{rouge}(X)\}$ . Il est maintenant possible de sélectionner  $B$  qui domine  $C$ , la sélection initiale de  $A$  n'est pas remise en cause et  $A$  demeure préférée à  $B$ . Pour savoir comment réduire  $\mathbf{F}$ , il suffit d'avoir ordonné ses critères, en l'occurrence, d'avoir décidé que pour être majeur, être rouge est plus important qu'être gros.

Il est intéressant de constater qu'il faut encore éliciter pour ordonner des critères d'importance et que pour ce faire, l'algorithme de Rachmawati et Srinivasan *rachmawati2010incorporating* peut de nouveau être utilisé.

À ICTAI (c.f. : [15]) nous avons développé un exemple basé sur les options de fonctionnement présentées dans le tableau 3.10. L'option 1 spécifie qu'une tâche doit être accomplie le plus tôt possible, et les sous-options associées autorisent même pour cela à sacrifier des objectifs mineurs (choix coché par défaut), voir des objectifs mineurs (choix non coché par défaut). Il

TABLE 3.10 – Options associated with a task

<input type="checkbox"/> This task has to be done as soon as possible (option 1). Because of this option, this task has a top priority and cannot be canceled without explicit consent through the award of a bid. Without this option, no task can have a top priority.
<input type="checkbox"/> Can cancel any task with high priority ? The default value is no.
<input checked="" type="checkbox"/> Can cancel any task with low priority ? The default value is yes.
<input type="checkbox"/> This task has to last as much as possible (option 2). Due to diminishing marginal utility, we assume that no marginal utility can be worth cancelling a task with high or top priority.
<input checked="" type="checkbox"/> Can cancel any task with a lower priority ? The default value is yes.
<input type="checkbox"/> This task is better not performed by [some UAVs] (option 3).
<input checked="" type="checkbox"/> Can cancel any task with a lower priority ? The default value is yes.

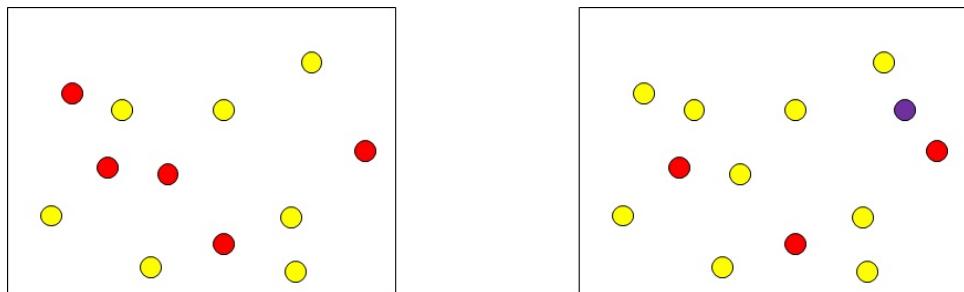


FIGURE 3.22 – L'introduction d'une tâche “top priority” en violet justifie de modifier les critères décident que des objectifs sont majeurs afin de conserver à la situation une intelligibilité adéquate.

est précisé que l'usage de cette option fait de la tâche concernée une tâche “top priority”, ce qui correspond à l'introduction d'un niveau d'importance supérieur au niveau d'importance des objectifs majeurs (“high priority”). Cela signifie que pour que cette tâche soit bien visible, il faut idéalement que le nombre d'objectifs majeurs soit réduit, et ce d'au moins un (comme illustré par Fig. 3.22). Pour réduire le nombre d'objectifs majeurs, il faut requalifier certains objectifs majeurs en objectifs mineurs. Cette opération est cependant critique car les objectifs mineurs tendent à être sacrifiés, aussi l'humain peut souhaiter que cela ne soit fait qu'avec son accord. C'est le niveau d'adaptation de LOA4 qui transcrit s'il en est ainsi ou non. Quoiqu'il en soit, s'il y a requalification, certains critères seront abandonnés, comme le fait d'être gros dans l'exemple précédent.

Rappelons cependant que tous les objectifs d'importance mineure ne sont pas a priori égaux entre eux, mais simplement que la dominance des uns sur les autres n'est pas certaines. Aussi un objectif majeur requalifié en objectif mineur conservera du point de vue des systèmes automatisés une importance supérieure à celle d'un objectif qui a toujours été mineur. Cette différence d'importance pourra justifier de choisir l'un plutôt que l'autre (comme C plutôt que B à droite dans Fig. 3.16).

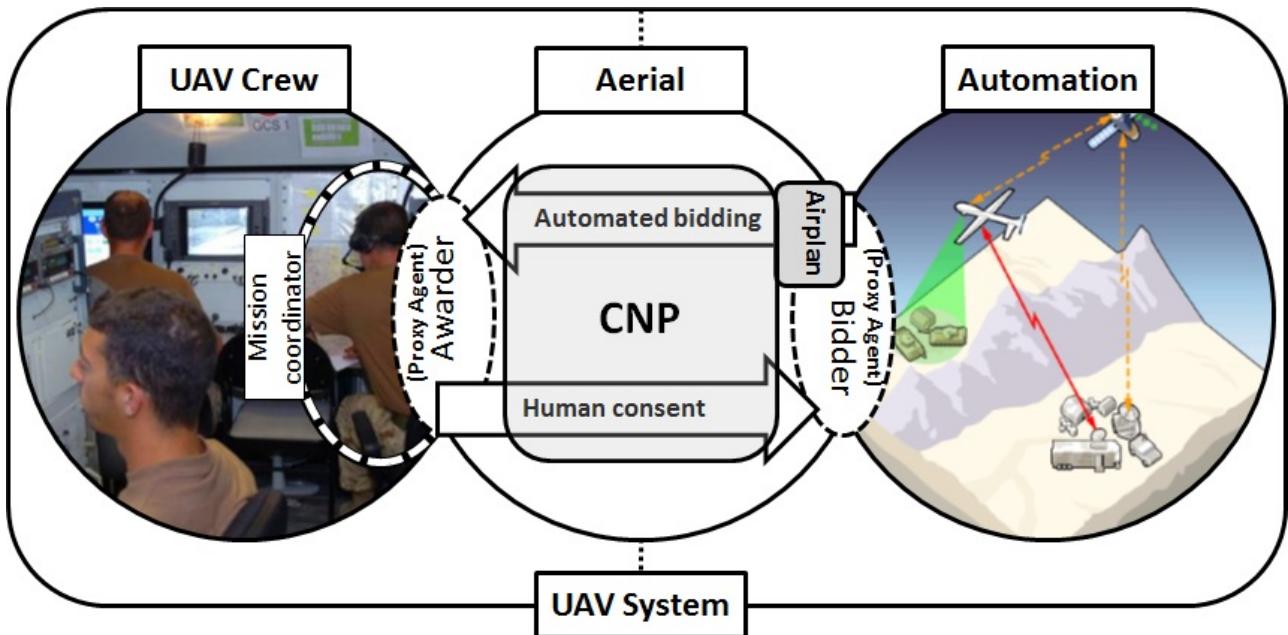


FIGURE 3.23 – Aerial place un CNP au cœur d'un système de missions perçu comme un système multi-agents.

```
public interface Ite<E> {
    E getCurrent();
    boolean moveNext();
}
```

FIGURE 3.24 – L'interface choisie pour itérer.

### 3.2.6 Implémentation

L'architecture que nous avons implémentée, et telle que nous l'avons présentée à MAST (*c.f. : [10]*) est illustrée par Fig. 3.23. On peut y voir au centre le CNP qui sert de courroie de transition entre l'humain et les systèmes automatisés. Le prototype est nommé Aerial, il succède dans cette nouvelle version à un prototype présenté dès 2008. [86, 87]

#### Itérer à travers les possibles

L'implémentation fait un usage massif des itérateurs. La syntaxe retenue pour les itérateurs est celle de Microsoft bien que l'implémentation soit en java. Les deux méthodes à disposition sont *moveNext()* et *getCurrent()* (Fig. 3.24) alors que les méthodes de *java.util.Iterator* sont *hasNext()* et *next()*.

Les itérateurs permettent d'isoler des algorithmes parfois complexes pour générer massivement des arrays d'entiers ou de booléens qui correspondent à des choix dans l'exploration des possibles. Ils sont bénéfiques pour la lisibilité du code, pour le débugage, pour la maintenance et pour les performances.

Nous employons les itérateurs de base suivants :

- *Permlte implements Ite<int[]>* permet de retourner toutes les permutations de  $n$  éléments. Par exemple,  $[0, 1, 2]$  indique que les trois éléments respectivement identifiés par ces trois identifiants sont présentement classés dans l'ordre de leur identifiant. *Permlte* n'a pas à itérer dans l'ordre lexicographique.
- *PermLexicolt implements Ite<int[]>* fait la même chose que *Permlte*, mais il itère dans l'ordre lexicographique. Par exemple, *PermLexicolt(3)* renvoie  $[0, 1, 2]$ ,  $[0, 2, 1]$ ,  $[1, 0, 2]$ ,  $[1, 2, 0]$ ,  $[2, 0, 1]$  et finalement  $[2, 1, 0]$ . *PermLexicolt* permet également de considérer comme indifférentes les permutations des  $m$  premiers éléments. Par exemple, *PermLexicolt(3, 2)* renvoie successivement  $[0, 1, 2]$ ,  $[0, 2, 1]$  et  $[1, 2, 0]$ . Comme il est précisé que les permutations des deux premiers éléments sont indifférentes,  $[1, 0, 2]$  est ignorée car redondante avec  $[0, 1, 2]$ ,  $[2, 0, 1]$  est ignorée car redondante avec  $[0, 2, 1]$  et finalement  $[2, 1, 0]$  est ignorée car redondante avec  $[1, 2, 0]$ . Cette possibilité est intéressante par exemple dans le cas suivant : supposons que l'on veut affecter  $n$  points de passage à  $k$  drones et choisir en plus l'ordre dans lequel les drones doivent survoler ces points de passages. Soit 12 points de passage, 3 drones et 3 points de passages par drone, 3 points de passages étant abandonnés. *PermLexicolt(12, 3)* permet de tester tous les parcours possibles sans permuter entre eux les objectifs assignés à un "premier" drone héritant des objectifs non pris en charge par les 3 drones réels.
- *Alloclt implements Ite<int[]>* permet de considérer toutes les allocations possibles de  $n$  objets à  $m$  destinataires dans l'ordre lexicographique. L'inconvénient de l'ordre lexicographique est qu'il commence par attribuer tous les objets au premier destinataire.
- *FairAlloclt implements Ite<int[]>* fonctionne sur la base de *Alloclt* mais en décalant les identifiants. Par exemple, pour *FairAlloclt(6, 3)*, au lieu de  $[0, 0, 0, 0, 0, 0]$ , la première itération est  $[0, 1, 2, 0, 1, 2]$ . *FairAlloclt* permet donc d'accéder plus rapidement à des répartitions plus homogènes.
- *Masklt implements Ite<boolean[]>* permet d'itérer à travers tous les filtres bloquants  $m$  éléments parmi  $n$ . Par exemple *Masklt(5, 2)* renvoie en premier  $[0, 0, 1, 1, 1]$ , puis  $[0, 1, 0, 1, 1]$ , ..., puis enfin  $[1, 1, 1, 0, 0]$ . Si on souhaite itérer à travers les modalités possibles du sacrifice de deux objectifs parmi 5 classés dans un vecteur, on peut ainsi le faire avec *Masklt(5, 2)*. Cette approche permet d'éviter l'utilisation de listes extensibles, comme *ArrayList*.
- Nous faisons usage de nombreux autres itérateurs de base comme *IntDicholte* pour itérer par dichotomie entre deux entiers ou *Filelt* pour itérer à travers les fichiers.

Grâce à ces itérateurs de base, nous pouvons créer des itérateurs complexes pour explorer les possibles. Par exemple, *MajGoalMasklt* permet d'itérer à travers les ensembles non subsumés d'objectifs majeurs qu'il est possible d'accomplir sans prendre en compte les objectifs mineurs. L'intérêt de cet itérateur est d'écartier rapidement des "solutions" trop ambitieuses quant aux objectifs majeurs, ou au contraire dominées par des solutions plus ambitieuses quant aux objectifs majeurs. Les solutions non dominées peuvent être visualisées dans un treillis.

À noter que le nombre d'objectifs majeurs accessibles n'est pas pris en compte. Un unique objectif majeur, s'il est absent de tous les autres ensembles, constitue à part entière une solution intéressante. Les solutions intéressantes constituent un front de Pareto. Un front de Pareto possible est par exemple  $[A, B]$ ,  $[A, C]$  et  $[D]$ .

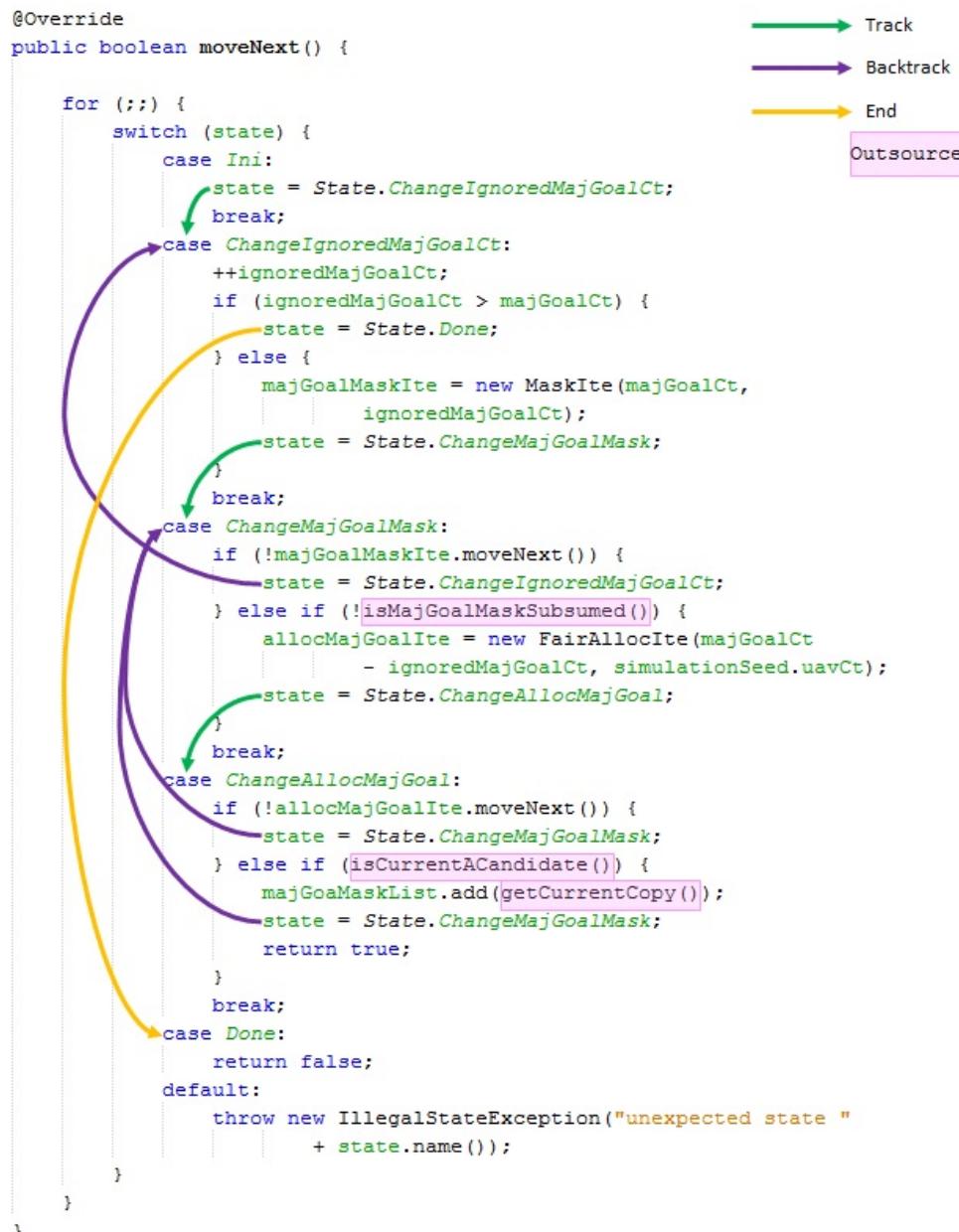


FIGURE 3.25 – L'implémentation d'un itérateur complexe.

L'implémentation d'un itérateur est détaillée dans Fig. 3.25. L'itération est gérée par des changements d'état. À chaque état correspond une opération et un test, en fonction duquel l'exploration se poursuit ou au contraire il est fait marche arrière.

En premier lieu, *ChangeIgnoredMajGoalCt* incrémente le nombre de points de passage ignorés. Ce nombre est porté par *ignoredMajGoalCt*. Il est initialisé à -1 afin qu'à la première itération sa valeur soit 0. Il est supérieurement borné par *majGoalCt* (inclus), le nombre d'objectifs majeurs.

Ensuite, *ChangeMajGoalMask* utilise un *MaskIte* qui parmi les *majGoalCt* objectifs majeurs en masque *ignoredMajGoalCt*.

Enfin, *ChangeAllocMajGoal* utilise un *FairAllocIte* qui alloue les objectifs majeurs qui ne sont pas masqués aux *uavCt* drones. Le nombre de drones fait partie des informations mutualisées et accessibles via *simulationSeed*.

L'état *Ini* ne fait rien, il est là pour l'homogénéité du code car tous les itérateurs ont le même état de début et le même état de fin. L'état *Done* sert à gérer un improbable rappel de *moveNext()* après que l'itération ait été terminée.

L'état *default* devrait ne jamais servir, mais une bonne pratique veut qu'il soit envisagé pour détecter le passage dans un état pour lequel il n'y a pas d'implémentation (habituellement *UnsupportedOperationException*, l'absence d'implémentation est ici la conséquence de l'emploi d'un état inattendu, d'où l'*IllegalStateException*). La même bonne pratique veut que *default* ne soit pas utilisé comme un *else* afin de toujours expliciter le *case*. Enfin lancer une exception dans l'état *default* évite parfois de se voir imposer par le compilateur de retourner une valeur en fin de méthode.

L'omission du *break* permettrait d'éviter un passage par le *switch*, comme par exemple entre *state = State.ChangeMajGoalMask* ; et *case ChangeMajGoalMask*. Elle n'est cependant pas recommandée car l'optimisation qui en résulterait ne vaut pas le risque d'introduire un bug lors d'une éventuelle maintenance.

Pour dégager l'itération, une partie du code est contenue dans des fonctions privées. Ainsi, la copie *getCurrentCopy()* est constituée de plusieurs lignes qui si elles étaient présentes nuiraient à l'intelligibilité de l'itération. De même, *isMajGoalMaskSubsumed()* et *isCurrentACandidate()* sont des tests assez complexes dont il est préférable d'isoler la logique.

*MajGoalMaskIte* itère en fournissant un fragment de solution. Une solution complète est obtenue par un autre itérateur, *SolutionIte*, qui emboîte le pas à *MajGoalMaskIte* dans son premier état actif *ChangeMajGoalMask* (c.f. : Fig. 3.26).

L'implémentation sous la forme impérative d'un enchaînement d'itérateurs peut sembler rébarbative, surtout en comparaison d'une approche plus déclarative à base de contraintes. Mais les contraintes n'ont rien de magique, et pour maîtriser précisément ce qui est fait et dans quel ordre avec des contraintes, il faudrait aussi surcharger (c.f. : *@Override*) des méthodes gérant des itérations.

Par ailleurs, les états permettent une bonne intelligibilité du code. Chaque nœud de décision est traité par un état séparé.

L'avantage est de pouvoir facilement faire marche arrière pour supprimer un nœud, ou au contraire le réintégrer. Il faut faire cependant attention à bien gérer en plus les historiques (e.g. : *majGoalMaskList* dans *MajGoalMaskIte* qui sert pour *isMajGoalMaskSubsumed()*) au risque sinon de perdre la consistance.

```

@Override
public boolean moveNext() {

    for (;;) {
        switch (state) {
            case Ini:
                state = State.ChangeMajGoalMask;
                break;
            case ChangeMajGoalMask:
                if (!majGoalMaskIte.moveToNext()) {
                    state = State.Done;
                } else {

```

FIGURE 3.26 – L'implémentation d'un itérateur complexe faisant usage d'un autre itérateur complexe.

Pour l'anecdote, cette architecture a également servi en 2013 pour un autre projet visant à gérer une allocation de ressources sous contraintes dans un réseau virtuel. [88]

### Fonction d'évaluation des alternatives

Même si le planificateur que nous employons n'est pas aussi sophistiqué qu'Airplan (c.f. : [28]), il ne s'agit pas non plus d'un simple voyageur de commerce : il privilégie l'accomplissement au plus tôt des objectifs majeurs afin d'en accomplir un maximum tant que les conditions sont favorables. Pour se faire, nous énumérons massivement les permutations possibles et calculons pour chacune un score. Ce score est d'autant plus élevé que de nombreux objectifs sont atteints, que ces objectifs sont importants et qu'ils sont accomplis tôt.

Nous n'avons pas porté beaucoup d'attention à cette fonction de score car les contraintes de base (simples déplacements en ligne droite et à vitesse constante) ne sont de toute façon par réalistes. Nous avons simplement choisi quelques paramètres pour éviter que le nombre d'objectifs majeurs accomplis ne chute quand nous introduisons plus d'objectifs mineurs. En faisant ainsi, nous permettons à l'activité liée aux objectifs mineurs de compléter l'activité liée aux objectifs majeurs sans trop la pénaliser.

En pratique, nous augmentons de 50% la contribution au score de chaque fragment d'itinéraire s'il précède un objectif majeur lui-même précédé d'un objectif mineur.

Précisons d'emblée que nous nous intéressons à la divergence, la partie en commun à deux alternatives n'entre donc pas en ligne de compte. Ainsi, dans Fig. 3.27, cela conduit à considérer que la différence entre les alternatives du haut est la même que la différence entre les alternatives du bas.

Pour comparer des alternatives avec des objectifs différents, nous considérons qu'un objectif mineur peut retarder de 50% l'accomplissement d'un objectif majeur. Ainsi, dans Fig. 3.28, deux alternatives sont possibles, l'une qui sacrifie l'accomplissement de *b*, et l'autre qui retarde l'accomplissement de *A*. Le coût de {*A*} est 2,2. le coût de {*A*, *b*} est 3,8. La différence est de 1,6 et la différence acceptable est de  $2,2 \times 0,5$ . {*A*} est donc préférée à {*A*, *b*} et *b* peut être sacrifié. Par contre, dans Fig. 3.29, le coût de {*C*} est de 2,8 alors que le coût de {*C*, *d*} est de 3,2. La différence est de 0,4, la différence acceptable est de  $2,8 \times 0,5$ . Cette fois {*C*, *d*} est préférée à {*C*}.

Si un objectif mineur retarde 2 objectifs majeurs il ne peut les retarder que de 25% chacun, et

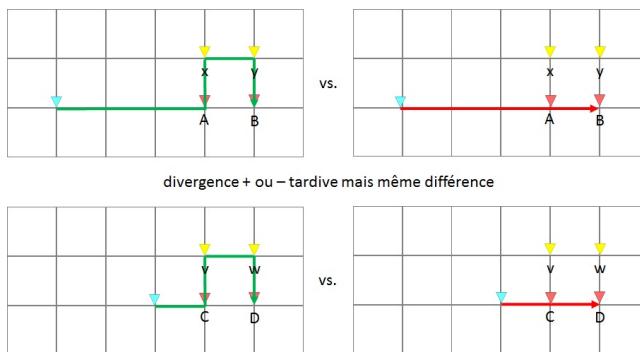


FIGURE 3.27 – Quatre alternatives. Les deux du haut divergent en *A* après 3. Les deux du bas divergent en *C* après 1. Pourtant la différence entre les alternatives est la même en haut et en bas.

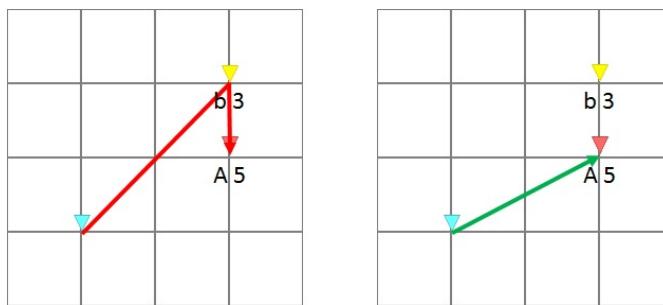


FIGURE 3.28 – Deux alternatives, l'une avec un objectif mineur en plus. L'objectif mineur retarderait l'accomplissement de l'objectif majeur de plus de 50%, aussi il est rejeté.

ainsi de suite. Si deux objectifs mineurs retardent 1 objectif majeur, ils peuvent le retarder de 100%, et ainsi de suite. Ainsi, si 2 objectifs mineurs retardent 2 objectifs majeurs, ils peuvent les retarder de 50% chacun, et ainsi de suite. Fig. 3.33 donnera l'occasion d'une situation avec un objectif mineur *x* retardant deux objectifs majeurs *A* et *D*. Le calcul correspondant sera alors détaillé.

Le choix de 50% comme valeur référence du retard autorisé d'un objectif majeur pour intégrer un objectif mineur est arbitraire, il correspond à l'idée qu'un objectif majeur peut valoir deux objectifs mineurs. En effet, avec cette valeur de 50%, deux objectifs mineurs peuvent retarder un objectif majeur de 100%, ce qui signifie que très exactement le temps initialement affecté à l'accomplissement immédiat de l'objectif majeur est réalouer pour l'accomplissement de deux objectifs mineurs.

## Optimisations

Si nos exemples utilisent des déplacements en ligne droite, nous n'avons pas perdu de vue que l'objectif à terme est d'utiliser un planificateur spécialisé comme Airplan (c.f. : [28]). Or chaque appel à un planificateur spécialisé coûte beaucoup de ressources. Nous allons nous intéresser à la minimisation d'appels au planificateur pour établir les propositions bornées (*bounded proposals*) de notre CNP.

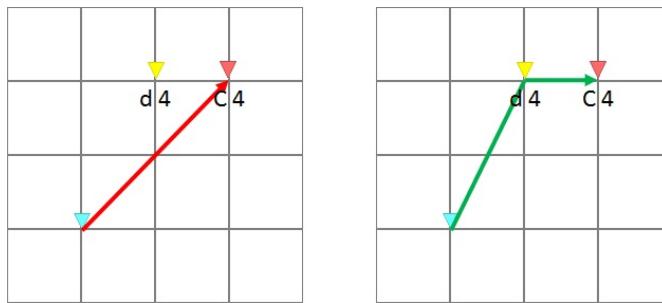


FIGURE 3.29 – Deux alternatives, l'une avec un objectif mineur en plus. L'objectif mineur retarde l'accomplissement de l'objectif mineur de moins de 50%, aussi il est accepté.

Reprenons l'exemple de Fig. 2.22. On constate qu'à mis chemin entre la deuxième et la troisième ville, le trajet cesse de s'allonger. C'est parce qu'arrivé suffisamment près de la troisième ville, il devient plus efficace de continuer vers elle et d'attendre d'avoir visité la dernière ville de la tournée avant de visiter la nouvelle ville. Bien qu'un peu forcé, c'est exemple illustre deux propriétés qui nous intéressent.

La première de ces deux propriétés est que plus la divergence est tardive, moins elle est efficace. L'efficacité d'une alternative, en fonction de la date à laquelle elle est adoptée, est monotone décroissante.

La seconde de ces deux propriétés est qu'en plus d'être monotone décroissante, cette fonction présente souvent des paliers. Pour quantifier ce "souvent" nous avons généré aléatoirement des situations comme celles de Fig. 2.22 avec des villes réparties aléatoirement et une nouvelle ville à visiter. La probabilité de se trouver dans un palier en fonction de l'endroit où l'on se situe en pourcentage sur l'itinéraire de référence est montré dans Fig.3.30

Fig. 2.22 présente deux séries, l'une avec cinq villes dans l'itinéraire de référence, l'autre avec douze villes. La probabilité d'être dans un palier décroît rapidement à la fin dans les deux cas. Ceci est dû à la phase qui suit la visite de la dernière ville et qui précède l'arrivée. Pendant cette phase, il n'y a rien d'autre à faire que d'aller directement vers la nouvelle ville. En fonction de l'emplacement relatif de cette dernière ville par rapport au point d'arrivée, cette phase peut commencer de plus en plus tôt. Il est donc de plus en plus rare de se trouver dans un palier en fin de mission. Avec cinq ville cette phase a tendance à débuter plus tôt qu'avec douze villes.

Inversement, il est très probable de se trouver dans un palier en début de mission. Il est en effet rare que la nouvelle ville soit si proche du point de départ que la première chose à faire idéalement soit de la visiter. Mais dès le point de départ la probabilité d'être dans un palier semble décroître doucement et progressivement jusqu'à la phase qui suit la dernière ville d'arrivée. Jusqu'à cette phase terminale, la probabilité d'être dans un palier correspond à la probabilité d'avoir une meilleure opportunité plus tard, et cette dernière est étroitement liée au pourcentage du trajet qui reste à accomplir.

Ce phénomène d'attente d'une meilleure opportunité existe aussi avec des contraintes plus complexes : les paliers résultent de la possibilité de remettre à plus tard la visite de la nouvelle ville quand les circonstances la rendront plus proche. Ceci dit, les villes dans Fig. 2.22 et Fig. 3.30 sont permanentes. Avec des fenêtres temporelles, quand il y a des solutions, les paliers sont d'autant plus réduits que les fenêtres temporelles sont minces.

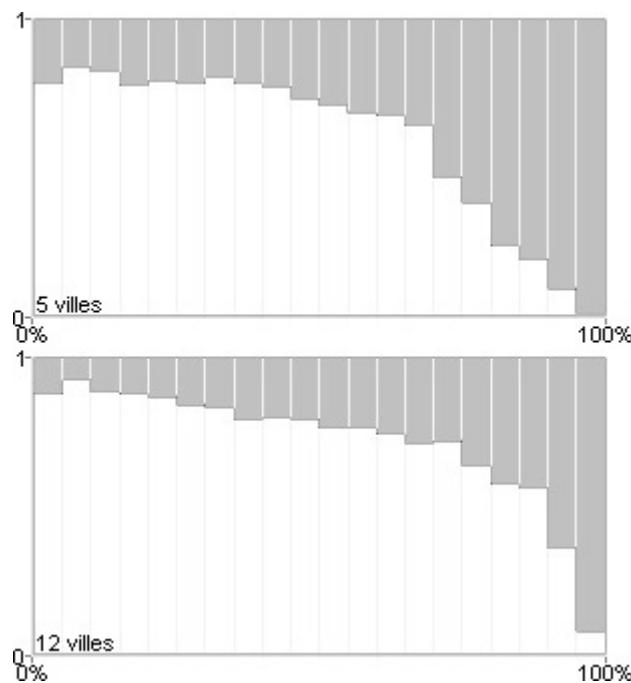


FIGURE 3.30 – Probabilité de se trouver dans un palier en fonction de l’endroit où l’on se situe en pourcentage sur l’itinéraire de référence.

La monotonie décroissante de l’efficacité permet d’approximer cette fonction par dichotomie, et ce d’autant plus vite qu’il y a des paliers. Cela est illustré Fig. 3.31 où la condition d’arrêt est de connaître un point toutes les 25s.

L’intérêt de cette approche par dichotomie est de pouvoir voir la courbe s’affiner progressivement, ce qui est appréciable quand les gains de précision arrivent au compte-gouttes. Nous avons souvent dit que les systèmes automatiques sont rapides et que l’humain est lent. Mais à ce stade du processus de décision, les systèmes automatisés peuvent avoir besoin de temps pour afficher cette information sur l’efficacité de la divergence en fonction de la date à laquelle elle est décidée. Dans ce contexte, il est possible que l’humain prenne très rapidement sa décision alors que la courbe n’est qu’à peine dégrossie.

La silhouette de la courbe se devine d’autant mieux que sa pente maximale est bornée. Dans Fig. 3.32, la dérivée de fonction est  $2x$ . Cela correspond à la capacité du drone à s’éloigner de la nouvelle ville pour devoir ensuite s’en rapprocher avant de s’en éloigner à nouveau. Avec des vents qui peuvent multiplier par deux la vitesse de référence, et également la diviser par deux, sa vitesse maximale est quatre fois sa vitesse minimale. Avec de tels vents, la dérivée de fonction est  $(1 + 4) \times x$ . Ceci est illustré Fig. 3.32.

Cette courbe de la perte d’efficacité à tarder à sélectionner une alternative peut intéresser l’humain car il est susceptible de choisir la plus efficace. Dans les exemples qui ont précédé l’efficacité s’exprime en temps perdu, mais dans un contexte plus réaliste, ce pourrait être l’intérêt de l’observation qui décroît.

Si l’humain s’intéresse à l’efficacité, il peut aussi repérer un palier et décider de se donner plus de temps pour réfléchir, ou appeler quelqu’un pour prendre un renseignement.

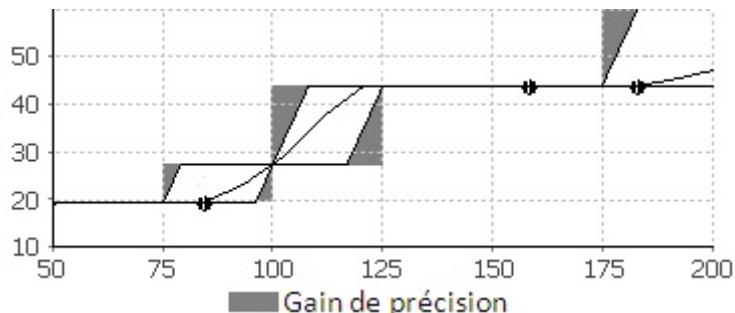


FIGURE 3.31 – Encadrement par dichotomie du temps supplémentaire engendré par la visite d'une ville en plus dans Fig. 2.22. Les bornes, l'une inférieure, à 50s, et l'autre supérieure, à 200s, correspondent à un choix de l'humain dans le contexte de notre CNP (c.f. : Fig. 3.18).

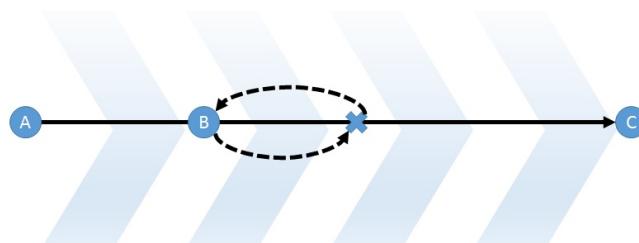


FIGURE 3.32 – Un drone va de A vers C et il est envisagé de retourner visiter B après l'avoir dépassé. Le vent multiplie la vitesse de référence du drone par deux de A vers C et la divise par deux de C vers A. Les vents sont fixes. Pour chaque seconde que le drone passe à s'éloigner de B, il lui faut quatre secondes pour revenir vers B, et lui faudra de nouveau une seconde pour de nouveau s'éloigner de B, soit un total de 5 secondes perdues. Avec un tel vent, cette perte d'efficacité à la seconde est la pénalité maximale pour tarder à décider de visiter une nouvelle ville.

Il peut aussi voir au contraire une décroissance très rapide et à très courte échéance de l'efficacité, et décider alors très vite. C'était le cas évoqué plus haut pour lequel il était utile d'approximer rapidement la fonction d'efficacité.

Nous avons présenté ces possibilités à COGIS dans un article intitulé "Postponing commitment to preserve opportunities when dynamically assigning new goals to UAVs". [19]

### 3.2.7 Expérimentation : sacrifier des objectifs mineurs pour mieux choisir entre des objectifs majeurs

#### Situations envisagées

Nous nous sommes particulièrement intéressé à la possibilité de sacrifier un ou plusieurs objectifs mineurs pour laisser plus de temps à l'utilisateur pour décider entre des objectifs majeurs.

Considérons l'exemple de Fig. 3.33. L'exemple est encore une fois un peu forcé, mais il présente l'intérêt d'être plus lisibles que des situations réelles générées aléatoirement et malgré tout choisies pour leur lisibilité. Ici les objectifs  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  sont majeurs et les objectifs  $x$ , et  $y$  sont mineurs. Comme dans Fig. 3.28 et Fig. 3.29, il faudrait préférer  $\{A, C, D, x\}$  à  $\{A, C, D\}$  et  $\{B, C, D, y\}$  à  $\{B, C, D\}$  car le retard qu'impose l'accomplissement de  $x$  à l'accomplissement de  $A$  et le retard qu'impose l'accomplissement de  $y$  à l'accomplissement de  $B$  sont tous deux acceptables. On peut le vérifier :

- Aller de  $C$  à  $x$  puis de  $x$  à  $A$  coûte 4 alors qu'aller de  $C$  à  $A$  coûte 3,2. Comme  $4 \leq 3,2 \times 1,5$  il n'est pas inacceptable de passer par  $x$ .
- De même aller de  $C$  à  $x$  puis de  $x$  à  $A$  puis de  $A$  à  $D$  coûte 5 alors qu'aller de  $C$  à  $A$  puis de  $A$  à  $D$  coûte 4,2. Comme  $5 \leq 4,2 \times 1,5$  il n'est pas inacceptable de passer par  $x$ .
- Comme rien ne rend inacceptable de passer par  $x$ , il est acceptable de passer par  $x$  et  $\{A, C, D, x\}$  devrait être préféré à  $\{A, C, D\}$ .
- De même, il est acceptable de passer par  $y$  et  $\{B, C, D, y\}$  devrait être préféré à  $\{B, C, D\}$ . Le choix soumis à l'utilisateur devrait donc être entre  $\{A, C, D, x\}$  et  $\{B, C, D, y\}$ .

Pourtant entre  $\{A, C, D, x\}$  et  $\{B, C, D, y\}$ , le choix doit être fait avant la visite de  $C$ , soit en une unité de temps, alors qu'entre  $\{A, C, D\}$  et  $\{B, C, D\}$ , le choix doit être fait avant la visite de  $D$ , soit en quatre unités de temps.  $C$  et  $D$  sont quoiqu'il en soit garantis : c'est entre  $A$  et  $B$  qu'il faut faire un choix. Ces deux objectifs sont majeurs, il est certainement important de choisir judicieusement, puisque l'occasion se présente, lequel doit être accompli et lequel doit être sacrifié au bénéfice de l'autre. C'est typiquement le genre de situation qui justifie de faire appel aux capacités de discernement humain. Et c'est typiquement le genre de situation dans lesquelles l'humain apprécie d'avoir un peu de temps devant lui. Or il est justement possible de lui donner un peu plus de temps : en sacrifiant  $x$  et  $y$ .

Comme l'exemple est forcé, le gain de temps est ici très important : +300%. Mais il peut aussi être significatif dans des situations plus naturelles générées aléatoirement.

Comme une seule des alternatives est mise en œuvre, cela signifie que seul compte le nombre de sacrifices autorisés par alternative. Ainsi dans Fig. 3.33 nous considérons qu'il n'y a qu'un seul sacrifice :  $x$  ou  $y$ .

**Notons qu'un sacrifice autorisé et accepté peut finalement ne pas être mis en œuvre.** Si une alternative résulte de plus de sacrifices que les autres et n'est finalement pas choisie,

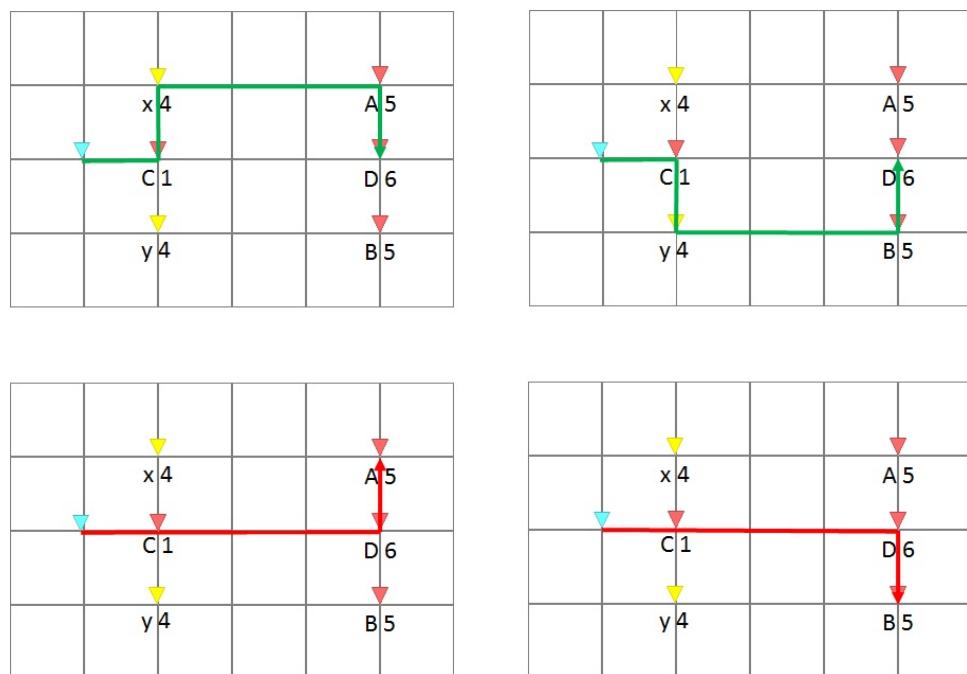


FIGURE 3.33 – Quatre alternatives. Celles en haut (et en vert) dominent celles en bas (et en rouge), mais celles du bas présentent l'intérêt de laisser plus de temps à l'utilisateur pour décider entre les objectifs majeurs au prix du sacrifice d'un objectif mineur. Le sacrifice d'un objectif mineur permet de sacrifier un objectif dans chaque alternative.

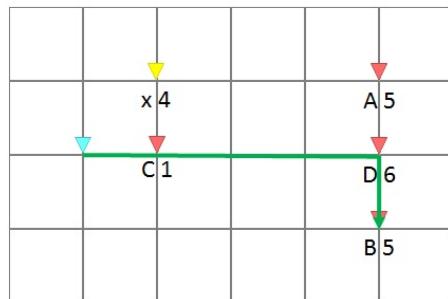
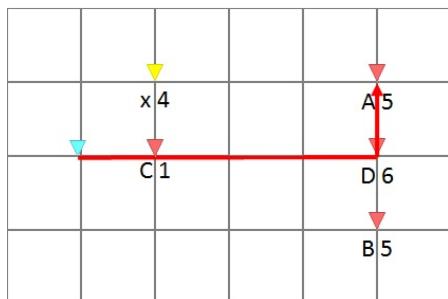
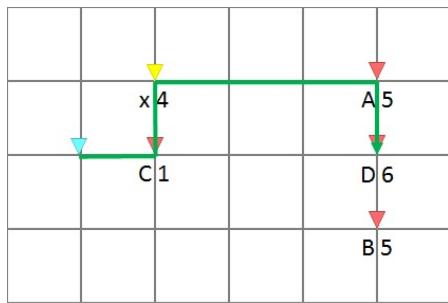


FIGURE 3.34 – Trois alternatives. Celles en haut à gauche (et en vert) dominent celle en bas à gauche (et en rouge), mais si le sacrifice d'un objectif mineur est autorisé, c'est l'alternative en bas à droite qui sera proposée avec celle en bas à droite. Or si celle en bas à droite est finalement choisie, le sacrifice accepté ne sera pas mis en œuvre.

TABLE 3.11 – Pourcentages des situations concernées par nombre d'alternatives.

nombre d'alternatives	0	1	2	3	4	5	6	$\geq 7$
situations concernées	0%	78.2%	14.9%	4.5%	1.5%	0.7%	0.1%	0.2%

plus de sacrifices ont été acceptés qu'il n'y a de sacrifices effectivement mis en œuvre. On peut l'observer dans Fig. 3.34 qui est une situation légèrement différente de celle de Fig. 3.33. Autoriser le sacrifice d'un objectif permet de remplacer l'alternative en haut à gauche par l'alternative en bas à gauche afin que le choix entre *A* et *B* soit plus tardif. Mais si finalement l'alternative mise en œuvre est celle en bas à droite, le gain de temps pour décider n'aura en pratique rien coûté.

### Tests

Pour s'en assurer nous avons généré des milliers de situations telles que celles dans Fig. 3.17. 78,8% de ces situations n'avaient qu'une alternative, 14,9% en avaient deux, 4,5% en avaient 3 et seulement 1,5% en avait 4 comme Fig. 3.17. Cela confirme ce que nous avons dit sur le fait que Fig. 3.17 est bien représentative de la complexité maximale des alternatives que nous entendons soumettre à l'utilisateur. Le tableau 3.11 résume ces chiffres.

La possibilité de renoncer à certains objectifs rend impossible de ne pas trouver d'alternative. Mais il arrive fréquemment, dans 78,8% des cas, qu'une alternative unique domine toutes les

autres. C'est à dire qu'il n'y a que 21,2% des cas dans lesquels il se trouve une indécision telle qu'il est judicieux de faire appel aux capacités de discrimination de l'humain.

Pour les situations avec plusieurs alternatives, nous allons mesurer trois instants de divergence :

1. **L'instant de la divergence par défaut.** Cette divergence est celle constatée sans calcul supplémentaire. Elle correspond toujours à un objectif. Ainsi, dans Fig. 3.16, à droite, cette divergence est en A. Dans Fig. 3.33, cette divergence est en C. Dans ces deux cas la divergence se produit après une unité de temps.
2. **L'instant de la divergence logarithmique.** Cette divergence est la plus tardive possible entre deux alternatives sans altération de ces alternatives. Ainsi, dans Fig. 3.16, à droite, cette divergence se produit après 1,5 unités de temps. Cet instant de divergence peut être calculé par dichotomie, comme nous l'avons vu dans la partie consacrée à l'implémentation. La complexité de ce calcul est donc logarithmique.
3. **L'instant de la divergence favorisant à la décision.** Cette divergence résulte de l'altération des alternatives afin de retarder leur divergence. Rappelons ici que la divergence porte sur les objectifs accomplis et non sur les itinéraires. En abandonnant certains objectifs mineurs, il est possible de retarder l'instant de divergence entre deux alternatives concernant des objectifs majeurs distincts. Dans Fig. 3.33, cette divergence est en D à l'instant 4 alors que la divergence par défaut et la divergence logarithmique sont en C après une unité de temps.

## Résultats

Nous avons généré 1000 situations avec plusieurs alternatives (correspondant à 21,2% de toutes les situations).

Parmi ces 1000 situations, nous avons identifié 187 alternatives portant sur des objectifs majeurs distincts. C'est à dire que nous nous sommes focalisés sur les situations comme celle à gauche dans Fig. 3.16 où il faut faire un choix entre A et B qui sont des objectifs majeurs.

Nous avons dit en présentant notre problème : "même s'il est plus fréquent de solliciter une contribution humaine pour arbitrer entre des objectifs mineurs parce que les systèmes automatisés s'efforcent en amont de garantir que tous les objectifs majeurs soient atteints, il n'est pas non plus rare que cette contribution humaine puisse porter sur des objectifs majeurs." Ces 187 situations parmi 1000 vont dans ce sens et laissent à penser qu'avec les paramètres que nous avons choisis, 20% des situations susceptibles de bénéficier de l'intervention humaine portent sur des arbitrages entre des objectifs majeurs.

Ces situations qui sont critiques parce qu'elles imposent de choisir entre des objectifs majeurs représentent 18,7% des situations imposant de choisir. Ces situations dans lesquelles il faut choisir représentent elles-mêmes 21,2% de toutes les situations. C'est à dire que les situations critiques représentent environ 4% de toutes les situations : c'est très peu, mais c'est bien pour ces décisions que l'on souhaite voir participer l'humain pour qu'il fasse usage de ses capacités spécifique de discernement. **L'humain peut donc avoir un rôle très ponctuel mais décisif, c'est à dire conserver un rôle clé alors que ratio nombre de drones / nombre d'humains est très élevé.**

C'est aussi parce que justement ces situations sont critiques et qu'elles permettent à l'humain d'avoir un rôle décisif qu'il est important d'optimiser la façon dont elles sont gérées, malgré le fait qu'elles ne représentent qu'environ 4% de toutes les situations. Cela correspond bien à notre ambition pour cette thèse : nous n'avons pas essayé de gérer des objectifs et des drones en grand nombre, **nous avons souhaité isoler des situations rares pour y permettre une intervention humaine à forte valeur ajoutée.**

Les autres décisions entre des objectifs mineurs représentent 81,3% des situations avec plusieurs alternatives et 17,7% de toutes les situations. Elles peuvent être présentées à l'humain comme un complément d'activité, en partie pour augmenter très modestement la qualité des choix, mais surtout pour maintenir l'humain attentif et compétent (c.f. : "Humans and Automation : Use, Misuse, Disuse, Abuse" [30]).

Enfin les autres très nombreuses situations (78,8% de toutes les situations) où il n'y a qu'une alternative peuvent être totalement automatisées.

Notre contexte expérimental n'a pas la complexité d'une situation réelle, mais si les chiffres étaient les mêmes dans le contexte d'une patrouille maritime, ils correspondraient à un bon fonctionnement : environ 80% d'automatisme pur, environ 4% d'interventions humaines critiques et environ 16% d'interventions humaines de confort.

Le tableau 3.12 détaille les instants de divergence possibles que nous avons calculés pour ces 1000 situations. Le temps calculé dans la dernière colonne correspond à ce que nous avons appelé auparavant l'instant de divergence logarithmique et constitue le temps de référence pour évaluer l'intérêt du sacrifice d'un ou deux objectifs.

On constate que la date de divergence logarithmique pour ces 1000 situations est en moyenne de 2,563 unités de temps. Mais pour les 187 situations qui portent sur des objectifs critiques, cette moyenne n'est que de 2,331 unités de temps. C'est une conséquence de favoriser l'accomplissement au plus tôt des objectifs majeurs : comme ils tendent à être accomplis plus tôt, les divergences entre eux tendent à être également plus précoces.

C'est un effet négatif car il réduit le temps dont l'humain dispose pour prendre une décision critique. L'effet positif est que dans environ 96% des cas où il n'y a pas de décision critique que l'humain doit prendre, les objectifs majeurs sont accomplis plus rapidement et ont moins de chance de devoir être abandonnés quand un nouvel objectif majeur apparaît.

L'intérêt de l'effet positif est indiscutable, mais il justifie de faire quelque chose pour l'effet négatif. C'est justement ce que permet le sacrifice des objectifs mineurs pour augmenter le temps de décision entre des alternatives portant sur des objectifs majeurs distincts.

Ce sacrifice d'objectifs mineurs est un coût d'autant moindre à payer pour améliorer le fonctionnement du système décisionnel qu'il n'intervient, d'après le tableau 3.12, que 66 fois parmi les 187 décisions critiques, soit lors de 1,4% de toutes les situations ( $21,8\% \times 66/1000$  d'après le tableau 3.12).

Dans ces 66 situations :

- 36 bénéficient d'autoriser le sacrifice d'un objectif mineur mais ne bénéficient pas d'avantage du sacrifice de deux objectifs mineurs.
- 21 situations bénéficient d'autoriser le sacrifice simultané de deux objectifs mineurs mais ne bénéficient pas d'autoriser le sacrifice d'un unique objectif mineur.
- 9 situations bénéficient d'autoriser le sacrifice d'un objectif mineur et bénéficient encore plus d'autoriser le sacrifice de deux objectifs mineurs.

TABLE 3.12 – Temps disponibles en moyenne pour prendre une décision entre des objectifs majeurs, possiblement en autorisant au sacrifice d'objectifs mineurs. Autoriser le sacrifice d'un objectif mineur permet de sacrifier un objectif mineur dans chaque alternative, comme c'est le cas dans Fig. 3.33.

	Temps disponible en autorisant le sacrifice d'au maximum 2 objectifs mineurs	Temps disponible en autorisant le sacrifice d'au maximum 1 objectif mineur	Temps disponible sans autoriser le sacrifice d'objectifs mineurs
1000 situations avec plusieurs alternatives	–	–	2,563
(Σ) 187 situations qui pourraient bénéficier d'ignorer des objectifs mineurs (Σ)=(a)+(b)+(c)+(d)	2,774	2,584	2,331
(a) 121 situations qui ne bénéficient pas d'autoriser le sacrifice d'objectifs mineurs	2,575	2,575	2,575
(b) 36 situations qui bénéficient d'autoriser le sacrifice d'1 objectif mineur mais pas 2	3,027	3,027	1,908
(c) 21 situations qui bénéficient d'autoriser le sacrifice de 2 objectifs mineurs mais pas 1	3,327	1,939	1,939
(d) 9 situations qui bénéficient d'autoriser le sacrifice d'1 sacrifice mineur et aussi d'en autoriser 2	3,141	2,449	1,651
(x) 45 situations qui bénéficient d'autoriser le sacrifice d'1 objectif mineur (x)=(b)+(d)	3,050	2,911	1,857
(y) 30 situations qui bénéficient d'autoriser le sacrifice de 2 objectifs mineurs plus qu'elles ne bénéficient d'autoriser le sacrifice d'1 sacrifice mineur (y)=(c)+(d)	3,272	2,092	1,852
(z) 66 situations qui bénéficient d'autoriser le sacrifice de 2 sacrifices mineurs (z)=(b)+(c)+(d)	3,138	2,602	1,881

On constate qu'il est plus fréquent de devoir autoriser le sacrifice de deux objectifs mineurs simultanément pour avoir un effet que d'avoir un effet supplémentaire en autorisant le sacrifice d'un deuxième objectif mineur après avoir eu un premier effet en autorisant le sacrifice d'un premier objectif mineur. Le problème étant fortement combinatoire, il est tentant de se restreindre, comme nous l'avons fait, à un nombre réduit de sacrifices, mais nous pouvons voir ici que de ne considérer qu'un seul et unique sacrifice réduit d'un tiers les situations bénéficiaires. Autoriser deux sacrifices semble être ici un bon compromis *effet / complexité*.

Pour ces 66 situations, le bénéfice d'autoriser le sacrifice de deux objectifs est important :

- Le temps pour décider passe de 1,881 à 3,138 si l'on considère l'autorisation du sacrifice de deux objectifs. Soit +67%.

En n'autorisant que le sacrifice d'un seul objectif mineur, et en perdant un tiers des bénéficiaires, nous obtenons encore pour ces 45 situations un bénéfice important :

- Le temps pour décider passe de 1,857 à 2,911. Soit +57%.

Le résultat que nous souhaitons mettre en avant à l'issue de ce test est que **pour les situations critiques (environ 4% de toutes les situations), nous avons obtenu dans deux tiers des cas un gain de temps pour que l'humain prenne sa décision de 67% en autorisant le sacrifice deux objectifs mineurs.**

Le gain peut sembler modeste (67%) et ne concerner qu'un nombre réduit de cas (35,3% des situations critiques) mais cela représente quand même un gain de 23,7% en moyenne du temps dont dispose l'humain pour prendre une décision critique. Dans un contexte opérationnel où parfois peu de chose fait la différence, c'est significatif.

# **Conclusion**



## Chapitre 4

# Conclusion

“Les connaissances humaines, l’expérience humaine et le jugement humain fournissent une capacité unique à analyser les risques liés à la sécurité et à anticiper dans des situations incertaines et inédites. Le défi est de fournir des systèmes d’information et de décision qui protègent et préservent le rôle clé de l’utilisateur humain, et qui augmentent et enrichissent la cognition des opérateurs plutôt qu’ils ne remplacent les opérateurs dans la prise de décisions complexes.” [1] L’homme doit donc demeurer une composante essentielle des systèmes automatisés, [9] particulièrement dans les systèmes décisionnels où la cognition peut être partagée par l’humain et les systèmes automatisés. [2]

Plusieurs référentiels des niveaux d’automatisation ont accompagné la conception de systèmes dans lesquels les humains et les systèmes automatisés se complètent. Ces référentiels se sont longtemps focalisés sur la part – parfois balbutiante – des systèmes automatisés. Le référentiel proposé en 1978 par Sheridan et Verplank [8] propose ainsi parmi ces dix niveaux d’automatisation plusieurs niveaux de très faible automatisation. Aujourd’hui, l’automatisation a progressé et l’attention se focalise d’avantage sur des situations fortement automatisées. La question devient alors celle du niveau d’autonomie des systèmes automatisés. En négatif se dessine une autre problématique : celle de la place de l’humain dans de tels systèmes. Si l’humain reste essentiel, il est pertinent de lui consacrer une attention particulière, et c’est là le sens des recommandations du *Defence Science Board*. [7]

Afin d’avancer dans ce sens, nous avons proposé LOA4, un référentiel des niveaux d’autonomie. Pour quatre aspects de ce qui peut être automatisé – la perception (l’établissement des croyances), l’autorité (la gestion des objectifs), l’action (la mise en œuvre) et l’adaptation (le changement de fonctionnement) – LOA4 interroge si la contribution humaine est systématique (niveau 0), possible (niveau 0.x) ou systématiquement inexistante (niveau 1). De façon complémentaire, pour ces trois niveaux, l’autonomie des systèmes automatisés peut être systématiquement inexistante (niveau 0), possible (niveau 0.x) ou systématique (niveau 1).

LOA4 a plusieurs qualités qui en font un référentiel pratique : ses quatre dimensions donne un aperçu de qui fait quoi (des humains ou des systèmes automatisés) ; les niveaux sont en petit nombre (trois) et sont les mêmes dans toutes les dimensions ; le diagramme radar ; il est enfin possible de se baser sur l’existant PACT et UML. Mais l’essentiel est que le référentiel LOA4 est d’abord un référentiel des niveaux d’autonomie et qu’il s’intéresse systématiquement à la place de l’humain. L’intérêt de LOA4 pour l’adaption – qui peut modifier le fonctionnement à l’initiative des systèmes automatisés, de l’humain ou des deux – est aussi de nature à en faire

un référentiel en phase avec les problématiques actuelles.

Suite aux retours favorables, [10] surtout en interne, et suite à la publication de cette thèse, nous espérons que ce référentiel remportera l'adhésion d'utilisateurs.

Mais mieux appréhender la place idéale de l'humain dans un système décisionnel n'est pas suffisant, il faut aussi s'intéresser à implémenter des solutions qui y correspondent. En l'occurrence nous avons choisi de proposer un système avec un niveau LOA4 de décision de 0.x, c'est à dire que parfois les humains contribuent à la décision, mais pas toujours. Cette pondération concilie deux objectifs. Que l'humain ne contribue pas toujours à la décision est de nature à augmenter le ratio *nombre de drones / nombre d'humains*. Mais que l'humain contribue parfois à la décision est de nature à lui donner l'opportunité de jouer un rôle clé qu'il est le seul à pouvoir tenir du fait de ses aptitudes spécifiques.

Pour implémenter ce système de décision d'un niveau LOA4 de décision de 0.x, nous avons déployé une double évaluation de l'importance des objectifs, auxquelles correspond une double façon de (re-)planifier une mission. Dans un cas l'importance des objectifs est évaluée aussi précisément que possible en fonction de règles élitées à l'avance. Dans ce cas, les systèmes automatisés, seuls, utilisent cette importance précise – mais potentiellement peu pertinente – pour guider leurs choix. Dans l'autre cas, les objectifs sont groupés en catégories d'importance, et les objectifs d'une même catégorie d'importance sont considérés comme interchangeables. Dans cet autre cas, l'humain se voit donner l'opportunité de substituer à cette égalité sa préférence humaine. Cette préférence humaine, que l'humain exprime alors qu'il est en prise avec la réalité, rend le système dans son ensemble moins dépendant de la qualité de l'élicitation.

Bien sûr, solliciter l'humain doit se faire habilement. D'abord il est préférable de solliciter l'humain pour des dilemmes critiques, par exemple quand deux objectifs majeurs sont en conflit et que l'un doit être privilégié au dépend de l'autre. Ensuite il faut présenter à l'humain un nombre limité d'alternatives, quitte à ne lui soumettre que la partie la plus critique d'une situation, comme par exemple les conflits entre objectifs majeurs, sans égard pour les conflits entre objectifs mineurs. [15] Il faut aussi laisser suffisamment de temps à l'humain pour prendre sa décision.

À cet égard, il est important de remarquer que parfois l'humain a du temps devant lui pour prendre sa décision et qu'il peut être opportun d'en profiter. [19] Mais si le temps vient à manquer, il peut être judicieux de sacrifier des objectifs mineurs pour que l'humain dispose de plus de temps pour arbitrer des conflits entre des objectifs majeurs : c'est ce dont nous avons fait l'expérience. En autorisant le sacrifice d'un unique objectif mineur, nous avons obtenu 57% de temps en plus pour un quart des conflits entre objectifs majeurs. Or envisager le sacrifice d'un unique objectif mineur n'augmente que modestement la complexité combinatoire lors de la recherche de solutions. Plus d'un tiers des conflits entre objectifs majeurs bénéficient – en moyenne de 60% – du sacrifice de deux objectifs mineurs. Dans un contexte opérationnel où parfois peu de chose fait la différence, c'est un résultat significatif.

Mais au delà des résultats de cette expérimentation, ce qu'elle révèle de plus important est peut-être les proportions dans lesquelles l'humain est sollicité. Les situations dans lesquelles des objectifs majeurs sont en conflit ne représentent que 4% de toutes les situations, et les autres situations conflictuelles représentent 16% de toutes les situations. Dans le contexte d'une patrouille maritime, ces chiffres correspondent à un bon fonctionnement : environ

80% d'automatisme pur, environ 4% d'interventions humaines critiques et environ 16% d'interventions humaines de confort.

# Bibliographie

- [1] "Uninhabited military vehicles (umvs) : Human factors issues in augmenting the force," NATO, Tech. Rep., 2007. (Cité en pages 9, 10, 20, 32, 36, 63, 80, 81, 97 et 133.)
- [2] D. D. Woods, "Cognitive technologies : The design of joint human-machine cognitive systems," *AI magazine*, vol. 6, no. 4, p. 86, 1985. (Cité en pages 9, 49 et 133.)
- [3] J. J. Cañas, L. Salmerón, and I. Fajardo, "Toward the analysis of the interaction in the joint cognitive system," in *Future interaction design*. Springer, 2005, pp. 85–104. (Cité en pages 9 et 49.)
- [4] J.-P. Barthélémy, R. Bisdorff, and G. Coppin, "Human centered processes and decision support systems," *European Journal of Operational Research*, vol. 136, no. 2, pp. 233–252, 2002. (Cité en page 9.)
- [5] "Plan stratque de recherche et technologie de dnse et de srit' DGA, Tech. Rep., 2009. (Cité en pages 9, 19 et 49.)
- [6] "Bilan 2012," DGA, Tech. Rep., 2012. (Cité en pages 9, 19 et 49.)
- [7] "The role of autonomy in dod systems," DSB, Tech. Rep., 2012. (Cité en pages 9, 10, 18, 19, 45, 48, 49, 67 et 133.)
- [8] T. B. Sheridan and W. L. Verplank, "Human and computer control of undersea teleoperators," 1978. (Cité en pages 9, 29, 30, 38 et 133.)
- [9] R. Parasuraman and C. D. Wickens, "Humans : Still vital after all these years of automation," *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 50, no. 3, pp. 511–520, 2008. (Cité en pages 10, 26, 63 et 133.)
- [10] P.-Y. Dumas, "Loa5 : a new five-dimension model to design automatic systems," *MAST*, 2012. (Cité en pages 10, 78, 115 et 134.)
- [11] R. M. Taylor, M. C. Bonner, B. Dickson, H. Howells, C. A. Miller, N. Milton, K. Pleydell-Pearce, N. Shadbolt, J. Tennison, and S. Whitecross, "Cognitive cockpit engineering : Coupling functional state assessment, task knowledge management, and decision support for context-sensitive aiding," 2000. (Cité en pages 10, 35, 37 et 49.)
- [12] R. Parasuraman, T. B. Sheridan, and C. D. Wickens, "A model for types and levels of human interaction with automation," *Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans, IEEE Transactions on*, vol. 30, no. 3, pp. 286–297, 2000. (Cité en pages 10, 29, 30, 38 et 39.)
- [13] H. Funk and C. Miller, "Delegation in loa3 space," 2008. (Cité en pages 10 et 39.)

- [14] "Supervisory control of multiple uninhabited systems - methodologies and enabling human-robot interface technologies," NATO, Tech. Rep., 2012. (Cité en pages 10, 20, 40 et 48.)
- [15] P.-Y. Dumas, A. E. F. Seghrouchni, and P. Taillibert, "Aerial : a framework to support human decision making in a constrained environment," in *Tools with Artificial Intelligence (ICTAI), 2012 IEEE 24th International Conference on*, vol. 1. IEEE, 2012, pp. 626–633. (Cité en pages 10, 97, 110, 113 et 134.)
- [16] L. Rachmawati and D. Srinivasan, "Incorporating the notion of relative importance of objectives in evolutionary multiobjective optimization," *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 4, pp. 530–546, 2010. (Cité en pages 10, 60, 97 et 102.)
- [17] T. Sandholm, "An implementation of the contract net protocol based on marginal cost calculations," in *AAAI*, vol. 93, 1993, pp. 256–262. (Cité en pages 11, 57, 104 et 105.)
- [18] R. G. Smith, "The contract net protocol : High-level communication and control in a distributed problem solver," *Computers, IEEE Transactions on*, vol. 100, no. 12, pp. 1104–1113, 1980. (Cité en pages 11, 54, 97 et 104.)
- [19] P.-Y. Dumas, "Postponing commitment to preserve opportunities when dynamically assigning new goals to uavs," *COGIS*, 2009. (Cité en pages 11, 97, 124 et 134.)
- [20] B. Joseph, S. Langevin, O. Amram, P. Le Blaye, and B. NKaoua, "Cognitive task analysis : A crucial step to improve the usability of a ground control station for unmanned air system mission," *RTO-MP-SCI-202*, 2009, nATO. (Cité en pages 19, 20, 42, 71, 83, 85, 86 et 88.)
- [21] [Online]. Available : <https://www.thalesgroup.com/fr/worldwide/defense/systemes-de-mission-et-de-surveillance> (Cité en page 19.)
- [22] "Development and operation of uavs for military and civil applications," NATO, Tech. Rep., 1999. (Cité en page 19.)
- [23] "Human factors in the 21st century," NATO, Tech. Rep., 2001. (Cité en page 19.)
- [24] "Integration of systems with varying levels of autonomy," NATO, Tech. Rep., 2008. (Cité en page 20.)
- [25] [Online]. Available : <http://frontex.europa.eu/> (Cité en page 23.)
- [26] [Online]. Available : <http://www.vintagewings.ca/VintageNews/Stories/tabid/116/articleType/ArticleView/articleId/111/language/fr-FR/A-Snowbird-in-Hell.aspx> (Cité en page 24.)
- [27] "Air traffic management : Support for decision making optimisation - automation," AGARD, Tech. Rep., 1997. (Cité en page 25.)
- [28] M. Soulignac, P. Taillibert, and M. Rueher, "Time-minimal path planning in dynamic current fields," in *Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 2473–2479. (Cité en pages 25, 102, 119 et 120.)
- [29] Y. Bar-Shalom, P. K. Willett, and X. Tian, "Tracking and data fusion," *A Handbook of Algorithms*. Yaakov Bar-Shalom, 2011. (Cité en pages 25 et 38.)
- [30] R. Parasuraman and V. Riley, "Humans and automation : Use, misuse, disuse, abuse," *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 39, no. 2, pp. 230–253, 1997. (Cité en pages 26, 38, 63, 100, 113 et 128.)

- [31] L. Bainbridge, "Ironies of automation," *Automatica*, vol. 19, no. 6, pp. 775–779, 1983. (Cité en page 26.)
- [32] F. Legras, A. Glad, O. Simonin, and F. Charpillet, "Authority sharing in a swarm of uavs : Simulation and experiments with operators," in *Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots*. Springer, 2008, pp. 293–304. (Cité en pages 26 et 106.)
- [33] E. Hollnagel, "Human reliability assessment in context," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 37, no. 2, p. 159, 2005. (Cité en page 27.)
- [34] S. W. Dekker and D. D. Woods, "Maba-maba or abracadabra ? progress on human–automation co-ordination," *Cognition, Technology & Work*, vol. 4, no. 4, pp. 240–244, 2002. (Cité en page 27.)
- [35] N. Naikar and A. Saunders, "Crossing the boundaries of safe operation : Training for error detection and error recovery," in *Proceedings of the 21st European Conference on Human Decision Making and Control*, 2002. (Cité en page 27.)
- [36] ———, "Crossing the boundaries of safe operation : An approach for training technical skills in error management," *Cognition, Technology & Work*, vol. 5, no. 3, pp. 171–180, 2003. (Cité en page 27.)
- [37] D. C. Foyle, R. S. McCann, and S. G. Shelden, "Attentional issues with superimposed symbology : Formats for scene-linked displays," in *Proceedings of the Eighth international symposium on Aviation Psychology*, vol. 98. Columbus, OH : Ohio State University, 1995, p. 103. (Cité en page 27.)
- [38] N. B. Sarter and D. D. Woods, "How in the world did we ever get into that mode ? mode error and awareness in supervisory control," *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 37, no. 1, pp. 5–19, 1995. (Cité en page 27.)
- [39] E. Palmer, ""oops, it didn't arm." a case study of two automation surprises." in *Proceedings of the Eighth International Symposium on Aviation Psychology*, 1995, pp. 227–232. (Cité en page 27.)
- [40] M. Quigley, M. A. Goodrich, and R. W. Beard, "Semi-autonomous human-uav interfaces for fixed-wing mini-uavs," in *Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 3. IEEE, 2004, pp. 2457–2462. (Cité en page 31.)
- [41] S. Pizzoli, C. Tessier, and F. Dehais, "What the heck is it doing ? better understanding human-machine conflicts through models," *Autonomous Agents (RDA2) 2012*, p. 44, 2012. (Cité en pages 33, 34, 49, 73, 74, 76 et 83.)
- [42] M. Bonner, R. Taylor, K. Fletcher, and C. Miller, "Adaptive automation and decision aiding in the military fast jet domain," in *Proceedings of the conference on Human Performance, Situation Awareness and Automation : User centered design for the new Millenium*. Citeseer, 2000. (Cité en pages 34, 47 et 68.)
- [43] R. Klomp, M. R. van Paassen, C. Borst, M. Mulder, T. Bos, P. van Leeuwen, and M. Mooij, "Joint human-automation cognition through a shared representation of 4d trajectory management," *Proceedings of the SESAR Innovation Days (2012)*, pp. 1–7, 2012. (Cité en pages 35 et 49.)

- [44] S. R. Dixon, C. D. Wickens, and A. Human, "Automation reliability in unmanned aerial vehicle control : A reliance-compliance model of automation dependence in high workload," 2006. (Cité en page 38.)
- [45] B. Kidwell, G. L. Calhoun, H. A. Ruff, and R. Parasuraman, "Adaptable and adaptive automation for supervisory control of multiple autonomous vehicles," in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 56, no. 1. SAGE Publications, 2012, pp. 428–432. (Cité en page 38.)
- [46] C. Miller, R. Goldman, H. Funk, P. Wu, and B. Pate, "A playbook approach to variable autonomy control : Application for control of multiple, heterogeneous unmanned air vehicles," in *Proceedings of FORUM 60, the Annual Meeting of the American Helicopter Society*, 2004, pp. 7–10. (Cité en pages 40 et 41.)
- [47] C. Miller, H. Funk, P. Wu, R. Goldman, J. Meisner, and M. Chapman, "The playbook (trademark) approach to adaptive automation," 2005. (Cité en pages 40, 49 et 107.)
- [48] C. Miller, "Frameworks for supervisory control : Characterizing relationships with uninhabited vehicles," *Journal of Human-Robot Interaction*, vol. 1, no. 2, pp. 183–201, 2012. (Cité en pages 43 et 44.)
- [49] M. L. Cummings, "Human supervisory control of swarming networks," in *2nd Annual Swarming : Autonomous Intelligent Networked Systems Conference*, 2004, pp. 1–9. (Cité en page 45.)
- [50] T. B. Sheridan and R. Parasuraman, "Human-automation interaction," *Reviews of human factors and ergonomics*, vol. 1, no. 1, pp. 89–129, 2005. (Cité en page 49.)
- [51] K. Christoffersen and D. D. Woods, "How to make automated systems team players," *Advances in human performance and cognitive engineering research*, vol. 2, pp. 1–12, 2002. (Cité en page 49.)
- [52] G. Klein, D. D. Woods, J. M. Bradshaw, R. R. Hoffman, and P. J. Feltovich, "Ten challenges for making automation a "team player" in joint human-agent activity," *IEEE Intelligent Systems*, vol. 19, no. 6, pp. 91–95, 2004. (Cité en page 49.)
- [53] S. Ahrndt, J. Fähndrich, and S. Albayrak, "Human-aware planning : A survey related to joint human-agent activities," in *Trends in Practical Applications of Heterogeneous Multi-Agent Systems. The PAAMS Collection.*, ser. Advances in Intelligent Systems and Computing, J. Bajo, J. M. Corchado, P. Mathieu, A. Campbell, A. Ortega, E. Adam, E. M. Navarro, S. Ahrndt, M. Moreno, and V. Julián, Eds. Springer International Publishing, 2014, vol. 293, pp. 95–102. (Cité en page 49.)
- [54] M. Cirillo, L. Karlsson, and A. Saffiotti, "Human-aware task planning : an application to mobile robots," *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, vol. 1, no. 2, p. 15, 2010. (Cité en page 49.)
- [55] R. Alami, A. Clodic, V. Montreuil, E. A. Sisbot, and R. Chatila, "Task planning for human-robot interaction," in *Proceedings of the 2005 joint conference on Smart objects and ambient intelligence : innovative context-aware services : usages and technologies*. ACM, 2005, pp. 81–85. (Cité en page 49.)
- [56] M. L. Cummings, A. S. Brzezinski, and J. D. Lee, "Operator performance and intelligent aiding in unmanned aerial vehicle scheduling," *Intelligent Systems, IEEE*, vol. 22, no. 2, pp. 52–59, 2007. (Cité en pages 49, 50 et 52.)

- [57] M. L. Cummings and P. J. Mitchell, "Predicting controller capacity in supervisory control of multiple uavs," *Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans, IEEE Transactions on*, vol. 38, no. 2, pp. 451–460, 2008. (Cité en pages 50, 51, 63 et 103.)
- [58] S. Bruni and M. L. Cummings, "Tracking resource allocation cognitive strategies for strike planning," 2006. (Cité en pages 50, 51 et 53.)
- [59] S. Bruni, J. J. Marquez, A. Brzezinski, and M. Cummings, "Visualizing operators' cognitive strategies in multivariate optimization," in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 50, no. 11. Sage Publications, 2006, pp. 1180–1184. (Cité en page 53.)
- [60] N. Jussien, G. Rochart, X. Lorca *et al.*, "Choco : an open source java constraint programming library," in *CRAI'08 Workshop on Open-Source Software for Integer and Constraint Programming (OSSICP'08)*, 2008, pp. 1–10. (Cité en page 54.)
- [61] M. Soulignac and P. Taillibert, "Fast trajectory planning for multiple site surveillance through moving obstacles and wind," in *Proceedings of the Workshop of the UK Planning and Scheduling Special Interest Group*, 2006, pp. 25–33. (Cité en pages 54 et 97.)
- [62] [Online]. Available : <http://www.fipa.org/specs/fipa00029/> (Cité en pages 54 et 55.)
- [63] S. Aknine, S. Pinson, and M. F. Shakun, "An extended multi-agent negotiation protocol," *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 5–45, 2004. (Cité en page 57.)
- [64] M. P. Singh, "Agent communication languages : Rethinking the principles," *Computer*, vol. 31, no. 12, pp. 40–47, 1998. (Cité en page 57.)
- [65] ———, "A social semantics for agent communication languages," in *Issues in agent communication*. Springer, 2000, pp. 31–45. (Cité en page 57.)
- [66] K. Decker and V. R. Lesser, "Designing a family of coordination algorithms." in *ICMAS*, vol. 95, 1995, pp. 73–80. (Cité en page 57.)
- [67] T. Sandholm and V. R. Lesser, "Issues in automated negotiation and electronic commerce : Extending the contract net framework," in *ICMAS*, vol. 328, no. 335, 1995, pp. 66–73. (Cité en pages 58, 104 et 105.)
- [68] A. J. Clot, "Communications command and control : the crowded spectrum," 2000. (Cité en page 58.)
- [69] C. Caval, A. E. F. Seghrouchni, and P. Taillibert, "Keeping a clear separation between goals and plans." (Cité en pages 58 et 63.)
- [70] P. Vincke, A. Colorni, M. Paruccini, and B. Roy, "Preferences and numbers," *Aide multicritère à la décision*, pp. 343–354, 2001. (Cité en page 58.)
- [71] M. Öztürké, A. Tsoukiàs, and P. Vincke, *Preference modelling*. Springer, 2005. (Cité en page 58.)
- [72] L. J. Savage, "Elicitation of personal probabilities and expectations," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 66, no. 336, pp. 783–801, 1971. (Cité en page 60.)
- [73] M. Abdellaoui, "Parameter-free elicitation of utility and probability weighting functions," *Management Science*, vol. 46, no. 11, pp. 1497–1512, 2000. (Cité en page 60.)

- [74] J. Braga and C. Starmer, "Preference anomalies, preference elicitation and the discovered preference hypothesis," *Environmental and Resource Economics*, vol. 32, no. 1, pp. 55–89, 2005. (Cité en page 60.)
- [75] L. Rachmawati and D. Srinivasan, "A multi-objective evolutionary algorithm with weighted-sum niching for convergence on knee regions," in *Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and evolutionary computation*. ACM, 2006, pp. 749–750. (Cité en pages 60, 61 et 102.)
- [76] G. D. M. Serugendo, N. Foukia, S. Hassas, A. Karageorgos, S. K. Mostéfaoui, O. F. Rana, M. Ulieru, P. Valckenaers, and C. Van Aart, *Self-organisation : Paradigms and applications*. Springer, 2004. (Cité en page 62.)
- [77] C. Chopinaud, "Contrôle de l'émergence de comportements dans les systèmes d'agents cognitifs autonomes," Ph.D. dissertation, Université Pierre et Marie Curie (UPMC), 2007, type : Thèse de Doctorat – Soutenue le : 2007-07-09 – Dirigée par : El fallah seghrouchni, Amal – Encadrée par : TAILLIBERT Patrick. (Cité en page 62.)
- [78] [Online]. Available : <http://www.cynefin.net> (Cité en page 62.)
- [79] Z. Lanir, *Fundamental surprises*, 1986. (Cité en page 62.)
- [80] C. F. Kurtz and D. J. Snowden, "The new dynamics of strategy : Sense-making in a complex and complicated world," *IBM systems journal*, vol. 42, no. 3, pp. 462–483, 2003. (Cité en page 62.)
- [81] D. J. Snowden, "Multi-ontology sense making : a new simplicity in decision making," *Informatics in Primary Care*, vol. 13, no. 1, pp. 45–54, 2005. (Cité en page 62.)
- [82] S. Koos, A. Cully, and J.-B. Mouret, "Fast damage recovery in robotics with the t-resilience algorithm," *International Journal of Robotics Research*, vol. 32, no. 14, pp. 1700–1723, 2013. (Cité en page 62.)
- [83] G. E. Box and N. R. Draper, *Empirical model-building and response surfaces*. John Wiley & Sons, 1987. (Cité en page 67.)
- [84] N. Vidal, P. Taillibert, and S. Aknine, "Online behavior recognition : A new grammar model linking measurements and intents," in *Tools with Artificial Intelligence (ICTAI), 2010 22nd IEEE International Conference on*, vol. 2. IEEE, 2010, pp. 129–137. (Cité en page 78.)
- [85] K. Deb, *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. John Wiley & Sons, 2001, vol. 16. (Cité en page 110.)
- [86] P. Marson, M. Soulignac, and P. Taillibert, "Aerial : Combining multi-agent systems and trajectory planning techniques for uav rendezvous problems," 2008. (Cité en page 115.)
- [87] P.-E. Marson, M. Soulignac, and P. Taillibert, "Aerial : Hypothetical trajectory planning for multi-uavs coordination and control (demo paper)," 2008. (Cité en page 115.)
- [88] F. Guenane, P.-Y. Dumas, M. Nogueira, and G. Pujolle, "Solving virtual network resources allocations problem using constraint satisfaction problem model," *The 4th international conference Network Of The Future NOF-2013*, October 2013. (Cité en page 119.)