



HAL
open science

Contribution à la résilience d'un système coopératif Homme-robot par une gestion de l'autonomie ajustable

Stéphane Zieba

► **To cite this version:**

Stéphane Zieba. Contribution à la résilience d'un système coopératif Homme-robot par une gestion de l'autonomie ajustable. Automatique. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2009. Français. NNT : 2009VALE0023 . tel-03033058

HAL Id: tel-03033058

<https://uphf.hal.science/tel-03033058>

Submitted on 1 Dec 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

Présentée à
l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

Pour l'obtention du

Doctorat

Spécialité Automatique et Informatique des Systèmes Industriels et Humains
Mention Automatique Industrielle et Humaine

présentée par

Stéphane ZIEBA

Contribution à la résilience d'un système coopératif Homme-robot par une gestion de l'autonomie ajustable

Soutenue publiquement le 28 septembre 2009 devant le Jury composé de :

Françoise CADORET	DGA	Invitée
Jean-Louis FERRIER	LISA/Université d'Angers	Examinateur
Philippe HOPPENOT	IBISC/Université d'Evry	Rapporteur
Toshiyuki INAGAKI	Université de Tsukuba (Japon)	Examinateur
Joël MORILLON	THALES	Invité
Philippe POLET	LAMIH/UVHC	Co-Encadrant de Thèse
Frédéric VANDERHAEGEN	LAMIH/UVHC	Directeur de Thèse
Peter A. WIERINGA	TU-Delft (Pays-Bas)	Rapporteur

THESE

Présentée à
l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis

Pour l'obtention du

Doctorat

Spécialité Automatique et Informatique des Systèmes Industriels et Humains
Mention Automatique Industrielle et Humaine

présentée par

Stéphane ZIEBA

Contribution à la résilience d'un système coopératif Homme-robot par une gestion de l'autonomie ajustable

Soutenue publiquement le 28 septembre 2009 devant le Jury composé de :

Françoise CADORET	DGA	Invitée
Jean-Louis FERRIER	LISA/Université d'Angers	Examineur
Philippe HOPPENOT	IBISC/Université d'Evry	Rapporteur
Toshiyuki INAGAKI	Université de Tsukuba (Japon)	Examineur
Joël MORILLON	THALES	Invité
Philippe POLET	LAMIH/UVHC	Co-Encadrant de Thèse
Frédéric VANDERHAEGEN	LAMIH/UVHC	Directeur de Thèse
Peter A. WIERINGA	TU-Delft (Pays-Bas)	Rapporteur

AVANT-PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, au sein de l'équipe Systèmes Homme-machine, dirigée par le Professeur Frédéric Vanderhaegen. Je tiens ici à le remercier pour la confiance qu'il m'a accordée et pour avoir dirigé mes travaux.

Je suis très reconnaissant envers messieurs Philippe Hoppenot, professeur à l'Université d'Evry et Peter Wieringa, professeur à l'Université de Delft, pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire et d'en être les rapporteurs.

Je remercie messieurs Jean-Louis Ferrier, professeur à l'Université d'Angers, Toshiyuki Inagaki, professeur à l'Université de Tsukuba, Joël Morillon, de THALES et madame Françoise Cadoret, de la DGA pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail en acceptant de participer à mon jury de thèse.

Mes remerciements les plus chaleureux sont naturellement pour monsieur Philippe Polet, maître de conférences à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis pour son encadrement quotidien et ses encouragements.

Je ne peux terminer sans remercier mes parents, ma sœur et mon frère pour leur soutien tout au long de ces trois années de thèse.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	4
SOMMAIRE	5
INDEX DES FIGURES	9
INDEX DES TABLEAUX	11
INTRODUCTION GENERALE	13
CHAPITRE 1 : PROBLEMATIQUE DE LA ROBOTIQUE MOBILE TERRESTRE : APPORTS DES RECHERCHES DANS LES SYSTEMES HOMME-MACHINE	15
1 INTRODUCTION A LA ROBOTIQUE MOBILE TERRESTRE	15
1.1 <i>Téléopération et autonomie dans les systèmes robotiques terrestres</i>	15
1.2 <i>Problématique de la navigation autonome en milieux naturels</i>	17
2 ARCHITECTURES DE CONTROLE APPLIQUEES A LA ROBOTIQUE	18
2.1 <i>Comportements réactifs</i>	18
2.2 <i>Comportements délibératifs</i>	18
2.3 <i>Utilisation conjointe de comportements réactifs et délibératifs</i>	19
2.4 <i>Architectures de contrôle hybrides</i>	19
2.5 <i>Autres modèles d'architectures de contrôle</i>	21
3 LIMITES DE L'AUTOMATISATION ET SOLUTIONS	22
3.1 <i>Conséquences de l'automatisation</i>	22
3.2 <i>Automatisation centrée sur l'Homme</i>	23
4 CONCEPTION DES SYSTEMES HOMME-MACHINE	25
4.1 <i>Définition d'un Système Homme-machine</i>	25
4.2 <i>Modèles de l'opérateur humain</i>	26
4.2.1 <i>Modèle de l'opérateur humain pour la résolution de problèmes</i>	26
4.2.2 <i>Modèle basé sur la décomposition des tâches</i>	27
4.3 <i>Le contrôle dans les systèmes Homme-Machine</i>	27
4.3.1 <i>Analyse des risques dans les systèmes Homme-machine</i>	28
4.3.2 <i>Risque d'erreur humaine</i>	28
4.3.3 <i>Maintien et perte de contrôle</i>	29
4.3.4 <i>Modèles de contrôle cognitif</i>	30
4.3.5 <i>Les moyens de défense basés sur les barrières</i>	32
4.3.6 <i>Le modèle Bénéfice – Coût – Déficit</i>	33
5 LA RESILIENCE	34
5.1 <i>Définitions de la résilience</i>	34
5.1.1 <i>Etymologie</i>	34
5.1.2 <i>La résilience en science des matériaux</i>	34
5.1.3 <i>La résilience en psychologie</i>	34
5.1.4 <i>La résilience écologique</i>	34
5.1.5 <i>La résilience en informatique</i>	35
5.1.6 <i>La résilience en sûreté de fonctionnement</i>	35
5.1.7 <i>La résilience organisationnelle</i>	36
5.2 <i>Résilience, stabilité et robustesse</i>	37
5.3 <i>Propriétés des systèmes résilients</i>	42
5.4 <i>Mesures de la résilience</i>	44
5.4.1 <i>La résilience en science des matériaux</i>	44
5.4.2 <i>La résilience en informatique</i>	44
5.4.3 <i>La résilience en écologie</i>	45
6 CONCLUSION	46
CHAPITRE 2 : AUTONOMIE AJUSTABLE POUR LA RESILIENCE DES SYSTEMES HOMME-ROBOT	49
1 DEFINITION DE L'AUTONOMIE DES SYSTEMES AUTOMATISES	49
1.1 <i>Etymologie de l'autonomie</i>	49

SOMMAIRE

1.2	<i>Dimensions de l'autonomie</i>	49
1.3	<i>Autonomie dans les systèmes multi-agents</i>	50
1.4	<i>Autonomie et délégation</i>	51
1.5	<i>Automatisation, autonomie et intelligence</i>	51
1.6	<i>Définitions de l'autonomie pour les systèmes robotisés</i>	52
1.7	<i>L'autonomie dans les véhicules non habités</i>	53
1.8	<i>Discussion</i>	55
2	CLASSIFICATIONS DES NIVEAUX D'AUTONOMIE	56
2.1	<i>Niveaux d'automatisation des fonctions de traitement de l'information</i>	56
2.2	<i>Modes d'autonomie et robotique</i>	59
2.2.1	Modes d'autonomie et missions robotisées.....	59
2.2.2	Modes d'autonomie et modes d'interaction Homme-robot	59
3	L'AUTONOMIE AJUSTABLE	60
3.1	<i>Définition de l'autonomie ajustable</i>	60
3.2	<i>Applications de l'autonomie ajustable</i>	61
3.2.1	Autorisation de décision	61
3.2.2	Autonomie ajustable et fiabilité	62
3.2.3	Autonomie ajustable et autorisations	62
3.2.4	Autonomie ajustable et négligence de l'opérateur.....	63
3.3	<i>Discussion</i>	64
4	LA CONSCIENCE DE LA SITUATION ET DE L'INTERACTION HOMME-ROBOT	65
4.1	<i>Définition de la conscience de la situation</i>	65
4.2	<i>Conscience de la situation et interactions Homme-machine</i>	66
4.3	<i>L'interaction Homme-robot</i>	67
4.3.1	Définition de l'interaction Homme-robot.....	67
4.3.2	Conscience de l'interaction Homme-robot.....	68
4.3.3	Evaluation de l'interaction Homme-robot	68
5	COOPERATION HOMME-MACHINE ET CONTROLE COOPERATIF HOMME-ROBOT	69
5.1	<i>Définition de la coopération Homme-machine</i>	69
5.2	<i>Formes de coopération de Schmidt</i>	70
5.3	<i>Structures de coopération</i>	71
5.3.1	Coopération verticale.....	71
5.3.2	Coopération horizontale.....	71
5.3.3	Répartition dynamique des tâches	72
5.3.4	La délégation de fonctions.....	72
5.4	<i>L'espace de travail commun</i>	73
5.5	<i>Le contrôle coopératif Homme-robot</i>	74
5.5.1	Introduction	74
5.5.2	Définition du contrôle coopératif Homme-robot	75
6	CONCLUSION	76

CHAPITRE 3 : CONCEPTION D'UN SYSTEME COOPERATIF HOMME-ROBOT RESILIENT..... 79

1	PRESENTATION DU PROJET TAROT	79
1.1	<i>Contexte du projet</i>	79
1.2	<i>Problématique</i>	79
1.3	<i>Démarche technique</i>	80
1.4	<i>Définition des modes d'autonomie du robot dans le projet TAROT</i>	80
1.5	<i>Intégration de principes d'autonomie ajustable</i>	82
1.6	<i>Validation des modes d'autonomie</i>	83
2	PROBLEMATIQUE DE CONCEPTION DU CONTROLE COOPERATIF	83
2.1	<i>Architecture de contrôle d'un agent du système Homme-robot</i>	83
2.2	<i>Modèle de contrôle des niveaux d'activité d'un agent du système Homme-robot</i>	84
2.3	<i>Définition des étapes du modèle de traitement de l'information</i>	85
2.4	<i>Niveaux d'activité d'un agent et niveaux d'activité du système</i>	86
2.5	<i>Positionnement et intégration du contrôle coopératif</i>	88
3	FORMALISATION DES ASPECTS SEMANTIQUES DE L'AUTONOMIE	88
3.1	<i>Notations employées</i>	88
3.2	<i>Définition des notions d'actions et de tâches</i>	89
3.2.1	Définition de l'état du système.....	89
3.2.2	Définition d'une action	90
3.2.3	Définition d'une tâche primitive	91
3.2.4	Définition d'une tâche composée.....	92

SOMMAIRE

3.3	<i>Aspects sémantiques de l'autonomie</i>	92
3.3.1	Définition des compétences.....	93
3.3.2	Définition des capacités.....	93
3.3.3	Définition des prescriptions.....	94
3.3.4	Définition de l'autonomie à partir des aspects sémantiques.....	94
3.4	<i>Extension de la définition de l'autonomie</i>	94
4	DEFINITION DES CONDITIONS D'APPLICATION DE LA COOPERATION HOMME-ROBOT.....	96
4.1	<i>Conditions pour la coopération augmentative</i>	96
4.2	<i>Conditions pour la coopération intégrative</i>	97
4.3	<i>Conditions pour la coopération confrontative</i>	98
5	REALISATION D'UN BUT.....	99
5.1	<i>Mise en œuvre de la réalisation d'un but</i>	99
5.2	<i>Mise en œuvre d'une forme de coopération</i>	101
6	SELECTION D'UNE ALTERNATIVE DE REALISATION.....	101
6.1	<i>Définition des critères de résilience du système Homme-robot</i>	102
6.1.1	Détermination du critère d'efficacité.....	102
6.1.2	Détermination du critère d'adaptabilité.....	102
6.1.3	Détermination du critère de fonctionnement aux limites.....	102
6.1.4	Détermination du critère d'interactions.....	102
6.2	<i>Processus d'analyse hiérarchique des alternatives</i>	103
6.2.1	Décomposition du problème.....	103
6.2.2	Comparaisons binaires des critères.....	104
6.2.3	Calcul de l'importance des critères.....	105
6.2.4	Comparaison des alternatives.....	106
6.2.5	Classement des alternatives.....	106
7	DEFINITION D'UN PLAN D'ACTION.....	108
7.1	<i>Définition du problème de planification</i>	108
7.2	<i>Définition de l'algorithme de planification</i>	109
7.3	<i>Traitement de l'ensemble des alternatives</i>	112
8	CONCLUSION.....	113
CHAPITRE 4 : ETUDE EXPERIMENTALE DU CONTROLE COOPERATIF HOMME-ROBOT.....		115
1	PRESENTATION DE LA PLATE-FORME EXPERIMENTALE.....	115
1.1	<i>Définition du procédé simulé</i>	115
1.2	<i>Evaluation de la résilience</i>	116
1.3	<i>Définition des critères et des indicateurs mis en place</i>	116
2	REALISATION DE LA PLATE-FORME EXPERIMENTALE.....	118
3	REALISATION DE L'EXPERIMENTATION.....	120
3.1	<i>Formation initiale</i>	120
3.2	<i>La phase d'entraînement</i>	121
3.3	<i>La phase d'expérimentation</i>	121
3.3.1	Objectifs des expérimentations.....	121
3.3.2	Passations en modes d'autonomie TAROT.....	122
3.3.3	Passations en contrôle coopératif.....	123
3.3.4	Questionnaires.....	123
4	RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	123
4.1	<i>Evaluation du critère d'efficacité</i>	124
4.1.1	Indicateur de temps de mission.....	124
4.1.2	Indicateur de respect de contrainte temporelle.....	125
4.1.3	Indicateur de distance parcourue.....	125
4.1.4	Efficacité de la tâche d'observation.....	126
4.1.5	Evaluation subjective de la perception de l'efficacité.....	127
4.2	<i>Evaluation du critère d'adaptabilité</i>	128
4.2.1	Evaluation objective de l'adaptabilité.....	128
4.2.2	Evaluation subjective de la perception de l'adaptabilité.....	129
4.3	<i>Evaluation du critère de fonctionnement aux limites</i>	130
4.3.1	Evaluation du temps de résolution des perturbations.....	130
4.3.3	Evaluation subjective de la perception du fonctionnement aux limites.....	133
4.4	<i>Evaluation du critère d'interactions</i>	134
4.4.1	Evaluation du temps de réaction à une sollicitation du robot.....	134
4.4.2	Evaluation subjective du critère d'interactions.....	135
4.4.3	Pertinence des informations dans la gestion des perturbations.....	135
4.5	<i>Classement des critères de résilience</i>	136

SOMMAIRE

4.6	<i>Discussion</i>	137
5	CONCLUSION	138
CHAPITRE 5 : PERSPECTIVES		141
1	LES AFFORDANCES COMME SUPPORT DU CONTROLE COOPERATIF	141
1.1	<i>Définitions des affordances</i>	141
1.2	<i>Application des définitions formelles</i>	143
1.3	<i>Exploitation des affordances dans la réalisation d'un but</i>	145
2	AMELIORATION DE LA PROACTIVITE PAR L'APPRENTISSAGE DE LA MISE EN ŒUVRE ET DES CONSEQUENCES DES SOLUTIONS PROPOSEES	147
2.1	<i>Capitalisation de la mise en œuvre des solutions proposées</i>	148
2.2	<i>Certitude du plan d'action</i>	149
2.3	<i>Evaluation de la résilience des solutions mises en œuvre</i>	150
2.4	<i>Capitalisation de la mise en œuvre des formes de coopération Homme-machine</i>	151
2.4.1	Apprentissage et coopération augmentative.....	151
2.4.2	Apprentissage et coopération intégrative.....	151
2.4.3	Apprentissage et coopération confrontative.....	152
3	VERS UNE APPLICATION DE L'APPROCHE PROPOSEE AUX SYSTEMES DE SYSTEMES	152
3.1	<i>Définition des systèmes de systèmes</i>	152
3.2	<i>Emergence et résilience dans les systèmes de systèmes</i>	153
3.3	<i>Extension de l'approche proposée aux systèmes de systèmes</i>	155
4	CONCLUSION	156
CONCLUSION GENERALE		159
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		161

INDEX DES FIGURES

FIGURE 1. MODELE GENERIQUE D'ARCHITECTURE A 3 COUCHES.....	20
FIGURE 2. DETAIL D'UN NŒUD DE L'ARCHITECTURE 4D/RCS (D'APRES [ALBUS 2002]).....	21
FIGURE 3. ARCHITECTURE DE SYSTEME DE SUPERVISION HOMME-MACHINE (D'APRES [SHERIDAN 1992] COMPLETE PAR [MILLOT 1999]).....	25
FIGURE 4. MODELE DE RESOLUTION DE PROBLEME DE RASMUSSEN (REVISE PAR [HOC 1996]).	26
FIGURE 5. CLASSIFICATION DES ERREURS HUMAINES SELON REASON [1990].....	29
FIGURE 6. MODELE DE CONTROLE CYCLIQUE (D'APRES [HOLLNAGEL 1993]).	30
FIGURE 7. EXTENDED CONTROL MODEL (D'APRES [HOLLNAGEL 2002]).	31
FIGURE 8. DETERMINATION DU BENEFICE, DU COUT ET DU DEFICIT (D'APRES [POLET <i>ET AL.</i> 2004]).	33
FIGURE 9. RELATION ENTRE STABILITE ET RESILIENCE FACE A DIFFERENTS TYPES DE MENACES (D'APRES [LUNDBERG ET JOHANSSON 2007]).	38
FIGURE 10. COMPORTEMENT DE SYSTEMES RESISTANTS ET RESILIENS (D'APRES [FIKSEL 2003]).	39
FIGURE 11. LA RESILIENCE D'UN SYSTEME COMME SUCCESSION DE RESILIENCES (D'APRES [AMALBERTI 2006]).	40
FIGURE 12. RELATION ENTRE TYPES DE RESILIENCE ET DOMAINES DE STABILITE FACE A DIFFERENTS TYPES DE MENACES (D'APRES [MOREL 2007]).	41
FIGURE 13. ORGANISATION RESILIENTE (D'APRES [HOLLNAGEL 2006]).	43
FIGURE 14. MESURES DE LA PERSISTANCE, RESISTANCE ET RESILIENCE (ADAPTE DE [PEREZ-ESPAÑA ET ARREGUIN-SANCHEZ 2001]).	45
FIGURE 15. MESURES DE LA RESISTANCE ET DE LA RESILIENCE (ADAPTE DE [ORWIN ET WARDLE 2004]).	46
FIGURE 16. REPRESENTATION DU MODELE ALFUS (D'APRES [HUANG <i>ET AL.</i> 2004]).	54
FIGURE 17. NIVEAU D'AUTOMATISATION DES CATEGORIES DU MODELE DE TRAITEMENT DE L'INFORMATION D'UN OPERATEUR HUMAIN (D'APRES [PARASURAMAN <i>ET AL.</i> 2000]).	56
FIGURE 18. MODELE DE PRISE DE DECISION "OBSERVER, ORIENTER, DECIDER, AGIR" [BOYD 1996].....	58
FIGURE 19. EFFET DE LA NEGLIGENCE DE L'OPERATEUR (D'APRES [GOODRICH <i>ET AL.</i> 2001]).....	63
FIGURE 20. FORMES DE COOPERATION DE SCHMIDT (D'APRES [LEMOINE 1998]).....	71
FIGURE 21. STRUCTURE DE COOPERATION VERTICALE.	71
FIGURE 22. STRUCTURE DE COOPERATION HORIZONTALE.....	72
FIGURE 23. COOPERATION AU TRAVERS D'UN ESPACE DE TRAVAIL COMMUN (D'APRES [PACAU-LÉMOINE ET DEBERNARD 2002]).....	74
FIGURE 24. CONTROLE COOPERATIF (D'APRES [GOLDBERG ET CHEN 2001]).....	75
FIGURE 25. REPRESENTATION DES COMPORTEMENTS SENSORIMOTEURS ET DES MODES D'AUTONOMIE [TOSA/RMU – 2007, 063].	82
FIGURE 26. ARCHITECTURE DE CONTROLE D'UN AGENT DU SYSTEME COOPERATIF HOMME-ROBOT.	84
FIGURE 27. MODELE DE CONTROLE D'UN NIVEAU D'ACTIVITE D'UN AGENT (ADAPTE DE [RASMUSSEN 1983] ET [PARASURAMAN <i>ET AL.</i> 2000]).	85
FIGURE 28. RELATION ENTRE LES NIVEAUX D'ACTIVITE D'UN AGENT ET LES NIVEAUX D'ACTIVITE DU SYSTEME. ..	87
FIGURE 29. REPRESENTATION DE L'ACTIVITE GLOBALE DU CONTROLEUR DE MISSION.....	87
FIGURE 30. REPRESENTATION D'UNE TACHE PRIMITIVE.....	91
FIGURE 31. REPRESENTATION D'UNE TACHE COMPOSEE.....	92
FIGURE 32. ILLUSTRATION DE LA COOPERATION AUGMENTATIVE.	97
FIGURE 33. ILLUSTRATION DE LA COOPERATION INTEGRATIVE.....	98
FIGURE 34. ILLUSTRATION DE LA COOPERATION CONFRONTATIVE.	99
FIGURE 35. ALGORITHME DE DEROULEMENT D'UN BUT SOUS PLANIFICATION CONTINUE.....	100
FIGURE 36. EXEMPLE DE HIERARCHIE POUR UNE ANALYSE MULTICRITERE.....	103
FIGURE 37. PRINCIPES DE DECOMPOSITION DANS LA METHODE HTN.	109
FIGURE 38. ALGORITHME DE PLANIFICATION.	112
FIGURE 39. INTERFACE HOMME-MACHINE.....	119
FIGURE 40. INTERFACE POUR LA TACHE D'OBSERVATION.	119
FIGURE 41. EXEMPLE SIMPLIFIE DE FICHIER DE MISSION.	120
FIGURE 42. COMPARAISON DES TEMPS DES DEUX MISSIONS AVEC ET SANS CONTROLE COOPERATIF.	124
FIGURE 43. PROPORTION D'AMELIORATION ET DE DEGRADATION DU TEMPS DE MISSION PAR LE CONTROLE COOPERATIF.	125
FIGURE 44. COMPARAISON DES DISTANCES PARCOURUES POUR LES DEUX MISSIONS AVEC ET SANS CONTROLE COOPERATIF.	125
FIGURE 45. PROPORTION D'AMELIORATION ET DE DEGRADATION DE LA DISTANCE PARCOURUE PAR LE CONTROLE COOPERATIF.	126

INDEX DES FIGURES

FIGURE 46. EVALUATION SUBJECTIVE DE L'EFFICACITE SUR L'ENSEMBLE DES PASSATIONS.....	127
FIGURE 47. PROPORTION D'AMELIORATION ET DE DEGRADATION DE L'EVALUATION SUBJECTIVE DE L'EFFICACITE SUR L'ENSEMBLE DES PASSATIONS.....	128
FIGURE 48. COMPARAISON DE L'EVALUATION SUBJECTIVE DE L'ADAPTABILITE.	130
FIGURE 49. PROPORTION D'AMELIORATION ET DE DEGRADATION DE L'EVALUATION SUBJECTIVE DE L'ADAPTABILITE.	130
FIGURE 50. PROPORTION D'AMELIORATION ET DE DEGRADATION DU TEMPS DE RESOLUTION DES PERTURBATIONS PAR LE CONTROLE COOPERATIF.	133
FIGURE 51. VARIATION DE L'IMPORTANCE ACCORDEE AUX TACHES PAR LE CONTROLE COOPERATIF.	133
FIGURE 52. COMPARAISON DES TEMPS DE REACTION A LA SOLLICITATION DU ROBOT.....	134
FIGURE 53. PROPORTION D'AMELIORATION ET DE DEGRADATION DU TEMPS DE REACTION DANS LA GESTION D'UNE PERTURBATION.....	134
FIGURE 54. PROPORTION D'AMELIORATION ET DE DEGRADATION DE L'IMPLICATION DANS LA SURVEILLANCE DES TACHES EFFECTUEES PAR LE SYSTEME.	135
FIGURE 55. FOCUS ET NIMBUS (D' APRES [BENFORD ET FAHLEN 1993]).....	143
FIGURE 56. PERSPECTIVES POUR LA DEFINITION D'AFFORDANCES	143
FIGURE 57. INTEGRATION DE L'APPRENTISSAGE DANS L'APPROCHE PROPOSEE.	148
FIGURE 58. STRUCTURE DE LA FONCTION DE CERTITUDE.....	150
FIGURE 59. ARCHITECTURE DECENTRALISEE DU SYSTEME HOMME-ROBOT.....	156

INDEX DES TABLEAUX

TABLEAU 1. RECAPITULATIF DES CARACTERISTIQUES DES ARCHITECTURES DE CONTROLE ROBOTIQUES..... 24

TABLEAU 2. REPONSE DES SYSTEMES HOMME-MACHINE AUX LIMITATIONS DES ARCHITECTURES DE CONTROLE ROBOTIQUES. 32

TABLEAU 3. RECAPITULATIF DES CARACTERISTIQUES DES SYSTEMES STABLES, ROBUSTES ET RESILIENTS. 42

TABLEAU 4. APPORTS DE LA RESILIENCE A LA CONCEPTION DE SYSTEMES HOMME-MACHINE. 48

TABLEAU 5. RECAPITULATIF DES APPROCHES DE L'AUTONOMIE PAR RAPPORT AU CONCEPT DE RESILIENCE. 55

TABLEAU 6. NIVEAUX D'AUTOMATISATION POUR LES FONCTIONS D'ACQUISITION ET D'ANALYSE DE L'INFORMATION [SHERIDAN 1999]. 57

TABLEAU 7. NIVEAUX D'AUTOMATISATION POUR LES FONCTIONS DE DECISION ET D'ACTION [SHERIDAN 1992 ; INAGAKI *ET AL.* 1998]. 58

TABLEAU 8. RECAPITULATIF DES APPORTS DE L'AUTONOMIE AJUSTABLE A LA RESILIENCE D'UN SYSTEME HOMME-MACHINE. 64

TABLEAU 9. PARALLELE ENTRE CONSCIENCE DE LA SITUATION ET MODELE DE PARASURAMAN *ET AL.* [2000]. 66

TABLEAU 10. CONTRIBUTION DE L'AUTONOMIE AJUSTABLE ET DU CONTROLE COOPERATIF HOMME-ROBOT A LA RESILIENCE D'UN SYSTEME HOMME-MACHINE. 77

TABLEAU 11. REPARTITION DES CATEGORIES D'ACTIVITE ENTRE L'OPERATEUR HUMAIN (H) ET LE ROBOT (R) (D'APRES [TOSA/RMU-063 2007]). 81

TABLEAU 12. DEFINITION DES ETAPES DU MODELE DE TRAITEMENT DE L'INFORMATION. 86

TABLEAU 13. VALEURS QUALITATIVES DES COMPARAISONS ENTRE CRITERES. 104

TABLEAU 14. EXEMPLE DE COMPARAISONS DE CRITERES DEUX A DEUX. 104

TABLEAU 15. RESUME DES APPORTS DE LA CONTRIBUTION. 114

TABLEAU 16. INDICATEURS RELATIFS A L'EFFICACITE DU SYSTEME HOMME-MACHINE. 117

TABLEAU 17. INDICATEURS RELATIFS A L'ADAPTABILITE DU SYSTEME HOMME-MACHINE. 117

TABLEAU 18. INDICATEURS RELATIFS AU FONCTIONNEMENT AUX LIMITES DU SYSTEME HOMME-MACHINE. 118

TABLEAU 19. INDICATEURS RELATIFS AUX INTERACTIONS AU SEIN DU SYSTEME HOMME-MACHINE. 118

TABLEAU 20. LISTE DES PERTURBATIONS POSSIBLES DANS LA SIMULATION. 122

TABLEAU 21. MOYENNES ET ECARTS-TYPES POUR LES DEUX MISSIONS AVEC ET SANS CONTROLE COOPERATIF. 124

TABLEAU 22. MOYENNES ET ECARTS-TYPES DES DISTANCES PARCOURUES POUR LES DEUX MISSIONS AVEC ET SANS CONTROLE COOPERATIF. 126

TABLEAU 23. MOYENNES ET ECARTS-TYPES DU NOMBRE D'OBJETS DETECTES DANS LES DEUX MISSIONS. 126

TABLEAU 24. SOLUTIONS MISES EN OEUVRE DANS LES PASSATIONS AVEC CONTROLE COOPERATIF. 129

TABLEAU 25. TEMPS DE RESOLUTION DES PERTURBATIONS DANS LA PREMIERE MISSION. 131

TABLEAU 26. MOYENNES ET ECARTS-TYPES DES TEMPS DE RESOLUTION DES PERTURBATIONS DANS LA PREMIERE MISSION. 131

TABLEAU 27. TEMPS DE RESOLUTION DE LA PERTURBATION DANS LA SECONDE MISSION. 132

TABLEAU 28. MOYENNES ET ECARTS-TYPES DES TEMPS DE RESOLUTION DE LA PERTURBATION DANS LA SECONDE MISSION. 132

TABLEAU 29. MOYENNES ET ECARTS-TYPES DE LA COMPREHENSION DES SOLUTIONS PROPOSEES PAR LE CONTROLE COOPERATIF. 135

TABLEAU 30. CLASSEMENTS DE CRITERES OBTENUS PAR LES SUJETS ET NOMBRE D'OCCURRENCES DE CES CLASSEMENTS. 137

TABLEAU 31. DISTINCTION DES TYPES D'AFFORDANCES SELON LA PERCEPTION DE L'INFORMATION [GAVER 1991]. 145

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement, les robots sont de plus en plus présents dans la vie quotidienne, de façon plus ou moins discrète, depuis un appareil électroménager à un jouet doté de capacités d'apprentissage. Le robot est un concept qui a toujours fasciné l'imaginaire en faisant référence au mythe du Golem, créature créée par l'Homme et échappant à sa volonté. Personnage central de nombreux romans et films de science-fiction – on ne peut ici manquer de citer Isaac Asimov et son Cycle des Robots – le robot est souvent doté de facultés intellectuelles et physiques bien plus grandes que celle des Hommes. Ceci inspirera d'ailleurs Isaac Asimov pour une nouvelle montrant l'incrédulité d'un robot d'avoir été créé par une créature aussi inférieure à ses yeux que l'Homme.

La réalité actuelle est évidemment bien différente. Loin des robots humanoïdes, ceux sur lesquels nous porterons notre attention sont des robots mobiles terrestres dotés de capacités autonomes. La conception de systèmes robotiques autonomes est un domaine de recherche extrêmement actif, à la jonction de nombreuses disciplines et spécialités : automatique, informatique, mécanique, robotique, intelligence artificielle, sciences cognitives...

La Délégation Générale pour l'Armement (DGA) a mis en place un Programme d'Etudes Amont (PEA) dont l'objectif est de faire progresser l'autonomie décisionnelle des robots : le PEA TAROT (« Technologies essentielles d'Autonomie pour les Robots Terrestres »).

Le contexte dynamique, et souvent critique, du domaine de la robotique mobile terrestre entraîne la nécessité de concevoir un système dans lequel le niveau de performance sera maintenu à un niveau suffisant. L'objectif de l'étude n'est pas d'atteindre l'autonomie décisionnelle complète pour le robot, objectif qui paraît illusoire dans l'état actuel de la technologie. L'objectif de ce PEA est d'exploiter au mieux les capacités complémentaires de l'opérateur humain et du robot, ce qui se traduira pour le système par l'existence de plusieurs modes de contrôle.

Le domaine de la robotique mobile terrestre est confronté à deux problèmes essentiels. D'une part, les algorithmes autonomes ne sont pas suffisamment performants pour gérer toutes les situations possibles. De plus, le domaine d'application visé, à savoir le domaine militaire, nécessite la prise de décisions critiques qui doivent rester du ressort exclusif de l'opérateur humain. D'autre part, dans le contexte de la téléopération, l'expertise de l'opérateur humain, notamment dans des situations d'urgence (évitement d'obstacle proche, danger de collision...) ou difficiles (environnement réduit ou encombré aux faibles possibilités de manœuvre), n'est pas suffisante. De mauvaises conditions de téléopération (délai de réponse important, bande passante et débit limités...) sont également des facteurs limitant les possibilités d'action de l'opérateur humain. Le but de cette étude est alors de concevoir un système Homme – robot fondé sur des principes d'autonomie ajustable.

Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans la continuité du PEA TAROT. Plutôt que de concevoir un système sur la seule approche de la stabilité, dans lequel un niveau optimal de performance sera maintenu quelles que soient les perturbations, on cherchera à développer un système résilient.

Le plan que nous suivrons dans ce mémoire se décompose en cinq chapitres.

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à la problématique de la robotique mobile terrestre et aux apports des recherches dans les systèmes Homme-machine. Les limites des systèmes robotiques montrent l'importance d'intégrer l'opérateur humain dans la démarche de conception du système. L'intégration des composantes techniques et humaines contribue au maintien du contrôle dans le système et à la maîtrise des risques. Celle-ci peut être envisagée de façon proactive. La résilience contribue à cette approche de la maîtrise de risques. Dans le contexte des systèmes Homme-machine, l'application de la résilience se traduit par la proposition de critères objectifs évaluant le fonctionnement du système.

Le deuxième chapitre de ce mémoire porte sur les moyens de contrôle de la résilience dans le domaine de la robotique mobile terrestre. L'autonomie ajustable est un moyen d'assurer la résilience du système en fonction des conditions d'exécution tout en maintenant un niveau suffisant de performance. La coopération Homme-machine, illustrée par le contrôle coopératif Homme-robot, contribue également à la résilience du système par la répartition des tâches entre les agents constituants. Nous montrons dans ce chapitre la complémentarité de ces deux notions.

L'objet du troisième chapitre concerne la définition du modèle de contrôle coopératif Homme-robot. Dans un premier temps, nous rappelons les contributions apportées dans le cadre du projet TAROT et qui exploitent les principes d'autonomie ajustable. Nous proposons ensuite un formalisme qui permet d'exprimer les conditions nécessaires à la coopération Homme-machine. Celle-ci est mise en œuvre dans des plans d'actions définis en fonction de l'autonomie des agents du système. Ces plans d'actions sont ensuite sélectionnés selon une méthode de prise de décision multicritère qui exploite les critères de résilience proposés dans le premier chapitre.

Le quatrième chapitre propose une étude expérimentale de l'apport du contrôle coopératif Homme-robot dans le contrôle de la résilience du système. La plate-forme expérimentale que nous avons développée simule le déplacement d'un robot terrestre autonome dans un environnement naturel. Le déplacement est supervisé par un opérateur humain qui doit également effectuer une tâche d'observation. Deux types de passation sont proposées aux opérateurs : une passation selon les modes d'autonomie définis dans le cadre du projet TAROT et une passation selon le modèle de contrôle coopératif développé dans ces travaux. Les résultats de cette expérimentation sont ensuite présentés et commentés.

Nos travaux ouvrent de nombreuses perspectives que nous présentons dans le dernier chapitre. Nos perspectives concernent dans un premier temps la recherche d'une représentation commune des opportunités d'actions offertes par l'environnement. Cette représentation commune entre l'opérateur humain et le robot exploite la notion d'affordance. Dans un second temps, nous proposons d'étudier l'amélioration de la résilience par la capitalisation des solutions mises en œuvre pour la gestion des perturbations. Enfin, nous proposons d'appliquer nos travaux au domaine des systèmes de systèmes.

CHAPITRE 1 : PROBLEMATIQUE DE LA ROBOTIQUE MOBILE TERRESTRE : APPORTS DES RECHERCHES DANS LES SYSTEMES HOMME-MACHINE

La robotique mobile terrestre est un domaine en plein essor qui tend vers des missions toujours plus hétérogènes. Ce premier chapitre a pour objet de présenter les problématiques relatives à la conception des systèmes robotisés en adoptant le point de vue des systèmes Homme-machine. En effet, les systèmes actuels tendent à maintenir l'opérateur humain dans un rôle actif afin de répondre à la fois aux limites des systèmes téléopérés et celles des systèmes autonomes. Ce chapitre s'attachera donc à dresser un parallèle entre les approches classiques de conception des systèmes robotisés et les approches de conception centrées sur l'opérateur humain.

Une première partie détaille les principales approches pour la conception de systèmes robotisés en se focalisant sur les architectures de contrôle mettant en œuvre des comportements réactifs et/ou délibératifs. Les limites de ces différentes architectures sont exposées ainsi que les solutions pouvant être apportées. Ces solutions mettent en exergue la nécessité de recourir à une démarche de conception prenant en compte les problématiques inhérentes au domaine des systèmes Homme-machine qui font l'objet d'une deuxième partie.

L'opérateur humain est alors considéré comme un agent capable de combiner des comportements réactifs et délibératifs et de contribuer ainsi à la résilience du système Homme-robot. La résilience, objet de la troisième partie de ce chapitre, se traduit alors par une adaptabilité du système et des capacités d'émergence de nouvelles solutions en fonction non seulement du contexte mais également de l'expérience du système, au sens de l'ensemble opérateur humain et système technique.

1 Introduction à la robotique mobile terrestre

1.1 Téléopération et autonomie dans les systèmes robotiques terrestres

La présentation de systèmes robotiques nécessite de définir brièvement la notion d'autonomie. L'autonomie d'un robot peut être définie comme la capacité à résister à des perturbations externes en utilisant ses ressources internes [Dalgalarondo 2003]. L'autonomie dépend essentiellement de trois facteurs : les capacités du robot (morphologie, perception, décision, action...), les caractéristiques de l'environnement auquel le robot est confronté et les tâches à effectuer. La notion d'autonomie sera discutée en détail dans le second chapitre et complétée par les principes d'autonomie ajustable. Pour cette partie, nous considérons les systèmes autonomes comme répondant à la définition donnée ci-dessus.

Concernant l'environnement auquel est confronté le robot terrestre, trois catégories sont généralement distinguées :

- les robots d'exploration : ils sont destinés à des missions d'ordre scientifique comme l'étude des sols, des relevés géologiques ou des prélèvements d'échantillons,
- les engins non habités : ce sont en général des systèmes téléopérés équipés de capteurs autorisant des fonctionnalités autonomes,

- les engins d'intervention en milieu hostile : ils interviennent dans des milieux hostiles pour les opérateurs humains comme les centrales nucléaires, les terrains d'opérations militaires ou les décombres d'immeubles lors de catastrophes naturelles.

Ces exemples d'application sont des illustrations de systèmes robotiques terrestres que l'on peut sommairement classer en systèmes téléopérés d'une part et systèmes autonomes d'autre part.

La téléopération, notamment dans les applications militaires, permet d'éloigner les personnels d'un environnement dangereux et d'accroître ainsi leur sécurité. Cette solution est adoptée cependant au détriment des performances du système et entraîne une complexification lors de la phase de conception. De plus, ce type de contrôle est sujet à des problèmes de communication dus aux limitations de débit, de bande passante ou encore de délai de réponse. Ces limitations technologiques sont la cause principale de la baisse des performances du système Homme-robot. Les baisses des performances sont également accentuées par une mauvaise estimation des distances et de la profondeur sur la vidéo retransmise par le robot. L'importance du délai de réponse est notamment à considérer dans le domaine de l'exploration planétaire. En effet, le temps de réponse entre la Terre et Mars est d'environ 45 minutes [Goodrich *et al.* 2001]. Un tel délai rend la téléopération et la résolution de problèmes par l'opérateur humain difficile voire impossible. McGovern [1990] estime qu'une bande passante de l'ordre de 500kHz est la limite basse acceptable pour une téléopération efficace. En dessous de ce seuil, on constate une perte de confiance dans le système de la part de l'opérateur et un risque accru de perte de contrôle ou de collision.

L'une des premières réponses apportées aux limites des systèmes téléopérés est le contrôle supervisé [Sheridan 1992]. Dans ce mode, l'opérateur humain décompose une mission en une succession de tâches que le robot peut accomplir seul. Ce mode de contrôle d'un système robotique a été appliqué notamment pour les architectures de robots d'exploration planétaire afin de répondre aux temps de réponse excessifs.

Le mode de contrôle supervisé nécessite cependant une implication importante de l'opérateur humain. Un autre facteur doit alors être pris en compte : la charge de travail de l'opérateur humain. En effet, la téléopération nécessite une implication constante de l'opérateur humain afin de maintenir un niveau suffisant de performance [Goodrich *et al.* 2001]. De plus, les capacités d'anticipation des défaillances ou des perturbations de l'environnement dans un tel mode de contrôle sont limitées par le retour d'information fourni par le système robotique et par la capacité du système à modifier la séquence d'ordres fournie par l'opérateur humain.

L'implication de l'opérateur humain peut ne pas être garantie dans certaines situations où celui-ci est affecté à une autre tâche simultanément. Le robot mobile terrestre doit alors disposer d'un niveau suffisant d'autonomie, à la fois opérationnelle et décisionnelle afin de faire face à des situations imprévues. En situation normale, l'autonomie est un moyen d'améliorer la sécurité des équipements et des personnels humains. L'autonomie permet également d'économiser la ressource humaine dans des contextes où celle-ci est limitée et essentielle comme les futures missions d'exploration planétaire [Dorais *et al.* 1999]. L'autonomie apparaît comme un moyen de réduire le besoin de supervision du système et d'interaction de l'opérateur humain avec le système robotisé [Morfopoulos *et al.* 2004]. L'occurrence de défaillances ou de perturbations doit pouvoir être gérée par le système robotique en le dotant d'un modèle qui va lui permettre d'effectuer un diagnostic et de modifier son mode de contrôle en fonction de celui-ci [Dorais *et al.* 1999].

Les engins d'intervention en milieu hostile permettent de protéger les opérateurs humains lors d'interventions dans des centrales nucléaires ou de recherche de victimes lors de catastrophes naturelles. Cette dernière catégorie fait l'objet de recherches dans le domaine de l'interaction Homme-machine avec les travaux de Drury et Scholtz [Drury *et al.* 2003, Scholtz 2003]. Des compétitions sont organisées afin de comparer différents systèmes et différentes interfaces Homme-machine.

Les systèmes robotiques dits totalement autonomes requièrent toutefois l'intervention de l'opérateur humain essentiellement pour la définition du ou des buts à atteindre. Ces systèmes autonomes sont basés sur des architectures de contrôle constituées de trois niveaux [Connell, 1992 ; Gat, 1992].

Les travaux sur les robots autonomes s'intéressent à une autre catégorie de robots, les robots collectifs, comme dans le cas des robots footballeurs de la compétition RoboCup. Des travaux dans cette catégorie s'intéressent à la capacité des robots de s'auto-reconfigurer en cas de défaillances. Par exemple, ces défaillances peuvent être la perte d'une patte dans le cas de robots marcheurs. En se basant sur le modèle dont le robot dispose et sur les résultats de ses actions, le robot est capable d'adapter son déplacement en mettant constamment son modèle à jour [Bongard *et al.* 2006]. Les travaux sur ces robots autonomes collectifs s'inspirent des systèmes multi-agents et se focalisent sur les équipes de robots coopératifs avec par exemple le projet SMART-BOT [Mondada *et al.* 2005]. De tels projets illustrent l'intérêt d'une coopération entre agents aux capacités limitées. Les robots de ce dernier projet sont en effet capables de franchir des obstacles ou de déplacer de lourdes charges en s'assemblant de façon appropriée.

L'assistance aux personnes handicapées et aux personnes âgées est un domaine dans lequel les robots sont également utilisés afin de compenser la perte de facultés physiques [Nait-Chabane *et al.* 2009]. De tels robots doivent être capables de communiquer. Des projets s'attachent ainsi à développer des robots dits sociables tel un robot capable de s'inscrire à une conférence ou de trouver son chemin dans la foule, voire de demander son chemin s'il est perdu [Perzanowski *et al.* 2002].

Les différents systèmes présentés dans cette section sont utilisés pour des tâches de déplacement, d'observation ou de surveillance. Ces tâches présentent des particularités spécifiques dans le cadre de la navigation en milieu naturel.

1.2 Problématique de la navigation autonome en milieux naturels

La navigation d'un robot mobile terrestre en environnement naturel est un problème difficile du fait de la diversité des situations pouvant être rencontrées et du manque de connaissances précises sur la nature du terrain d'opérations. Une telle tâche est effectuée essentiellement via un schéma "perception – décision – action" mettant en œuvre des comportements, un comportement étant ce qui relie un stimulus à une réponse [Dalgalarondo 2003]. Le manque de connaissances sur le terrain concerne le type de sol parcouru par le robot (terre sèche, verglas, boue...), la localisation et la nature des obstacles.

Les problèmes de localisation concernent également le robot lui-même. En effet, les systèmes de localisation par satellite ou GPS (Global Positioning System) montrent des limites parfois infranchissables : non disponible dans certains contextes (zones non couvertes, brouillage...), coûteux et sujet à des imprécisions de localisation se cumulant au cours du déplacement du

robot. D'autres approches utilisent des algorithmes d'asservissement perceptuel afin de réduire les imprécisions de la localisation par GPS. Ces approches nécessitent le développement d'algorithmes spécifiques permettant le suivi de références verticales (lisières de forêts, murs, haies...), d'objets remarquables dans l'environnement ou amers (arbres, châteaux d'eau, pylônes...) ou d'objets mobiles (véhicules, sujets humains).

Enfin, la conception de systèmes autonomes soulève la question de la législation et des responsabilités juridiques dans les domaines où la prise de décision revêt un caractère critique et ne peut donc être allouée totalement à un système automatisé. En effet, l'opérateur humain doit pouvoir intervenir à tout moment dans le procédé et en reprendre le contrôle. De même, certaines actions et initiatives doivent rester exclusivement du fait de l'opérateur humain, particulièrement dans le domaine de la Défense et des applications militaires.

Plusieurs architectures de contrôle existent pour modéliser le fonctionnement et le comportement d'un robot. Ces architectures sont généralement basées sur une utilisation de comportements réactifs ou de comportements délibératifs. Nous présentons maintenant ces deux notions et détaillons ensuite plusieurs architectures de contrôle utilisant conjointement des comportements réactifs et délibératifs.

2 Architectures de contrôle appliquées à la robotique

2.1 Comportements réactifs

Les comportements réactifs utilisent des données locales et dynamiques. Ils associent une action à une perception sans utiliser de connaissances et sans en garder de trace. Il s'agit d'une boucle du type "perception – action", c'est-à-dire une réponse directe à un événement perçu [Dalgalarondo 2003]. Un exemple de comportement de ce type est l'évitement d'un obstacle dans le cas où l'opérateur ou le robot modifie localement la trajectoire suite à la détection de l'obstacle.

2.2 Comportements délibératifs

Les comportements délibératifs sont basés sur des connaissances de l'environnement plus globales et statiques. Ce type de comportement manipule des connaissances et peut éventuellement les mémoriser. On a ici une boucle "perception – décision – action" [Dalgalarondo 2003]. Un exemple de comportement de ce type est la construction d'une carte associée à l'environnement. Les effets d'un comportement délibératif sont visibles à plus long terme que ceux d'un comportement réactif.

Un même comportement sensorimoteur peut être considéré à la fois comme un comportement réactif et comme un comportement délibératif, selon le contexte de son utilisation. Par exemple, la détection et l'évitement d'obstacles peuvent être considérés comme on l'a vu comme un comportement réactif si le robot adapte sa trajectoire pour éviter l'obstacle. On peut également considérer ce comportement sensorimoteur comme un comportement délibératif s'il contribue à élaborer la trajectoire du robot afin de manœuvrer dans un terrain dangereux. Ce comportement sensorimoteur est alors soit une fonction d'aide à la mobilité soit une fonction de création de la mobilité.

2.3 Utilisation conjointe de comportements réactifs et délibératifs

A un faible niveau d'autonomie, le robot doit rester cantonné à des comportements réactifs, lui permettant notamment d'assurer sa propre sécurité (*safeguarded teleoperation*). Plus le niveau d'autonomie sera élevé, plus le robot aura la capacité d'accomplir des actions visant à la réalisation du but fixé, c'est-à-dire de gérer des comportements délibératifs.

L'une des questions consiste à savoir comment est gérée la transition entre un comportement réactif et un comportement délibératif et la re-planification d'un plan d'action décidée par un comportement délibératif. On peut estimer que l'utilisation de comportements délibératifs par le robot n'est possible qu'à un haut niveau d'autonomie. Cela nous permet de dire qu'une architecture de contrôle hybride peut être gérée par un mécanisme d'autonomie ajustable.

Pour faire suite à cette question et en ce qui concerne l'étude de la transition entre comportements et des combinaisons de comportements, on peut s'attacher aux conflits résultant de l'activation simultanée de comportements réactifs et délibératifs. Il s'agit ensuite de définir la priorité entre un comportement réactif et un comportement délibératif, à savoir si celle-ci est figée ou est susceptible d'évoluer dans le temps en fonction de la situation. Dans le cas d'une situation d'urgence compromettante pour la sécurité du robot, on peut penser que le comportement réactif prendra le pas, cette idée rejoint la vision des comportements réactifs et délibératifs de Simmons [1994], que l'on détaille par la suite. Cependant, un comportement délibératif peut avoir la priorité dans le cas d'un but prioritaire malgré une probabilité élevée d'occurrence d'une situation dangereuse.

Les architectures de contrôle utilisant à la fois des comportements réactifs et délibératifs sont majoritaires dans le cadre des recherches actuelles. En effet, des approches purement réactives ou purement délibératives ne permettent pas une bonne adaptation à différentes situations (situations d'urgence nécessitant une réaction immédiate ou événements nécessitant une modification du plan d'action à long terme). Les architectures de contrôle utilisant à la fois des comportements réactifs et des comportements délibératifs sont regroupées sous le terme d'architectures de contrôle hybrides.

2.4 Architectures de contrôle hybrides

Deux architectures de contrôle très semblables sont représentatives de cette approche et sont basées sur trois niveaux d'activité : l'architecture SSS (Servo – Subsumption – Symbolic) [Connell 1992] et l'architecture ATLANTIS, un acronyme pour "A Three-Layer Architecture for Navigating Through Intricate Situations" [Gat 1992]. La Figure 1 présente le modèle générique d'une telle architecture. Les niveaux de cette architecture de contrôle sont les suivants : délibératif, séquenceur et opérationnel.

L'architecture SSS est une architecture dont les trois niveaux se distinguent essentiellement par un passage d'une perception continue pour le niveau contrôleur à une perception discrétisée dans le temps pour les niveaux supérieurs.

L'architecture ATLANTIS est basée également sur trois niveaux. Le niveau opérationnel est en charge de la mise en œuvre des actions décidées aux niveaux supérieurs et implique des comportements réactifs. Le niveau séquenceur gère l'ensemble des comportements sensorimoteurs. Il gère à la fois les séquences d'actions primitives, réalisables de façon automatique par le niveau opérationnel, et l'activation du niveau délibératif. Ce modèle a donc

l'avantage de pouvoir fonctionner sans le niveau délibératif qui gère les tâches de planification, très exigeantes en termes de ressources. Ce niveau délibératif implique des comportements délibératifs.

La différence la plus notable entre ces deux architectures concerne l'intégration du niveau délibératif dans la boucle de contrôle pour l'architecture SSS contrairement à l'architecture ATLANTIS pour laquelle ce niveau est intégré dans la boucle par le niveau séquenceur uniquement si nécessaire.

L'avantage pour l'architecture ATLANTIS est de disposer d'un système bénéficiant de temps de réponse rapides et d'utiliser les ressources de calcul uniquement si nécessaire. L'inconvénient est que la replanification du plan d'action peut être moins efficace que pour l'architecture SSS. Un compromis est donc à trouver entre la fréquence d'actualisation de la perception et le temps de calcul induit.

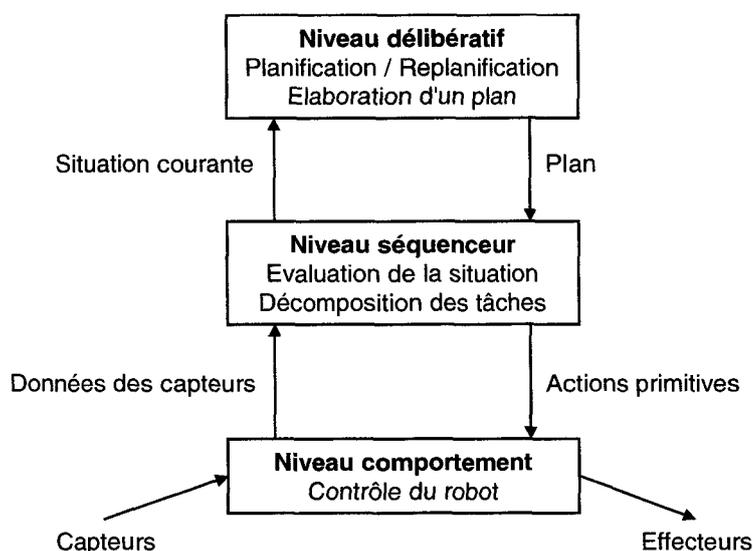


Figure 1. Modèle générique d'architecture à 3 couches.

Enfin, on peut évoquer d'autres architectures de contrôle comme 3T (3-Tiers) [Kortenkamp *et al.* 1998], qui reprend les niveaux d'activité décrits ci-dessus ou CLARAty (Coupled Layer Architecture for Robotic Autonomy) [Volpe 2001]. Celle-ci exploite toujours le modèle en trois couches : opérationnel, séquenceur, délibératif mais tend à rassembler les niveaux délibératif et séquenceur en un seul niveau. Le fait d'intégrer des capacités de planification et de décision dans le niveau séquenceur rend moins évidente l'interprétation en termes de niveaux d'autonomie et notamment d'autonomie décisionnelle accordée au robot.

La section suivante présente d'autres architectures organisées en plusieurs niveaux de décomposition des tâches (*Task Control Architecture*) ou selon une approche modulaire (*4D/RCS*). Ces architectures de contrôle n'appliquent pas le modèle en trois couches illustré à la Figure 1 mais se décomposent en plusieurs niveaux de décomposition des objectifs à atteindre.

2.5 Autres modèles d'architectures de contrôle

Simmons [1994] propose une architecture de contrôle, le contrôle structuré, mettant également en place des comportements délibératifs et des comportements réactifs. A la différence des architectures précédentes, celle-ci n'est pas décomposée selon les trois niveaux d'activité (délibératif, séquenceur et opérationnel) représentés à la Figure 1. Les comportements délibératifs gèrent les dépendances entre les sous-tâches et les comportements réactifs détectent et proposent une réponse appropriée aux modifications de leur environnement. Les comportements délibératifs gèrent essentiellement les situations nominales et sont complétés par des comportements réactifs qui servent à gérer les situations imprévues. L'architecture de contrôle TCA (*Task Control Architecture*) consiste à utiliser une approche délibérative pour décomposer la tâche à accomplir en sous-problèmes, sous la forme d'un arbre, et ensuite contrôler les interactions entre ces sous-problèmes par un ensemble de contraintes, notamment temporelles ou de précédence. L'approche réactive se situe au niveau des feuilles de l'arbre constitué, chaque feuille correspondant à une action.

Albus [2002] présente une architecture de contrôle hybride, utilisant donc des comportements réactifs et délibératifs mais étendue sur plus de trois niveaux, contrairement aux architectures de contrôle détaillées dans la section précédente. Cette architecture de contrôle est organisée en une hiérarchie de plusieurs niveaux, allant de niveaux réactifs (capacité de réponses rapides) à des niveaux délibératifs (capacité de planification à long terme). Cette architecture, 4D/RCS, tire son nom du regroupement de deux approches précédentes, 4D, ainsi nommée pour l'utilisation de modèles spatiotemporels, et RCS, pour Real-Time Combat Systems (Figure 2).

Chaque niveau de cette architecture est composé d'un module de traitement perceptif gérant les données utilisées au niveau considéré, d'un module de modélisation de l'environnement à partir des données perçues. Ce module est couplé à une base de connaissances. Ensuite, un module de jugement évalue les actions et les plans en termes de coûts, de risques et de bénéfices afin de permettre au module de génération de comportements de planifier et de contrôler l'exécution des actions.

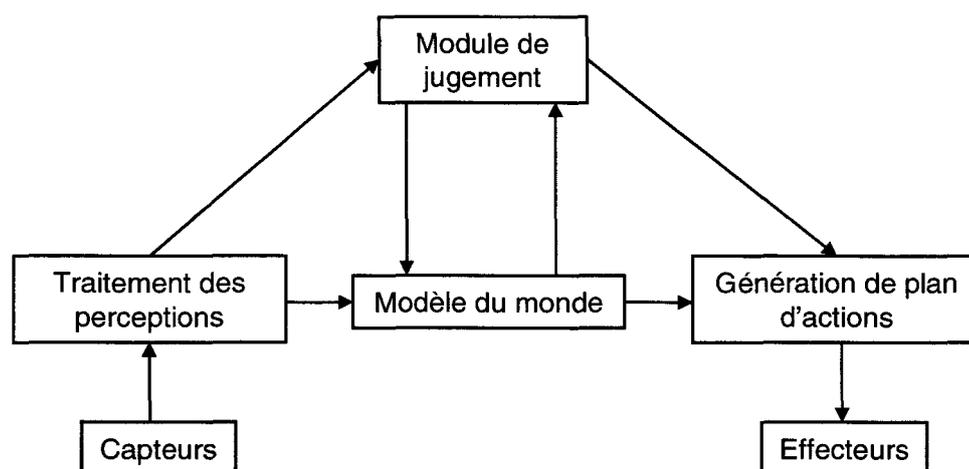


Figure 2. Détail d'un nœud de l'architecture 4D/RCS (d'après [Albus 2002]).

L'architecture DAMN (Distributed Architecture for Mobile Navigation) est une architecture de contrôle utilisant essentiellement des comportements réactifs. Elle est basée sur une sélection de comportements par un mécanisme de vote opéré par différents arbitres

[Rosenblatt 1997]. L'arbitrage entre les différents comportements s'effectue selon les alternatives suivantes :

- Arbitrage par contraintes : sélection de la valeur minimale retournée par les comportements de façon à satisfaire toutes les contraintes.
- Arbitrage sur l'espace de commande : chaque comportement vote pour les différentes alternatives dans l'espace de commande. Un vote de valeur positive est en faveur de l'alternative et en défaveur dans le cas contraire. Plus le comportement a une priorité élevée, plus la pondération associée à ce comportement est importante.
- Arbitrage sur l'espace abstrait d'actions : chaque comportement vote pour l'effet désiré du mécanisme. Le problème de ce type d'arbitrage dans un contexte dynamique est dû à la validité des votes dans le temps.
- Arbitrage par fusion basée sur l'utilité : détermine les états du monde atteignables. L'utilité attendue pour une action est calculée par l'expression suivante :

$$U(a) = \sum_c U(c).P(c|a,e)$$

avec c : conséquence possible d'une action,

$U(c)$: utilité associée à une conséquence possible de l'action a ,

$P(c | a, e)$: probabilité que la conséquence c se produise sachant que l'on a observé e et que l'on a accompli a .

Ces architectures présentent des propriétés exploitables dans la suite de ce mémoire. La structure hiérarchique de l'architecture TCA permet de mettre en œuvre une planification de type hiérarchique afin de décomposer le but à réaliser en sous-buts réalisables par les différents agents. Les risques, les coûts et les bénéfices associés aux différentes décompositions possibles peuvent être intégrés dans le processus de prise de décision et de sélection d'une alternative comme le montre l'architecture 4D/RCS. L'architecture DAMN propose un arbitrage des comportements selon un mécanisme de confrontation des différentes interprétations possibles du problème.

Comme on peut le voir, l'automatisation est une réponse possible aux problèmes rencontrés par les systèmes téléopérés. Cependant, l'intégration de l'automatisation à tous les niveaux de l'architecture de contrôle du robot, c'est-à-dire dans les boucles de contrôle et de supervision, remet en question la place de l'opérateur humain. En effet, les conséquences de l'automatisation pour les performances des opérateurs humains sont l'une des limites des systèmes automatisés au-delà des simples aspects de faisabilité technologique.

3 Limites de l'automatisation et solutions

3.1 Conséquences de l'automatisation

L'approche classique de l'allocation des tâches entre l'opérateur humain et le système automatisé est réalisée selon trois critères :

- les tâches sont allouées à l'agent le plus compétent,
- toutes les tâches pouvant être automatisées sont allouées au système automatisé et l'opérateur humain est en charge des tâches qu'il est impossible d'automatiser pour des raisons technologiques,
- toutes les tâches pouvant être automatisées sont allouées au système automatisé et l'opérateur humain est en charge des tâches qu'il est impossible d'automatiser pour des raisons économiques.

Ces stratégies d'allocation statique ne prennent pas en compte la réalité du contexte et son évolution. De plus, les stratégies liées aux raisons technologiques et économiques sont vécues comme des stratégies par défaut pour les opérateurs humains et sont susceptibles de dégrader l'implication de l'opérateur humain dans l'activité. Les lacunes de ces stratégies sont également mises en lumière par Bainbridge [1983] qui parle d'ironies de l'automatisation ou encore par Sarter *et al.* [1997] qui évoquent les surprises liées à l'automatisation.

Ironies et surprises sont le plus souvent la conséquence d'une automatisation maladroite résultant en une charge de travail des opérateurs humains qui, si elle n'est pas augmentée, est au moins redistribuée vers d'autres types de tâches. Les problèmes évoqués par ces auteurs sont par exemple le degré de confiance de l'opérateur humain vis-à-vis du système qui se traduit par une perte de confiance ou au contraire un excès de confiance dans le système. L'automatisation du système crée des besoins attentionnels différents pour lesquels la conscience de la situation peut être insuffisante.

La section précédente a présenté des architectures de contrôle automatisant les différents niveaux d'activité d'un système robotique. Cependant, des interrogations se posent quant au niveau d'automatisation approprié pour chacun de ces niveaux d'activité (délibératif, séquenceur et opérationnel). Parasuraman *et al.* [2000] recommandent que le niveau d'automatisation du système soit le plus haut possible mais ne dépasse pas un seuil fixé *a priori*. Les auteurs retiennent également l'idée qu'un niveau acceptable de performance puisse correspondre à un niveau minimal d'automatisation. Cette idée est reprise par Norman [1990] pour qui les problèmes liés à l'automatisation ne proviennent pas d'un excès d'automatisation mais d'un manque d'interaction et de retour d'information.

Différents critères permettent d'évaluer les conséquences de l'automatisation pour l'opérateur humain [Parasuraman *et al.* 2000] :

- la charge de travail mentale,
- la conscience de la situation (*situation awareness*),
- l'auto-satisfaction,
- la perte de compétences,
- la fiabilité de l'automatisation,
- le coût d'une décision,
- les conséquences des actions.

3.2 Automatisation centrée sur l'Homme

La section précédente a montré que les approches classiques d'automatisation sont souvent mal acceptées par les opérateurs humains. Des systèmes Homme-machine dont la conception est centrée sur l'homme doivent prendre en compte les règles suivantes [Sheridan 2000] :

- allouer les tâches à l'opérateur humain ou au système automatisé en fonction de leurs capacités à les réaliser,
- faire de l'opérateur humain le superviseur du système automatisé,
- garder l'opérateur humain dans la boucle de contrôle et de décision,
- maintenir la responsabilité finale de l'opérateur humain sur le système automatisé,
- rendre les tâches de l'opérateur humain plus faciles et plus attractives en exploitant les possibilités de l'automatisation,
- donner à l'opérateur humain une plus grande latitude sur le fonctionnement du système automatisé par la flexibilité de l'interface et du système,

CHAPITRE 1 : PROBLEMATIQUE DE LA ROBOTIQUE MOBILE TERRESTRE : APPORTS DES SYSTEMES HOMME-MACHINE

- prendre en compte la confiance de l'opérateur humain vis-à-vis du système automatisé,
- donner à l'opérateur humain toutes les informations qu'il pourrait solliciter,
- concevoir le système automatisé de façon à minimiser l'erreur humaine et la variabilité des réponses,
- trouver le meilleur compromis entre le contrôle manuel et le contrôle automatisé de façon à optimiser la réalisation des objectifs.

Cette section a présenté les limites de l'automatisation telle qu'elle peut être abordée dans la conception de systèmes robotiques. Les systèmes téléopérés comme les systèmes totalement autonomes présentent des limitations du point de vue opérationnel ou décisionnel. Les architectures présentées décomposent l'activité du système robotique en différents niveaux. Dans le cas des architectures de contrôle robotiques dont les caractéristiques et les limitations sont reprises dans le Tableau 1, une solution classique consiste à affecter l'opérateur humain au niveau délibératif de l'architecture, laissant à cet opérateur une tâche de supervision. Si cette solution est en partie valable pour résoudre les problèmes de décisions complexes, elle ne peut résoudre tous les problèmes, qu'ils soient d'origine technique ou humaine. Le recours à une automatisation centrée sur l'homme revient à adopter une démarche de conception d'un système Homme-machine visant à améliorer les performances et la fiabilité globale du système.

Architectures de contrôle robotiques	
Caractéristiques	
Modèle de conception	Modèle en 3 niveaux d'activité : architectures de contrôle hybrides [Connell 1992 ; Gat 1992]. Architectures hiérarchiques [Simmons 1994 ; Rosenblatt 1997].
Niveaux d'activité représentés	Activités de réalisation de tâches, de prise de décision et de planification.
Limitations	
Limitations technologiques	Impossibilité de fournir une réponse algorithmique à toutes les situations possibles.
Prise en compte du niveau délibératif	Opérateur humain uniquement en charge du niveau délibératif. Manque de conscience de la situation pour une gestion efficace du niveau délibératif. Architecture figée aux possibilités d'adaptation limitées.
Prise en compte de l'opérateur humain	Prise en compte de l'opérateur humain insuffisante. Prise en compte de l'opérateur humain uniquement dans le cadre de l'interaction avec le système automatisé comme deux entités distinctes et non dans le cadre d'une conception d'un système global [Hollnagel & Woods 1999].

Tableau 1. Récapitulatif des caractéristiques des architectures de contrôle robotiques.

4 Conception des Systèmes Homme-machine

4.1 Définition d'un Système Homme-machine

Sperandio [1988] définit un système Homme-machine comme une organisation d'Hommes et de systèmes techniques reliés entre eux par des moyens de communication et interagissant en vue d'atteindre un but commun en fonction des contraintes de l'environnement.

Sheridan [1992] propose une architecture de supervision pour les systèmes Homme-machine. Millot [1999] complète ce modèle en y ajoutant les niveaux d'abstraction et la nature des informations traitées (Figure 3). Ces informations sont échangées entre la composante technique et la composante humaine du système. Ces informations doivent être formalisées de façon à réduire leur temps de traitement par chacune des composantes du système. Elles doivent prendre en compte la situation courante et renseigner sur les possibilités d'actions réalisables par le système.

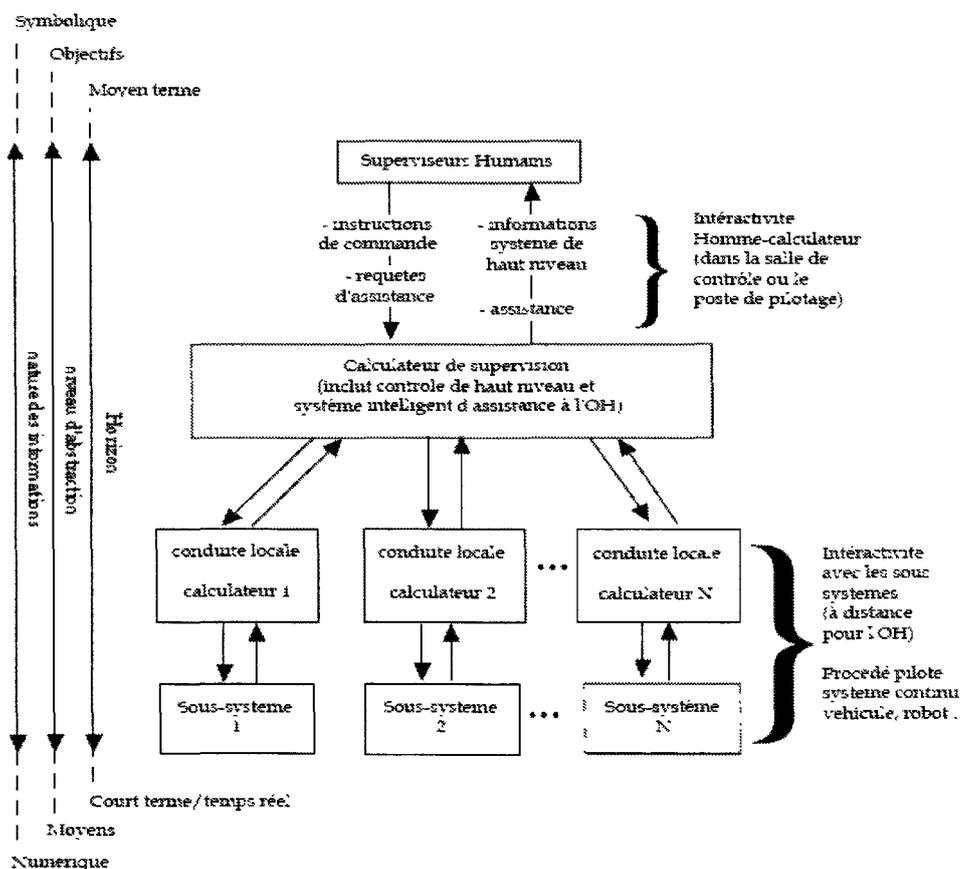


Figure 3. Architecture de système de supervision Homme-machine (d'après [Sheridan 1992] complété par [Millot 1999]).

Les architectures de contrôle robotiques précédemment présentées ont permis d'aborder les problématiques relatives à la conception de la composante technique du système socio-technique. Afin d'intégrer dans la conception la composante humaine il est primordial de se baser sur un modèle de l'opérateur humain. Différents modèles ont été proposés.

4.2 Modèles de l'opérateur humain

4.2.1 Modèle de l'opérateur humain pour la résolution de problèmes

Rasmussen [1983] définit trois types de comportements chez l'opérateur humain :

- Le comportement basé sur les habiletés (skill-based behaviour) correspond à des actions effectuées de façon automatique par l'opérateur humain et répondant à des signaux. Ces signaux sont directement assimilés, sans interprétation.
- Le comportement basé sur les règles (rule-based behaviour) correspond au comportement adopté lorsque l'opérateur est confronté à des actions qu'il connaît. Les informations perçues sont ici interprétées afin d'identifier l'état du système. Comme il s'agit d'une situation déjà rencontrée, le lien entre la tâche et les actions à exécuter est basé sur des procédures prédéfinies.
- Le comportement basé sur les connaissances (knowledge-based behaviour) est adopté quand la situation identifiée ne correspond à aucune situation déjà rencontrée. L'opérateur humain doit alors définir la tâche et les actions à exécuter. Ces définitions reposent sur les connaissances de l'opérateur.

La Figure 4 présente le modèle de résolution de problème de Rasmussen révisé par Hoc [1996].

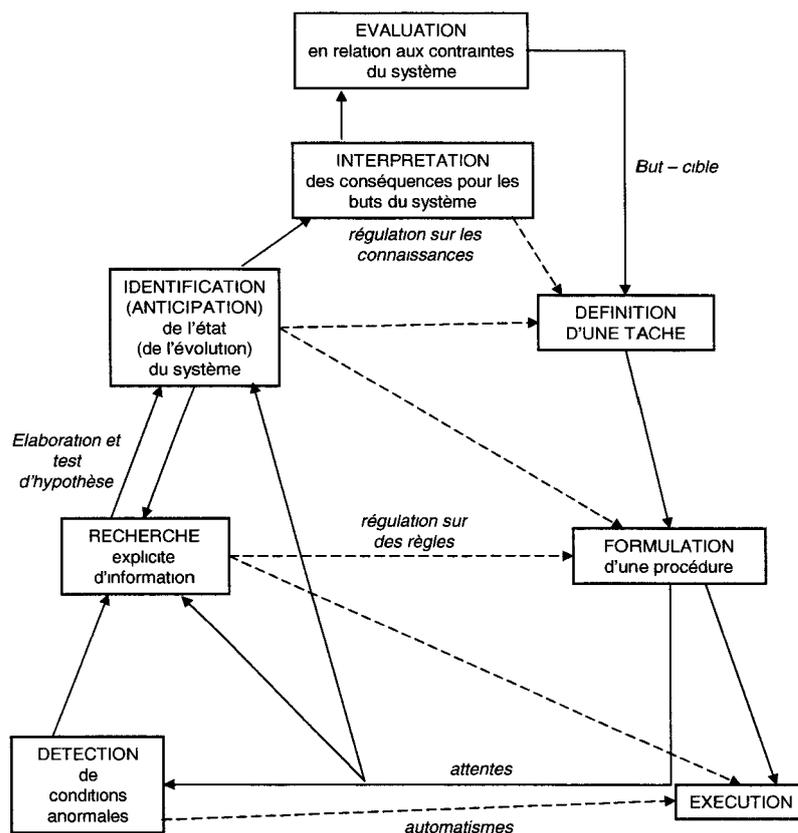


Figure 4. Modèle de résolution de problème de Rasmussen (révisé par [Hoc 1996]).

Ce modèle de l'opérateur humain est à mettre en parallèle avec les architectures de contrôle hybrides (cf. section 2.4) conçues selon les niveaux délibératif, séquenceur et comportement [Connell, 1992 ; Gat, 1992]. Le niveau basé sur les automatismes correspond en effet à un cycle « perception-action » que l'on retrouve au niveau comportement des architectures hybrides alors que le niveau basé sur les connaissances correspond au niveau délibératif d'une

architecture hybride. Le modèle de Rasmussen est également à l'origine d'autres modèles décrivant l'activité de l'opérateur humain. Ces modèles se basent essentiellement sur une décomposition des tâches accomplies par cet opérateur.

4.2.2 Modèle basé sur la décomposition des tâches

Ce type de modèle de l'activité est fondé sur un raffinement successif des buts à atteindre de façon à aboutir à des actions primitives. Le modèle de Michon [1985] décompose l'activité de conduite automobile selon trois niveaux de traitement :

- le niveau stratégique : il est relatif à l'activité de planification de l'itinéraire et correspond plus généralement à la définition des buts et à l'élaboration du plan d'action,
- le niveau tactique : il correspond à la décomposition en actions des tâches planifiées au niveau stratégique,
- le niveau opérationnel : il correspond à l'exécution des actions décidées au niveau tactique.

On retrouve également ces trois niveaux de traitement dans les schémas classiques des architectures de contrôle hybrides (cf. section 2.4). Des parallèles peuvent être établis entre ces architectures de contrôle robotiques et les modèles de l'opérateur humain. Le parallèle le plus évident, qui est une conséquence du parallèle pouvant être fait avec le modèle de Rasmussen, concerne les architectures de contrôle hybrides à trois niveaux et le modèle basé sur la décomposition des tâches [Michon 1985].

L'enjeu de la conception des systèmes Homme-machine est de fournir à l'opérateur des moyens de contrôle de l'activité en lui permettant de maintenir le contrôle du système Homme-machine.

4.3 Le contrôle dans les systèmes Homme-Machine

La notion de contrôle est dépendante de la gestion des risques liés à l'activité. Dans l'activité du système Homme-machine, l'opérateur humain peut être confronté à des risques pour lesquels il faut distinguer le risque externe du risque interne [Amalberti 1996]. Le risque externe est extérieur à l'opérateur et englobe les accidents et les pannes. Le risque interne est un risque interne subjectif dans lequel on peut distinguer :

- le risque de ne pas disposer des savoir-faire nécessaires à la réalisation des objectifs,
- le risque de ne pas avoir une gestion efficace des ressources nécessaires à la réalisation de l'action.

L'analyse de ce risque interne est critique dans le cas de situations dégradées dans lesquelles l'opérateur est susceptible de devoir reprendre le contrôle manuellement. Le risque peut être présent aux différentes étapes du modèle proposé par Rasmussen. Polet [2002] identifie cinq catégories d'activités (acquisition d'informations, diagnostic-pronostic, élaboration de buts, recherche de plan, suivi de l'action). Des risques sont associés à ces différents groupes de processus : un risque d'erreur de perception, un risque d'erreur de diagnostic, un risque d'erreur décisionnelle et un risque lié au procédé. La gestion de ces risques, qu'ils soient liés à des éléments techniques ou humains, est un élément crucial de la conception des systèmes Homme-machine.

4.3.1 Analyse des risques dans les systèmes Homme-machine

Une entité est dite "sûre de fonctionnement" si elle a l'aptitude à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données [Villemeur 1988]. Différents événements peuvent compromettre le bon fonctionnement du système [Laprie *et al.* 1995] :

- les défaillances : elles correspondent à une déviation du service délivré par rapport au service attendu,
- les erreurs : elles sont la partie de l'état du système susceptible d'entraîner une défaillance,
- les fautes : elles sont les causes d'une erreur.

Les erreurs, d'origine humaine ou technique, sont donc susceptibles de générer des défaillances pouvant affecter le fonctionnement du système et la confiance que l'on peut avoir dans ce fonctionnement. La sûreté de fonctionnement a pour but d'évaluer cette confiance au travers de différents aspects dépendants et complémentaires parmi lesquels on peut citer [Villemeur 1988] :

- la fiabilité qui est définie comme l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données et pendant un intervalle de temps donné,
- la disponibilité qui est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant donné,
- la sécurité qui est l'aptitude d'une entité à éviter l'apparition de conséquences critiques pour le système dans des conditions données,
- la maintenabilité qui est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou remise en état de fonctionnement après une défaillance, au cours d'un intervalle de temps donné, afin d'être capable d'accomplir une fonction requise.

4.3.2 Risque d'erreur humaine

La notion d'erreur est toujours définie comme une dérive par rapport à un référentiel. Deux types principaux de dérives peuvent ainsi être identifiés [Vanderhaegen 2003]:

- l'erreur comportementale est une dérive entre le comportement réel et celui qui aurait dû être suivi théoriquement,
- l'erreur situationnelle est une dérive entre ce qui est obtenu réellement et ce qui aurait dû être obtenu théoriquement.

L'erreur situationnelle peut alors recouvrir deux cas :

- l'application correcte d'une mauvaise règle, le référentiel est alors la règle qui aurait dû être suivie théoriquement et l'erreur situationnelle est alors l'effet d'une erreur comportementale,
- l'application incorrecte d'une bonne règle, le référentiel est alors la procédure liée à la règle devant être suivie.

Le modèle du comportement de l'opérateur humain proposé par Rasmussen [1983] est à l'origine de la classification des erreurs humaines établie par Reason [1990] qui distingue (Figure 5) :

- les ratés et les lapsus qui résultent d'erreurs non intentionnelles,
- les fautes et les violations qui résultent d'erreurs intentionnelles.

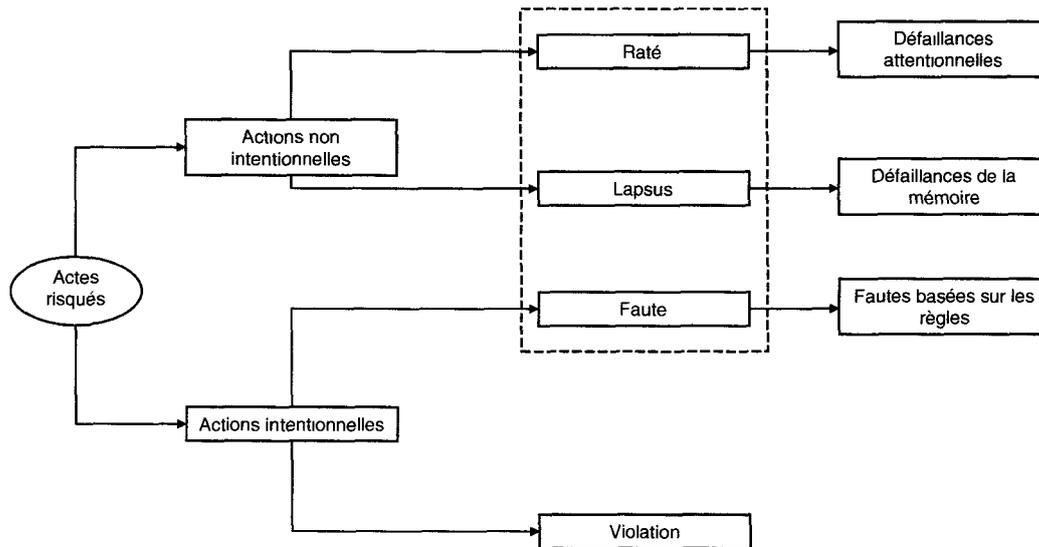


Figure 5. Classification des erreurs humaines selon Reason [1990].

L'erreur humaine doit non seulement pouvoir être détectée et récupérée mais également anticipée voire évitée. Le système doit alors être capable de détecter les conditions favorisant l'occurrence d'erreurs humaines, intentionnelles ou non. Un contrôle mutuel doit alors être mis en place, justifiant le statut de l'opérateur humain comme élément de fiabilité et élément faillible du système.

Un système ou une organisation est sûre de fonctionnement si elle est maintenue sous contrôle malgré l'occurrence de défaillances techniques ou d'erreurs humaines.

4.3.3 Maintien et perte de contrôle

Polet *et al.* [2001] propose une analyse de la situation basée sur la notion de gravité. Deux indicateurs sont définis : la maîtrise et la perte de contrôle d'une situation. Une situation est maîtrisée si elle est conservée au-dessous d'un seuil minimum de gravité. Les auteurs retiennent la possibilité de considérer plusieurs seuils d'acceptabilité pour la gravité, notamment un seuil propre au concepteur du système et un seuil propre à l'opérateur. Une situation peut alors être acceptable pour l'opérateur et ne pas l'être pour le concepteur. Cela correspond à différents modes de fonctionnement pour le système :

- un mode normal est un mode de fonctionnement garanti par le concepteur, sans exigence de la qualité de la mission remplie,
- un mode ajouté est un mode qui n'est pas prescrit par le concepteur mais qui ne représente pas une violation,
- un mode détourné dans lequel les prescriptions du concepteur ne sont pas suivies de façon intentionnelle,
- un mode incorrect est un mode dans lequel les prescriptions du concepteur ne sont pas suivies de façon non intentionnelle.

Le contrôle dans un système cognitif est déterminé par la connaissance de ce qui s'est produit et de ce qui va se produire. Hollnagel et Woods [2005] listent des conditions favorisant le maintien et la perte de contrôle. Le contrôle est maintenu ou récupéré si le système dispose de suffisamment de temps pour évaluer la situation et anticiper des événements futurs. Des procédures claires et bien définies et une charge de travail limitée sont également des déterminants du maintien du contrôle. La perte de contrôle peut être causée par un manque de

compétences, de temps ou de ressources. On retrouve les causes des problèmes liés à l'automatisation déjà évoqués par Norman [1990]. Les problèmes liés à l'automatisation peuvent alors provenir d'un manque de contrôle sur le processus.

Le manque de contrôle sur le processus peut être une conséquence d'une conception inadéquate du système Homme-machine, centrée essentiellement sur la mise en place de l'interaction nécessaire au fonctionnement. Ce problème a déjà été souligné au travers des architectures de contrôle hybrides et du rôle accordé à l'opérateur humain. Hollnagel et Woods [1999] proposent le terme de système cognitif couplé et associent à leur démarche deux modèles de contrôle cognitif.

4.3.4 Modèles de contrôle cognitif

Ces deux modèles de contrôle sont basés sur le modèle cyclique proposé par Hollnagel [1993] (Figure 6). Ce modèle met en relation les événements, la compréhension de la situation et les actions réalisées. Les actions dépendent de la compréhension de la situation qui est influencée par les événements et par le retour d'informations fournies au système. Enfin, ces événements dépendent des perturbations externes et des actions réalisées par le système.

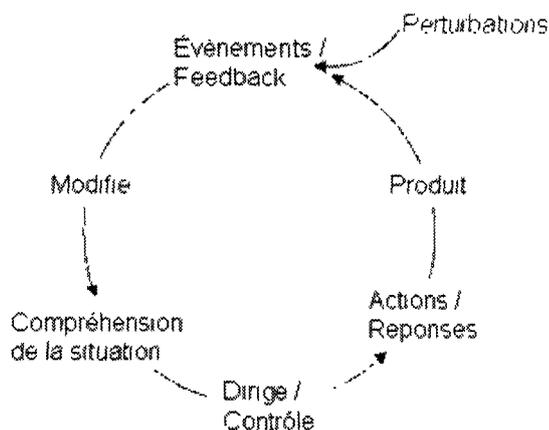


Figure 6. Modèle de contrôle cyclique (d'après [Hollnagel 1993]).

Le modèle COCOM (Contextual Control Model) est basé sur quatre modes de contrôle [Hollnagel 1993] :

- Dans le mode de contrôle aléatoire, le choix de l'action suivante est irrationnel ou aléatoire. Ce mode de contrôle correspond au cas où l'évaluation de la situation est déficiente voire impossible.
- Dans le mode de contrôle opportuniste, le choix de l'action est guidé par la situation courante et par des propriétés remarquables du contexte. L'anticipation et la planification sont faibles à ce niveau de contrôle principalement à cause de la limitation de la ressource temporelle.
- Dans le mode de contrôle tactique, les décisions de l'opérateur humain correspondent à une planification à moyen terme basée sur l'application d'une procédure connue ou d'une règle.
- Dans le mode de contrôle stratégique, la planification est effectuée à long terme. Ce mode paraît être le plus efficace en théorie mais requiert de trop fortes ressources pour être supporté sur de longues périodes.

Le modèle ECOM (Extended Control Model) est un développement du modèle précédent qui prend en compte l'existence de plusieurs boucles de contrôle simultanées au sein du système [Hollnagel 2002]. Chacun des niveaux de contrôle de ce modèle correspond à une instantiation du modèle cyclique (Figure 7) :

- Le contrôle par correction est défini comme la réponse de l'opérateur visant à corriger les effets d'une perturbation. Dans des conditions normales, les actions effectuées au niveau du contrôle par correction correspondent à des automatismes.
- Le contrôle par régulation définit essentiellement les actions effectuées dans la boucle de contrôle par correction en fonction des plans définis au niveau de contrôle par supervision. L'activité de ce niveau de contrôle requiert plus d'attention que le contrôle par correction. En effet, les activités à ce niveau ne sont plus des automatismes et nécessitent une prise en compte de la situation afin de définir les actions du niveau de contrôle par correction.
- Le contrôle par supervision définit et met à jour les plans d'actions en fonction des buts définis au contrôle par planification. L'activité se distingue du contrôle par régulation par une boucle à plus long terme et une prise en compte d'une situation plus globale.
- Le contrôle par planification est une boucle à long terme qui correspond principalement à la définition des buts. La mise à jour de cette boucle est effectuée suite à une évaluation globale de la situation, cette évaluation pouvant être régulière ou déclenchée par un événement particulier.

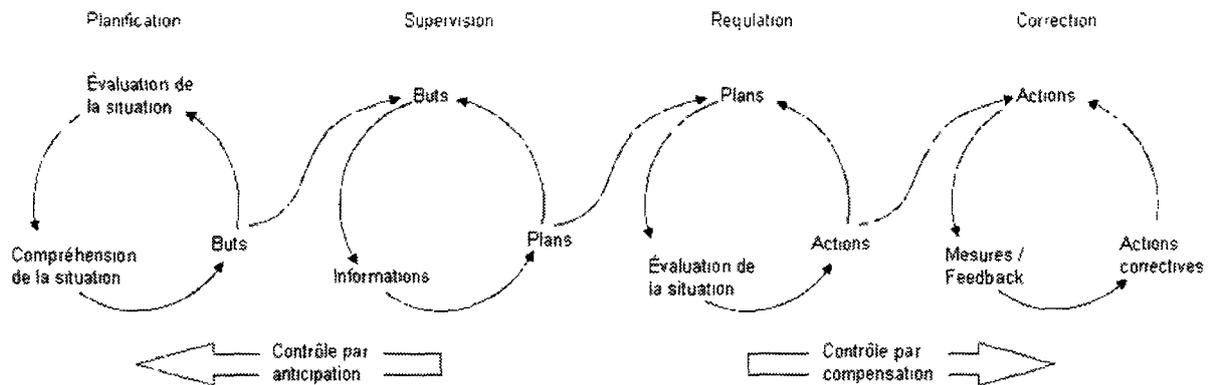


Figure 7. Extended Control Model (d'après [Hollnagel 2002]).

Dans le cadre d'une architecture de contrôle hybride, le contrôle peut être représenté par l'application du modèle ECOM aux trois niveaux : délibératif, séquenceur et comportement. Les boucles de correction et de régulation du modèle ECOM concernent essentiellement le niveau comportement, c'est-à-dire le niveau de l'enchaînement des actions. La boucle de supervision est à mettre en parallèle du niveau séquenceur alors que la boucle de planification correspond au niveau délibératif et répond aux mêmes besoins de planification et d'évaluation du plan global.

Au vu des parallèles qui peuvent être établis entre les modèles de l'opérateur humain et les architectures de contrôle hybrides, la conception de systèmes Homme-machine permet d'apporter des réponses aux limitations rencontrées par ces architectures. Le Tableau 2 recense ces éléments de réponse.

Architectures de contrôle	
Limitations	
Limitations technologiques empêchant la gestion de toutes les situations imprévues. Prise en compte de l'opérateur humain insuffisante dans la contribution de celui-ci à la gestion des situations imprévues. Gestion du niveau délibératif problématique. Manque d'adaptation des architectures de contrôle.	
Systèmes Homme-machine	
Apports	
Modèles de contrôle cognitifs [Hollnagel et Woods 1999 ; Hollnagel 1993 & 2002].	Intégration de l'opérateur humain comme un constituant du système. Apport des capacités complémentaires des agents dans les différentes boucles de contrôle.
Modèles de l'opérateur humain [Rasmussen 1983].	Application possible des architectures de contrôle hybrides [Connell 1992 ; Gat 1992].
Modèles de défaillances et d'erreurs [Reason 1990 ; Vanderhaegen 2003]	Analyse des risques dans les systèmes Homme-machine

Tableau 2. Réponse des systèmes Homme-machine aux limitations des architectures de contrôle robotiques.

Le maintien et la perte de contrôle d'une situation dépendent de la gestion des risques associés à l'activité. Ces risques peuvent être différents en fonction du type de contrôle considéré et nécessiter des moyens de défense spécifiques. Le contrôle peut être maintenu par l'ajout de barrières qui sont des moyens de défense pouvant gérer les risques de façon anticipatrice ou compensatrice.

4.3.5 Les moyens de défense basés sur les barrières

Une barrière peut être définie comme un obstacle, une obstruction ou une gêne qui peut soit empêcher l'exécution d'une action ou l'occurrence d'un événement soit prévenir ou diminuer l'impact des conséquences [Hollnagel 1999]. Les barrières peuvent être classées selon quatre catégories : matérielles, fonctionnelles, symboliques et immatérielles :

- Les barrières matérielles empêchent physiquement l'exécution d'une action.
- Les barrières fonctionnelles contraignent l'exécution d'une action par l'existence d'un lien logique et/ou temporel entre les événements. Ce type de barrières peut consister en une suite de conditions nécessaires à la réalisation d'une action.
- Les barrières symboliques nécessitent une interprétation afin d'être effectives. Leur perception est donc requise contrairement aux barrières physiques.
- Les barrières immatérielles ne sont pas présentes ou représentées dans la situation de travail mais dépendent de la connaissance de l'agent afin d'être effectives.

Les barrières peuvent être dupliquées et placées en série afin de lutter contre les événements risqués. Cependant, ce mode de placement ne suffit pas à résoudre toutes les situations menant à l'occurrence d'un accident. Il est préférable dans certains cas, de tenter d'anticiper ou de contrôler les événements risqués et de recourir à des barrières conçues selon un principe de défense en profondeur. Le concept de défense en profondeur consiste à envisager toutes les défaillances possibles au moyen de trois niveaux de défense [Valancogne et Nicolet 2002]. Le premier niveau relève de la prévention afin d'éviter l'occurrence de la défaillance. Le deuxième niveau a pour but d'anticiper la défaillance ou de la détecter immédiatement en cas

d'occurrence afin de la corriger. Le troisième niveau tente de limiter les conséquences de l'occurrence d'une défaillance.

L'étude de la sûreté de fonctionnement dans un système Homme-machine nécessite de prendre en compte la violation des différents types de barrières mises en place. Ces violations sont appelées des franchissements de barrière. L'étude d'un tel comportement peut être réalisée au travers du modèle Bénéfice – Coût – Déficit.

4.3.6 Le modèle Bénéfice – Coût – Déficit

Le modèle Bénéfice – Coût – Déficit (BCD) est basé sur une approche multicritère qui permet d'évaluer les conséquences d'un comportement dévié relatif à un franchissement de barrière par rapport à un comportement prescrit [Polet *et al.* 2002]. Le franchissement de barrière y est décrit selon ces trois attributs :

- le bénéfice : le franchissement de barrière est un comportement guidé par un but à atteindre qui peut offrir un bénéfice immédiat surpassant le coût de franchissement,
- le coût : le franchissement de barrière peut être accompagné d'une modification du mode opératoire et/ou de la structure du système,
- le déficit potentiel : le franchissement de barrière mène à une situation potentiellement dangereuse, créant un déficit potentiel lié au risque associé.

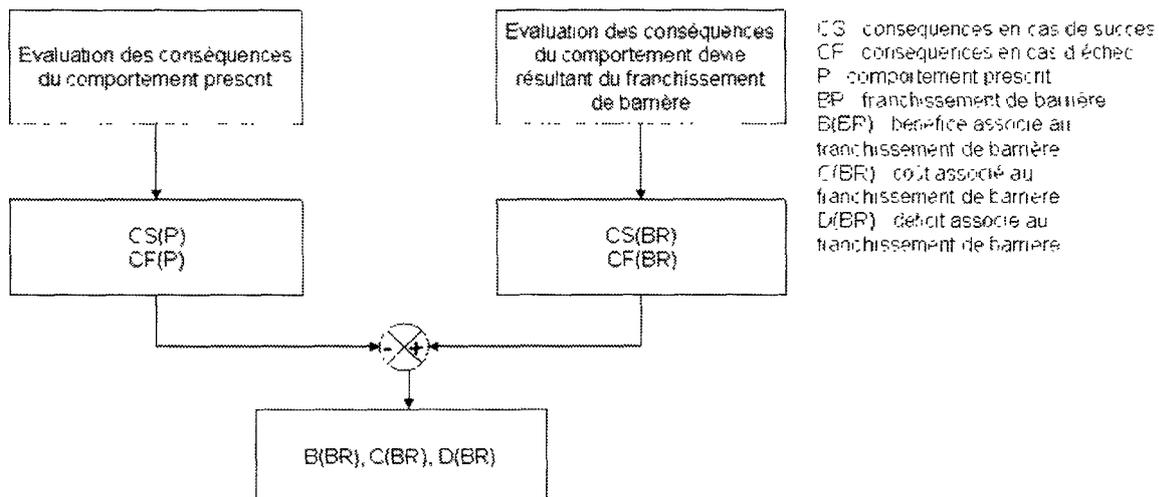


Figure 8. Détermination du bénéfice, du coût et du déficit (d'après [Polet *et al.* 2004]).

Le modèle BCD permet d'évaluer les conséquences de comportements déviés auxquels sont associés des risques. Le risque perçu et le risque toléré sont différents pour les agents du système et vont influencer le choix des comportements à mettre en œuvre pour gérer une situation imprévue. La sûreté dans un système est définie relativement aux accidents qui n'ont pas eu lieu ou qui ont pu être évités. Plutôt que de consacrer des efforts à chercher à comprendre pourquoi des accidents ont eu lieu, il peut être préférable de s'intéresser aux accidents qui n'ont pas eu lieu et de comprendre pourquoi ils n'ont pas eu lieu. Cette approche revient à s'attacher aux raisons du succès plutôt qu'aux causes de l'échec et s'inscrit dans la lignée de l'ingénierie de la résilience.

5 La résilience

5.1 Définitions de la résilience

Le terme de résilience est couramment employé dans de nombreux domaines : les sciences physiques, l'écologie, la psychologie, l'économie, l'informatique, les systèmes organisationnels... Malgré leur disparité, les définitions relatives à ces différents domaines présentent des points communs hérités de l'étymologie de ce terme.

5.1.1 Etymologie

Les points communs de ce concept découlent donc essentiellement de l'étymologie latine du terme résilience, composé du préfixe *re* qui signifie « en arrière » et du verbe *salire* qui signifie « sauter » ou « rebondir ». Dans les langues française et anglo-saxonne, on retrouve les sens de réaction après un choc et de capacité à affronter un traumatisme et à se reconstruire après celui-ci.

5.1.2 La résilience en science des matériaux

En physique, la résilience est définie comme la capacité d'un matériau à absorber des chocs ou à retrouver son intégrité après un choc.

5.1.3 La résilience en psychologie

La résilience en psychologie définit la capacité d'un individu à se reconstruire après un traumatisme, à l'affronter et à en ressortir plus fort. Les travaux sur la résilience ont connu un fort engouement dans les années 50 avec les travaux d'Emmy Werner [1992] qui, sur une durée de plus de 30 ans, a étudié la capacité des enfants à vivre et à devenir des adultes compétents et bien intégrés malgré l'adversité. La résilience est définie comme résultant de facteurs à la fois internes et externes. Les travaux sur la résilience en psychologie en France ont été repris et popularisés en France par Boris Cyrulnik [2000] et portent notamment sur la résilience des enfants victimes de maltraitances.

5.1.4 La résilience écologique

Dans le domaine de l'écologie, la résilience est souvent associée à la notion de stabilité écologique. La stabilité écologique est définie comme la capacité à continuer de fonctionner sans changement après réception d'une agression ou d'une perturbation, de subir de faibles changements après cette perturbation et de revenir à l'état d'origine après la fin de la perturbation [Pérez-España et Arreguín-Sánchez 2001].

Le domaine de l'écologie s'est intéressé au concept de résilience à partir de Holling [1973] afin de caractériser les phénomènes dynamiques dans des écosystèmes. Deux approches de la résilience sont généralement retenues.

La première définition est relative au temps mis par le système pour retrouver un état d'équilibre après une perturbation [Holling 1996], on parle alors d'*engineering resilience* ou résilience *technique*. Cette résilience technique est facilement transposable au domaine des sciences de l'ingénieur où elle est très proche de la notion de stabilité. En effet, plus le retour à un état d'équilibre est rapide, plus le système est résilient. Cette définition sous-entend qu'il n'existe qu'un seul état d'équilibre, au contraire de la seconde approche.

La seconde approche définit la résilience comme la capacité d'un système à intégrer dans son fonctionnement des perturbations de telle sorte que son intégrité soit maintenue [Holling

1996; Ludwig *et al.* 1997]. Cette seconde approche est nommée *ecological resilience* ou résilience *écologique*. Elle considère que le système peut être amené à basculer vers un nouveau domaine de stabilité, supposant ainsi l'existence de plusieurs points d'équilibre.

La résilience dans les milieux naturels est également développée dans la théorie de la viabilité [Martin 2005]. La théorie de la viabilité s'intéresse à l'évolution de systèmes dynamiques complexes non-déterministes et soumis à des contraintes. La résilience est alors définie relativement au temps de retour du système à un état d'équilibre après une perturbation.

5.1.5 La résilience en informatique

En traitement d'images, la résilience est assimilée à la robustesse des algorithmes de marquage d'images (empreintes numériques). Les algorithmes utilisés dans ce domaine sont robustes à des transformations des images telles que les rotations, les translations ou les mises à l'échelle [Wang *et al.* 2001]. De façon générale, la résilience en algorithmique ne concerne que des aspects de robustesse des algorithmes et ne constitue de ce fait qu'une application partielle de la définition de la résilience.

Les réseaux informatiques apparaissent comme une application plus propice de la résilience qui est alors assimilée à la tolérance aux pannes [Luo et Yang 2002 ; Konak et Bartolacci 2007]. La tolérance aux pannes caractérise des systèmes capables de maintenir un niveau de fonctionnement minimal malgré la défaillance d'un ou plusieurs composants.

Deux approches se distinguent dans la définition de la fiabilité des réseaux : la fiabilité totale du réseau et la résilience. La fiabilité totale est atteinte lorsque tous les nœuds du réseau sont connectés et fonctionnels. Dans la pratique, un réseau peut cependant être fonctionnel alors que certains nœuds sont défaillants. La mesure de la résilience permet de prendre en compte un nombre n de nœuds défaillants sous condition qu'un débit minimum soit délivré [Konak et Bartolacci 2007]. On retrouve alors les caractéristiques d'un système tolérant aux pannes.

Ces premières approches de la résilience s'intéressent à un aspect partiel de la résilience, à savoir la capacité à résister à une perturbation, ou sont centrées sur un individu et ne prennent alors pas en compte la complexité d'un système. L'intérêt de la résilience en tant que concept émergent porte sur la gestion des risques et des perturbations à l'échelle d'un système ou d'une organisation. La capacité à résister à une perturbation, ou plus généralement à un événement imprévu, est la conséquence d'interactions entre les entités constituantes du système. La gestion des perturbations est au centre de la problématique de la sûreté de fonctionnement, domaine auquel la résilience peut contribuer au travers des aspects proactifs.

5.1.6 La résilience en sûreté de fonctionnement

Dans le cadre des systèmes socio-techniques, et plus précisément dans les systèmes Homme-machine, la notion de résilience peut être rapprochée de celle de robustesse [Amalberti 2006]. L'opérateur humain et le système automatisé peuvent être tous deux des sources de résilience. De plus, la résilience du système peut provenir de la coopération existant entre cet opérateur humain et ce système automatisé.

Une définition applicable au cadre des systèmes Homme-machine est celle proposée par Wreathall [2006] et qui définit la résilience comme la faculté d'une organisation (d'un système) à maintenir, ou retrouver rapidement un état stable, permettant ainsi la continuité du fonctionnement pendant et après une défaillance majeure ou en présence d'un stress continu.

Dans les systèmes industriels, la résilience est liée au concept de robustesse dans le cadre des systèmes tolérants aux erreurs et des systèmes résistants aux erreurs. Un système est dit résistant aux erreurs s'il réduit la probabilité qu'un opérateur humain agissant sur l'interface tente d'accomplir des actions susceptibles de compromettre la sécurité du système. Un système est dit tolérant aux erreurs si les conséquences d'actions erronées accomplies par l'opérateur humain sont maintenues à un niveau acceptable [Dearden et Harrison 1995].

La résilience apparaît alors être liée à la gestion et à la maîtrise des risques. Différents types de défenses permettent d'assurer la sûreté de fonctionnement du système. La mise en place de barrières est un moyen de garantir cette résilience.

Les différents types de barrières et le concept de défense en profondeur précédemment définis sont à relier aux différentes interprétations possibles de la résilience qui peuvent être ici perçues comme différents horizons temporels par rapport à l'occurrence d'un événement. Les barrières préventives ont pour but d'anticiper voire d'éviter l'occurrence d'un événement. Les barrières protectrices ont deux fonctions principales. Elles ont pour but de dévier les conséquences de l'occurrence d'un événement et de minimiser leur impact [Hollnagel 1999]. Un système résilient doit donc être organisé autour de barrières permettant l'anticipation, la réaction et la récupération face à des événements. Cependant, la résilience d'un système ne peut être envisagée uniquement au travers de l'ajout de nouvelles barrières, règles ou procédures. La résilience doit être le fait d'une surveillance constante de la performance du système et des conséquences des actions menées [Hollnagel et Woods 2006].

Cette dernière acception de la résilience permet de considérer le placement de barrières selon un principe de défense en profondeur comme une méthode de conception résiliente. En effet, les trois niveaux de contrôle : prévention, contrôle et limitation des conséquences, correspondent à la résilience définie comme la capacité à gérer les défaillances avant, pendant et après leur occurrence. A ce placement de barrières prenant en compte la résilience du système doit être associée une méthodologie d'évaluation susceptible de tenir compte de cet aspect de la résilience. L'étude des conséquences des actions, tant pour un comportement prescrit que pour un comportement dévié est l'objet du modèle BCD [Polet *et al.* 2004] appliqué au franchissement de barrière. Le modèle BCD peut contribuer à l'évaluation de la résilience d'un système en étant appliqué à l'évaluation d'alternatives de réalisation d'une action.

La résilience, telle qu'elle peut être employée en sûreté de fonctionnement, se distingue des premières approches en psychologie ou en science des matériaux. En effet, elle prend à présent en compte des systèmes complexes (écosystèmes, systèmes socio-techniques) composés d'entités interagissant entre elles tels que les systèmes organisationnels.

5.1.7 La résilience organisationnelle

L'intérêt pour la résilience s'est porté récemment dans le domaine de la théorie des organisation et des systèmes organisationnels [Anders *et al.* 2006], des systèmes socio-techniques complexes comme les systèmes ferroviaires [Hale et Heijer 2006b] ou les systèmes économiques [Sundström et Hollnagel 2006]. De faibles performances ou un dysfonctionnement de tels systèmes peuvent s'expliquer par un manque de résilience.

McDonald [2006] définit la résilience comme la capacité d'un système organisationnel à anticiper et gérer un risque efficacement, par des adaptations appropriées de ses actions,

systemes et processus, de façon à assurer que ses fonctions soient réalisées de façon stable et efficace en relation avec son environnement.

Une relation très forte peut être établie entre sécurité et résilience. Hale et Heijer [2006a] définissent la résilience comme un compromis nécessaire entre la sécurité de l'organisation ou du système et son objectif en termes de production ou de performance. La résilience se pose alors comme un moyen de prévention de la perte de contrôle plutôt que comme un moyen de récupération suite à une perte de contrôle.

Comme on peut le voir au travers des définitions présentées, la résilience est un concept présent dans de nombreux domaines. Cependant, l'étendue du domaine d'application de la résilience, depuis l'écologie aux systèmes organisationnels est telle que la résilience n'est souvent considérée que sous un aspect partiel rejoignant en grande partie les notions de stabilité ou de robustesse. La question est alors de savoir ce qu'apporte le concept de résilience par rapport à la stabilité et à la robustesse d'un système.

5.2 Résilience, stabilité et robustesse

La question que l'on peut se poser en parcourant la littérature consacrée à la résilience et plus précisément à l'ingénierie de la résilience est de savoir si ce terme n'est pas interchangeable avec les concepts de stabilité et de robustesse. Ce problème se pose particulièrement si l'on tente d'appliquer le concept de résilience à un système Homme-machine. En effet, dans ce cas de figure, la résilience apparaît très proche des notions de robustesse et de stabilité en automatique.

Lundberg et Johansson [2006] dissocient les notions de stabilité et de résilience en se fondant sur l'approche de Holling [1973, 1996]. Il peut être en effet profitable de dissocier ces deux notions. Holling [1973] constate qu'un système tel qu'une population peut être confronté à des variations importantes et donc être instable et pourtant se montrer résilient et survivre sur de longues périodes. A contrario, un système isolé et sans interaction avec d'autres systèmes peut se montrer stable et à l'abri de toute variation de population et ne pas être résilient face à une agression extérieure.

Lundberg et Johansson [2007] approfondissent la distinction entre stabilité et résilience en se basant sur les systèmes stables, bi-stables et multi-stables qui permettent de mettre en avant le problème des transitions entre différents états de fonctionnement (Figure 9). Les systèmes stables gèrent des situations qui ont été prévues, c'est-à-dire pour lesquelles il existe des moyens de défense préalablement conçus comme des barrières. Ce type de système est stable par rapport à un état défini vers lequel il tend à revenir en cas de perturbation. Les systèmes bi-stables sont composés d'un ensemble limité d'états que le système peut adopter et qui permettent une adaptation à des situations anormales. Ces situations gérées par les systèmes bi-stables sont identifiées comme des événements irréguliers sur la Figure 9. La phase de transition entre ces deux états est alors considérée comme instable et correspond à un compromis qui doit être trouvé entre stabilité et résilience. Les systèmes multi-stables étendent ce principe de transition à une série d'états permettant de gérer des événements sans précédent. La résilience de ce type de systèmes vise principalement à gérer les transitions vers d'autres états de fonctionnement, de performance éventuellement moindre, en cas de modification des paramètres du système.

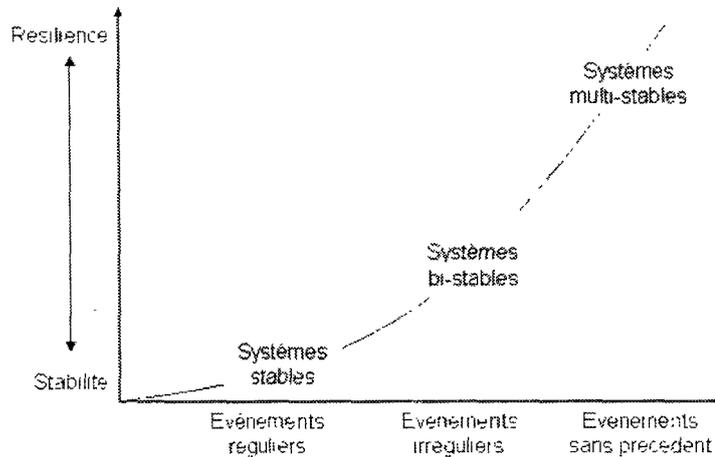


Figure 9. Relation entre stabilité et résilience face à différents types de menaces (d'après [Lundberg et Johansson 2007]).

La stabilité vise à maintenir un niveau optimal de performance pour le système par rapport à un objectif donné. Le système est stable par rapport à ce seuil de performance défini. Un système peut ainsi être considéré comme stable et maintenir un niveau de performance conforme au seuil requis et ne pas être capable de s'adapter à un événement imprévisible par manque de résilience. La résilience se traduit alors par la capacité des systèmes multi-stables à atteindre un nouvel état d'équilibre caractérisé par un niveau de performance éventuellement moindre. Cette recherche d'un nouvel état d'équilibre est rendue nécessaire par la possible occurrence d'événements imprévisibles qui peuvent être catégorisés.

Westrum [2006] propose une typologie de situations (I, II et III). Ces situations correspondent à l'occurrence de menaces (perturbations) de différents types pour lesquelles la résilience doit pouvoir s'appliquer :

- situation I : le système est exposé à des menaces régulières. L'occurrence élevée de ces menaces permet au système de mettre en œuvre une réponse standard.
- situation II : le système est exposé à des menaces irrégulières. Ce type de menaces correspond à un événement exceptionnel voire unique dont la probabilité qu'il se produise à nouveau est très faible. Il est alors impossible de mettre en œuvre un algorithme permettant de gérer une telle situation. L'occurrence de telles situations teste les capacités du système à s'auto-organiser et à répondre efficacement à une situation de crise.
- situation III : le système est confronté à un événement sans précédent. Ces situations requièrent une part d'improvisation plus importante que les situations précédentes. Ce type d'événements paraît tellement inconcevable qu'il pousse les éléments du système en dehors de leur expérience collective et qu'il est pratiquement impossible de les anticiper.

La gestion de ces types de menaces nécessite des demandes différentes en termes de résilience [Westrum 2006 ; Hale et Heijer 2006a]. Une organisation ou un système résilient dans une situation donnée n'est pas nécessairement résilient dans une autre situation. La résilience est un processus d'adaptation du système et non un état statique. La résilience d'un système peut ainsi se montrer inefficace face à certaines situations voire disparaître.

Fiksel [2003] propose une interprétation simplifiée des lois de la thermodynamique caractérisant le comportement de différents types de systèmes. Pour ces systèmes, l'état de

stabilité correspond au niveau d'énergie le plus faible, c'est-à-dire au point d'équilibre du système. Différents comportements sont définis pour un système face à des perturbations (Figure 10) :

- Le premier système est un système dit résistant, capable de fonctionner sous des perturbations de faible amplitude mais retournant rapidement à un état d'équilibre. Ce comportement est caractéristique d'un système fortement contraint.
- Le second système est un système résilient capable de récupérer de perturbations couvrant un spectre plus large et tend à retrouver graduellement son état d'équilibre. Ce type de système présente généralement des caractéristiques d'adaptation et d'évolution qui restent cependant limitées face à certains types de perturbations.
- Le dernier système est d'autant plus résilient qu'il est capable de tolérer de plus importantes perturbations. Ce type de systèmes est en effet capable de s'adapter aux perturbations reçues en modifiant sa structure et/ou son fonctionnement afin d'atteindre un nouvel état d'équilibre, différent de l'état initial.

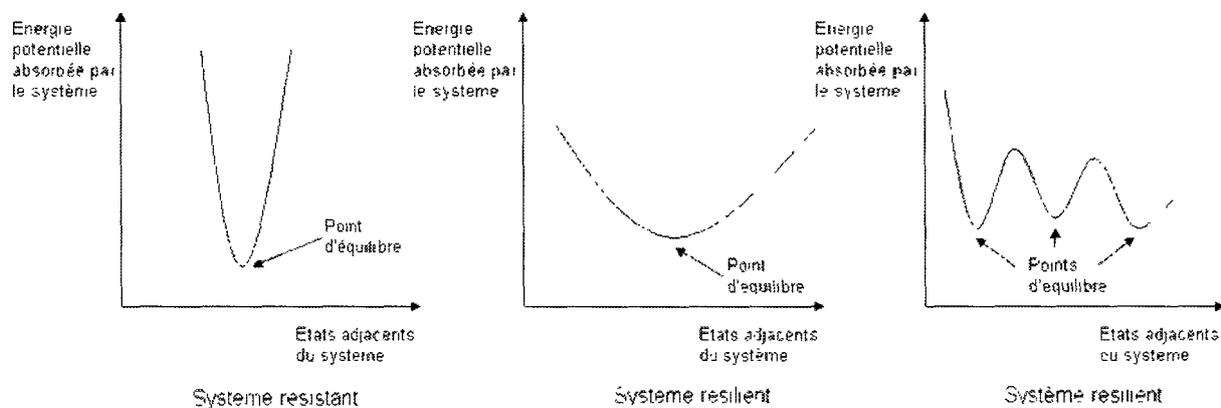


Figure 10. Comportement de systèmes résistants et résilients (d'après [Fiksel 2003]).

Le système résilient possédant plusieurs points d'équilibre, tel qu'il est défini par Fiksel est proche de l'interprétation proposée par Amalberti [2006]. En effet, l'auteur complète l'approche de Reason concernant la relation entre sûreté et résilience. Cette approche est illustrée à la Figure 11. Elle considère la résilience d'un système comme une succession d'états résilients. L'état initial du système est considéré comme celui correspondant à un système hautement compétitif et relativement peu sûr. Lorsque cet état n'est plus acceptable, en fonction des critères de compétitivité et/ou de sûreté, le système bascule vers un autre mode de fonctionnement, caractérisé par des contraintes plus nombreuses et une régulation accrue.

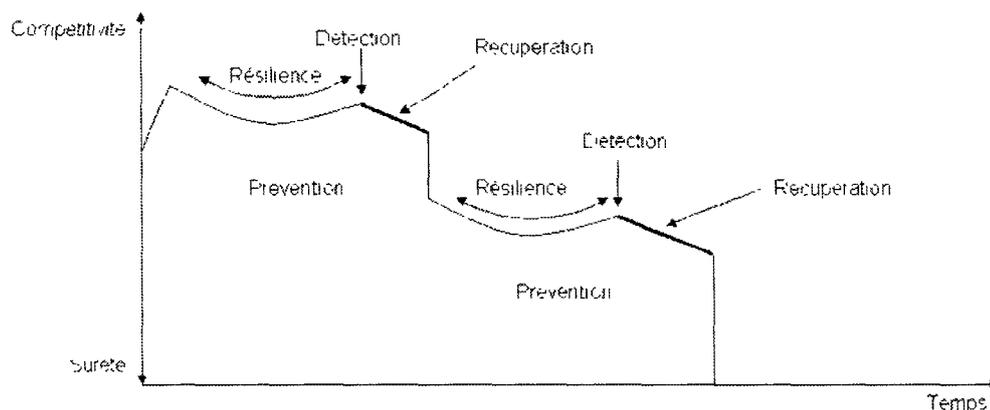


Figure 11. La résilience d'un système comme succession de résiliences (d'après [Amalberti 2006]).

La phase de prévention est un premier type de résilience correspondant à une adaptation continue et locale du système. Ce type de résilience peut être qualifié de résilience locale. Celui-ci est limité au mode de fonctionnement courant et contribue à la gestion de perturbations connues et à l'anticipation de l'occurrence d'un événement indésirable. Si un événement indésirable est considéré comme ne pouvant pas être géré dans le mode de fonctionnement courant, une transition vers un autre mode de fonctionnement est nécessaire. Ce processus est qualifié de résilience globale. La transition associée à cette résilience globale peut être décomposée en trois phases successives :

- la détection d'un événement indésirable irréversible dans le mode de fonctionnement courant,
- la recherche d'une solution appropriée permettant la récupération de l'occurrence de l'événement,
- la récupération par la transition effective entre les deux modes de fonctionnement.

Ces aspects sémantiques sont liés à la définition de la résilience retenue pour les systèmes organisationnels, à savoir le maintien et la récupération d'un état stable après l'occurrence d'une défaillance. Westrum [2006] adopte le même point de vue et définit la résilience selon trois aspects temporels du système face à une perturbation :

- empêcher l'occurrence d'un événement préjudiciable,
- empêcher une situation préjudiciable d'empirer après l'occurrence d'un événement indésirable,
- récupérer d'une situation préjudiciable.

La composante adaptative de la résilience est mise en avant dans les travaux de Morel [2007]. L'auteur propose une discussion sur la sécurité totale d'un système ou sécurité observée comme résultant de l'apport de la sécurité gérée et de la sécurité contrainte. La sécurité gérée dépend du savoir-faire des acteurs. La sécurité contrainte ou prescriptive est mise en œuvre au travers de lois, règles et procédures encadrant l'activité. Les différents niveaux de résilience d'un système sont caractérisés par une prise en compte différente de ces deux types de sécurité. La résilience d'un système est la conséquence de la capacité de celui-ci à adapter les niveaux de sécurité gérée et sécurité contrainte en fonction du contexte. La dissociation des concepts de sécurité et de résilience a permis d'établir qu'il n'existe pas nécessairement de relation causale entre eux. Un système résilient peut être peu sûr notamment dans le cas des personnels de la pêche maritime ou des personnels de maintenance de matériel ferroviaire [Hale et Heijer 2006b ; Morel 2007].

Morel [2007] propose une vision synthétique des différentes approches de la résilience face aux différents types de menaces (Figure 12). Un domaine de stabilité est caractérisé par un niveau donné de compétitivité et de sûreté. La résilience du système global est définie par le fait de modifier le fonctionnement du système afin d'atteindre un autre domaine de stabilité.

La gestion des menaces régulières est le fait de systèmes stables comme le proposent Lundberg et Johansson [2006] (Figure 9). Selon Fiksel [2003], on est alors dans le cas du comportement d'un système dit résistant (Figure 10). Les menaces irrégulières sont gérées par des systèmes résilients selon Fiksel [2003] mais ne comportant qu'un seul point d'équilibre. Lundberg et Johansson [2006] emploient le terme de systèmes bi-stables et incluent la possibilité pour le système d'atteindre un nombre limité de domaines de stabilité. Afin de lever toute ambiguïté quant à l'emploi du terme de système résilient, le terme de système robuste peut être employé pour caractériser un système capable de gérer des perturbations imprévues dans un cadre plus large qu'un système stable. Les menaces irrégulières peuvent alors être associées aux systèmes robustes [Jen 2003]. Les menaces sans précédent rendent quant à elles nécessaires la conception des systèmes résilients capables d'atteindre différents domaines de stabilité selon la définition des systèmes multi-stables [Lundberg et Johansson 2006]. Chacun de ces domaines de stabilité est caractérisé par un point d'équilibre qui lui est propre et qui est caractérisé par un compromis entre compétitivité et sûreté [Fiksel 2003 ; Morel 2007] (Figure 12).

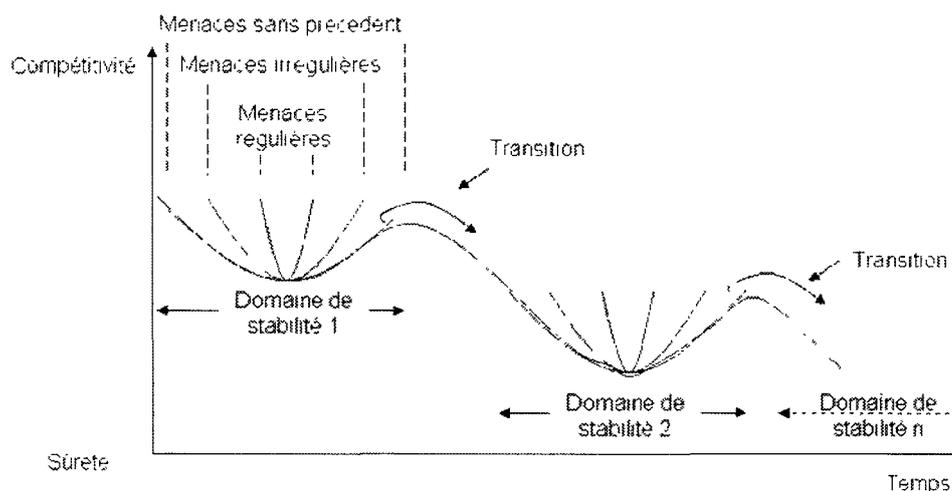


Figure 12. Relation entre types de résilience et domaines de stabilité face à différents types de menaces (d'après [Morel 2007]).

Stabilité et robustesse diffèrent de la résilience par la notion d'émergence. Pariès [2006] définit la sécurité comme une forme de résilience résultant de la robustesse de tous les procédés actifs au sein de l'organisation ou du système. En effet, la résilience d'un système ou d'une organisation se traduit par l'élaboration de nouvelles solutions. Si on considère la résilience comme la résistance aux chocs, c'est-à-dire à des perturbations extérieures, ce concept n'est pas utile en tant que nouvelle propriété d'un système ou d'une organisation. En effet, dans ce cas, il est alors totalement assimilable aux concepts de stabilité et de robustesse.

Le Tableau 3 recense les caractéristiques spécifiques aux systèmes stables, robustes et résilients.

	Systèmes résistants ou stables	Systèmes robustes ou bi-stables	Systèmes résilients ou multi-stables
Vitesse de récupération	Rapide	Moyenne	En fonction du domaine de stabilité considéré
Perturbations gérées	Restreintes	Etendues	Etendues
Capacités d'adaptation	Faibles	Moyennes	Importantes
Domaines de stabilité	Unique	Limités	Nombreux

Tableau 3. Récapitulatif des caractéristiques des systèmes stables, robustes et résilients.

La résilience doit être considérée comme un concept émergent nécessitant une approche proactive de l'activité du système ou de l'organisation afin de contribuer à la gestion des risques. Cette contribution passe par la conception de systèmes ou d'organisations organisées autour de certaines propriétés.

5.3 Propriétés des systèmes résilients

Plusieurs faits permettent de mettre en lumière un manque de résilience dans un système ou une organisation [Hale et Heijer 2006b] :

- des défenses qui deviennent inefficaces sous la pression des objectifs de l'organisation,
- un manque de remise en question et une confiance trop importante suite à de bonnes performances,
- une fragmentation du système qui empêche d'avoir une vision globale du procédé,
- des pannes dans l'organisation empêchant les communications et la coordination,
- une impossibilité pour le système de répondre de manière flexible et de gérer des situations inattendues,
- une prise en compte insuffisante de la sécurité par rapport aux autres objectifs du système,
- la sécurité n'est pas intégrée de façon intrinsèque dans le système et dans son fonctionnement par défaut.

Dans un système de supervision, concevoir un système résilient nécessite de mettre en place la surveillance de ce qui s'est passé, ce qui se passe et ce qui va se passer, c'est-à-dire que le système doit être doté de capacités d'apprentissage, de surveillance constante et d'anticipation. Une organisation résiliente doit alors combiner des caractéristiques d'organisation proactive, réactive et interactive [Hollnagel 2006] (Figure 13). La proactivité de l'organisation est caractérisée par l'analyse constante de son état afin de se situer par rapport à un domaine de fonctionnement et de déterminer si elle est capable de réagir à un événement imprévu. La proactivité contribue alors à l'anticipation voire à l'évitement d'un événement imprévu. Lors de l'occurrence d'un événement imprévu, l'organisation doit être capable d'évaluer la situation courante et de se réorganiser, ce qui traduit la réactivité de l'organisation. La réactivité est envisageable à un niveau individuel au sein de l'organisation. Elle correspond à la gestion d'une menace régulière pour laquelle une solution est connue. Certains événements imprévus ne peuvent cependant être évités et nécessitent alors une interaction entre les agents de l'organisation afin d'élaborer des alternatives de fonctionnement permettant de récupérer de l'occurrence de ces événements imprévus. Ces alternatives de fonctionnement face à un

événement imprévu entrent dans un processus d'évaluation et d'apprentissage qui a pour but de contribuer à l'amélioration de l'aspect proactif du système.

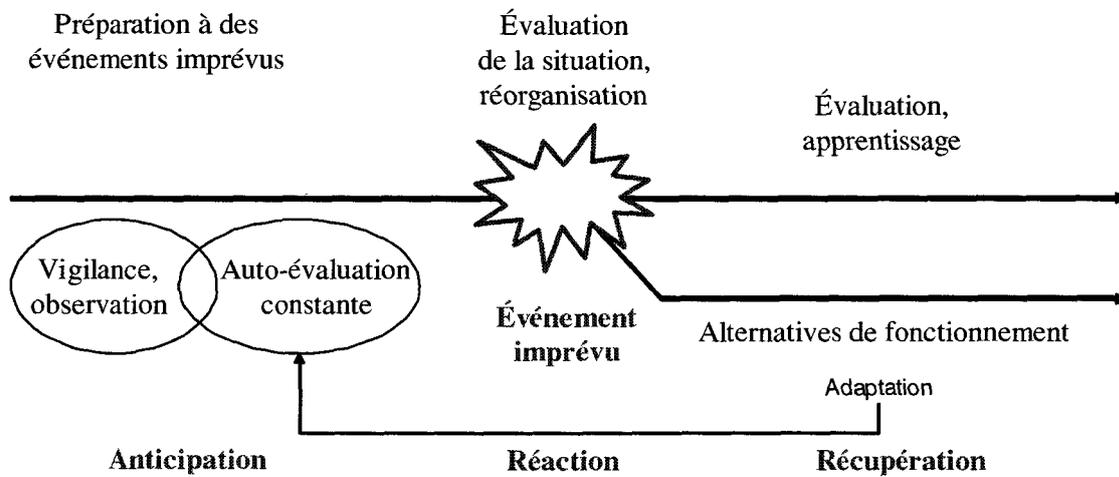


Figure 13. Organisation résiliente (d'après [Hollnagel 2006]).

Hollnagel et Woods [2006] retiennent plusieurs propriétés d'un système résilient :

- quantité de perturbations que le système peut absorber sans se reconfigurer,
- flexibilité,
- marge de manœuvre par rapport aux limites de fonctionnement du système,
- comportements aux limites de fonctionnement du système,
- interactions croisées entre les différents niveaux du système.

Ces propriétés sont issues des travaux en ingénierie de la résilience et principalement de ses applications dans la résilience organisationnelle. Elles sont donc conformes aux aspects de la résilience comme la prise en compte des interactions dans un système complexe et le comportement du système face à une perturbation. Ces propriétés sont cependant peu opérationnalisables et ne prennent pas en compte de façon explicite les performances du système.

Fiksel [2003] définit quatre propriétés contribuant à la résilience d'un système :

- Diversité : existence de plusieurs formes et comportements au sein du système.
- Efficacité : performance du système sous un minimum de ressources.
- Adaptabilité : capacité du système à changer en réponse à de nouvelles contraintes, c'est-à-dire à fournir la réponse adaptée en fonction des contraintes dans une situation dynamique.
- Cohésion : existence de liens entre les agents au sein du système.

Contrairement à celles proposées par Hollnagel et Woods [2006], ces quatre propriétés ne traduisent pas les aspects de la résilience organisationnelle comme les interactions entre les agents. De même, le maintien du fonctionnement du système sous des conditions limites n'apparaît pas. Cependant, ces propriétés sont facilement quantifiables et applicables à un domaine d'application tel qu'un système Homme-machine. Elles permettent de plus d'inclure la notion de performance du système et mettent l'accent sur l'adaptabilité de celui-ci.

Ces approches issues de la littérature permettent de guider la réflexion quant à l'élaboration de critères permettant l'évaluation de la résilience d'un système Homme-machine. Les critères

proposés ici doivent couvrir les différentes propriétés des systèmes résilients issues de la littérature et être composés d'indicateurs permettant une évaluation de la résilience du système Homme-machine.

Les critères à retenir doivent en premier lieu prendre en compte les performances du système Homme-machine. Un premier critère d'efficacité doit donc être considéré. Un système résilient doit être capable de s'adapter à différents types d'événements imprévus. Les propriétés de flexibilité, de diversité et d'adaptabilité sont à considérer pour cet aspect de la résilience. De plus, dans l'approche de Fiksel [2003], la propriété d'adaptabilité, très proche sémantiquement de la flexibilité, peut être interprétée comme une conséquence de la diversité du système. Un second critère d'adaptabilité est alors à prendre en compte dans l'évaluation de la résilience. La résilience d'un système face à l'occurrence d'une perturbation est évaluée au travers des propriétés de marge de manœuvre et de comportement face aux limites de fonctionnement. Le fonctionnement aux limites est un troisième critère qui a pour but d'évaluer cet aspect de la résilience. Dans le cadre de systèmes complexes ou d'organisations, les performances sont dépendantes de la cohésion et des interactions mises en œuvre entre les agents du système. Cohésion et interactions croisées peuvent être rassemblées en un quatrième critère d'interactions au sein du système.

Quatre critères ou classes d'indicateurs sont donc proposés comme des aptitudes spécifiques du système contribuant à sa résilience :

- Efficacité : aptitude du système à être performant dans un mode de fonctionnement donné, c'est-à-dire à optimiser les performances en fonction de contraintes données.
- Adaptabilité : aptitude du système à élaborer de façon dynamique des solutions appropriées au contexte.
- Fonctionnement aux limites : aptitude du système à gérer les conditions limites d'utilisation d'un mode de fonctionnement donné.
- Interactions : aptitude du système à mettre en œuvre et à gérer les interactions entre les agents composant le système.

Des mesures de la résilience ont été définies dans différents domaines d'application parmi ceux présentés dans la section 5.1 (science des matériaux, informatique, écologie). Contrairement aux propriétés de conception énoncées dans le domaine de la résilience organisationnelle, ces mesures permettent de quantifier la résilience mais ne s'attachent qu'à un aspect partiel de sa définition.

5.4 Mesures de la résilience

5.4.1 La résilience en science des matériaux

Historiquement, la première mesure de résilience qui a été élaborée évalue la résilience d'un matériau. Ce calcul est effectué par l'essai dit « de flexion par choc sur éprouvette entaillée Charpy » qui a été mis au point en 1901 par Georges Charpy. Cet essai mesure la résistance au choc d'un matériau en présence d'une entaille. Une mesure de la résilience est l'énergie absorbée par le matériau rapportée à la surface de la section à fond d'entaille.

5.4.2 La résilience en informatique

Dans les réseaux informatiques, la résilience est mesurée par trois indicateurs [Konak et Bartolacci 2007] :

- la probabilité que les nœuds du réseau communiquent,
- la fraction espérée des nœuds communicants,

- la fraction espérée du trafic délivré.

Cette évaluation de la résilience est liée à l'évaluation d'un système multi-stable [Lundberg et Johansson, 2007], à savoir que l'on tolère une baisse des performances ou un fonctionnement non optimal de la totalité du réseau à condition qu'un niveau suffisant de performances soit délivré.

5.4.3 La résilience en écologie

Dans le cadre de la théorie de la viabilité, Martin [2005] propose une mesure de la résilience basée sur l'évaluation de l'inverse du coût de restauration d'une propriété du système à la suite d'une perturbation.

Dans le domaine de l'écologie, la résilience est liée au concept de stabilité écologique (cf. section 5.1.4). Pérez-España et Arreguín-Sánchez [2001] proposent une mesure de la stabilité écologique à partir des mesures de persistance, de résistance et de résilience (Figure 14) :

- La persistance est le temps au-delà duquel la perturbation est considérée comme inacceptable.
- La résistance est calculée comme l'inverse de l'amplitude maximale générée par une perturbation.
- La résilience est donnée par la tangente inverse du ratio entre la résistance et le temps de retour à un état d'équilibre.

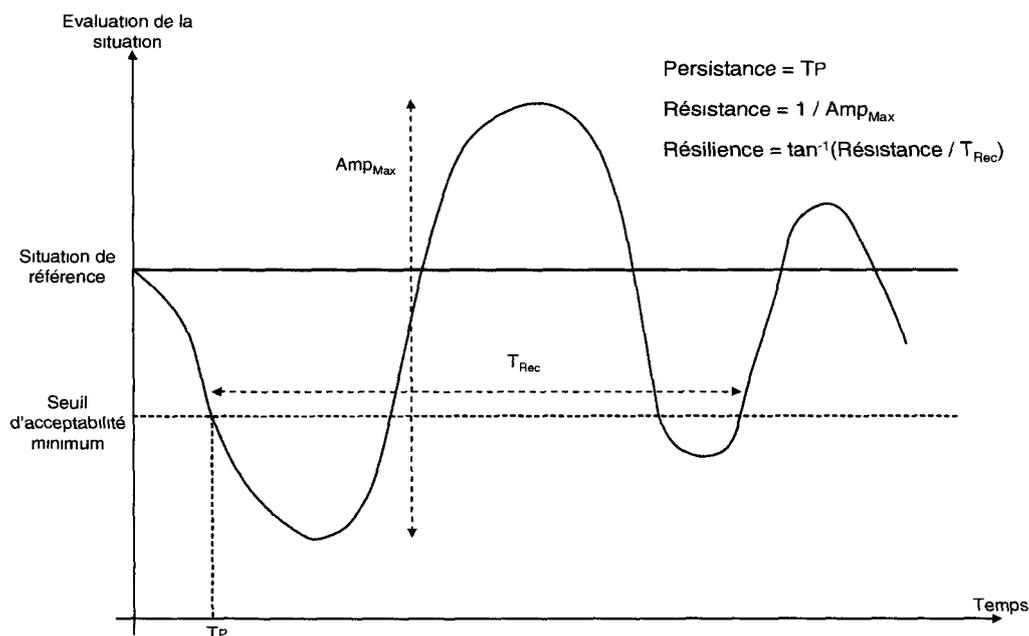


Figure 14. Mesures de la persistance, résistance et résilience (adapté de [Pérez-España et Arreguín-Sánchez 2001]).

Orwin et Wardle [2004] proposent un indice de résistance et un indice de résilience appliqués aux milieux naturels (Figure 15) :

- La résistance est liée à l'amplitude maximale causée par une perturbation.
- La résilience est liée à la vitesse de récupération de cette perturbation.

Ces indicateurs objectifs peuvent être rapprochés de la propriété évaluant la quantité de perturbations que le système peut absorber sans se reconfigurer. Les indicateurs de

récupération évaluent également l'aspect temporel de la résilience relatif à la récupération de l'occurrence d'une défaillance. Le comportement du système durant la phase de résistance correspond à l'évaluation de la propriété de fonctionnement aux limites, dérivée des propriétés de marge et de tolérance par rapport à une limite de fonctionnement.

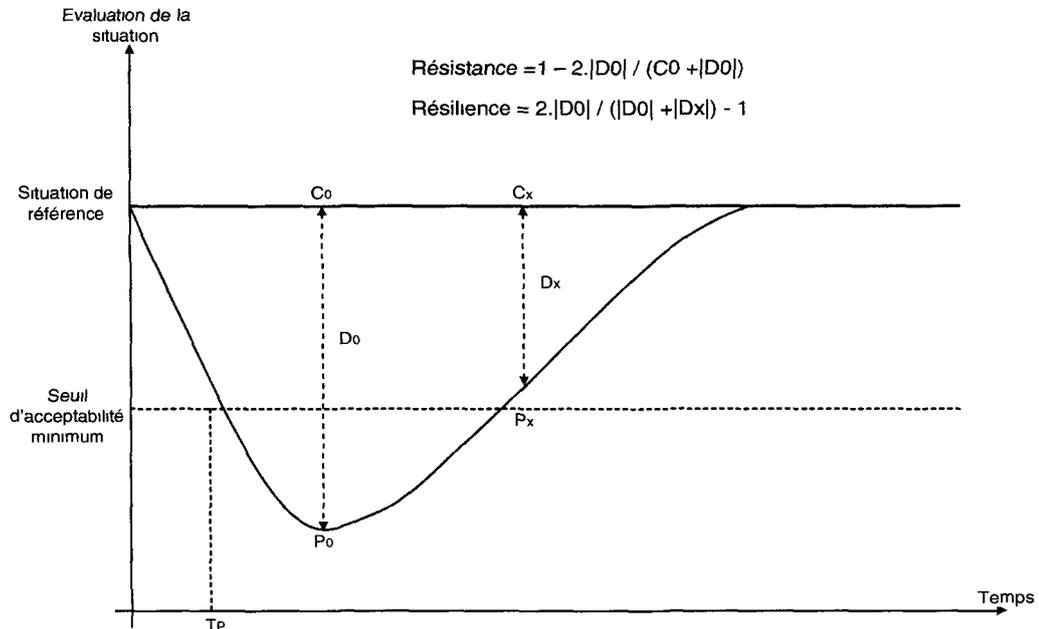


Figure 15. Mesures de la résistance et de la résilience (adapté de [Orwin et Wardle 2004]).

Une différence peut être notée entre les approches existant pour la résilience écologique et les approches relatives à la résilience organisationnelle ou la résilience dans les systèmes socio-techniques. Les mesures de la résilience prennent comme référence le retour du système à l'état précédent la perturbation. Dans les systèmes socio-techniques, le système est considéré comme résilient s'il est capable d'être dans un état différent de celui précédent la perturbation mais garantissant la continuité du fonctionnement.

6 Conclusion

La conception de systèmes robotiques autonomes est un domaine en pleine expansion qui a apporté la solution de l'automatisation aux problèmes rencontrés par les systèmes téléopérés. Cependant, on a pu voir au long de ce chapitre les limites des systèmes automatisés ne tenant pas compte des caractéristiques des opérateurs humains. Il est alors essentiel de se tourner vers une automatisation centrée sur l'homme. L'opérateur humain au centre du système est considéré comme un élément de fiabilité mais également comme un élément faillible, source d'erreurs humaines.

Les architectures de systèmes robotiques hybrides combinent des comportements réactifs et des comportements délibératifs faisant appel à des capacités décisionnelles différentes. De telles architectures décomposent l'activité du système par des raffinements successifs en partant des buts à accomplir pour parvenir à des actions primitives. Les niveaux opérationnel, tactique et stratégique des modèles de l'activité de l'opérateur humain sont proches de ces architectures. Cependant, dans de telles architectures, l'opérateur humain est le plus souvent en charge du niveau d'activité stratégique. Il en ressort un partage des tâches déséquilibré et une conscience de la situation amoindrie.

Ces architectures considèrent l'opérateur humain et le système robotisé comme deux entités distinctes et ne considèrent le système Homme-machine qu'au travers des interactions entre l'agent humain et l'agent technique. La différence de représentation ou de perception de l'information est alors souvent préjudiciable aux performances du système. Une démarche de conception plus pertinente consiste à considérer l'agent humain au même niveau que les agents techniques.

Le maintien des performances du système est dépendant du contrôle exercé sur celui-ci. Différents modèles de contrôle dans un système complexe montrent l'existence de plusieurs niveaux de contrôle interdépendants qui s'inscrivent dans un processus à la fois séquentiel et parallèle. L'interaction entre ces niveaux de contrôle peut être complétée par des interactions entre les entités composant le système Homme-machine. L'intérêt de ces interactions croisées entre niveaux de contrôle et entités du système est de faire émerger des comportements qui permettent non seulement de gérer et de maintenir sous contrôle des situations indésirables mais également d'anticiper voire d'éviter de telles situations. De tels comportements contribuent alors à la résilience du système Homme-machine.

La résilience est un concept émergent employé dans de nombreuses disciplines : psychologie, écologie, économie, théorie des organisations. La résilience d'un système ou d'une organisation est définie par Hollnagel et Woods [2006] comme la capacité de ce système à maintenir ou à retrouver un état stable malgré l'occurrence de défaillances ou en présence d'un stress continu. Le système doit donc être capable d'anticiper les défaillances ou de réagir et de récupérer de l'occurrence de défaillances tout en maintenant son intégrité. La résilience correspond alors à la gestion d'événements indésirables avant, pendant et après leur occurrence en vue de maintenir le système sous contrôle.

Le maintien d'un état stable ou le retour à un tel état se traduit par la sélection d'alternatives de fonctionnement caractérisées par des contraintes différentes de l'état initial. Ces contraintes positionnent le concept de résilience par rapport à celui de sécurité. La résilience peut en effet être interprétée comme un compromis entre sécurité contrainte et sécurité gérée. Plusieurs modes de contrôle doivent donc être définis lors de la conception du système Homme-machine. Le contexte dynamique des situations et la nature critique des missions nécessitent la mise en place de plusieurs modes d'autonomie, correspondant aux différentes contraintes, qui permettent de couvrir l'ensemble de situations auquel le système Homme-robot doit faire face. La résilience peut donc contribuer à la conception des systèmes Homme-machine selon des caractéristiques qui sont détaillées dans le Tableau 4.

L'ingénierie de la résilience telle qu'elle peut être appliquée aux systèmes Homme-machine ou aux organisations est donc une méthode de conception qui vise non seulement à gérer l'occurrence de situations indésirables mais également à constamment rechercher et améliorer les facteurs d'un fonctionnement normal du système. Il est cependant utile de pouvoir évaluer le fonctionnement d'un système résilient. A partir de la littérature, quatre critères ont donc été proposés afin de caractériser le fonctionnement d'un système résilient : l'efficacité, l'adaptabilité, le fonctionnement aux limites et les interactions. De tels critères permettent d'opérationnaliser le concept de résilience par une évaluation des solutions apportées par le système. La résilience d'un système se traduit également en l'absence de situations indésirables par la recherche et l'amélioration des facteurs contribuant au maintien du fonctionnement normal du système.

CHAPITRE 1 : PROBLEMATIQUE DE LA ROBOTIQUE MOBILE TERRESTRE : APPORTS DES SYSTEMES HOMME-MACHINE

La résilience d'un système est liée à la redondance, opérationnelle ou décisionnelle. L'opérateur humain et les agents techniques présents dans le système peuvent donc être responsables des différentes tâches composant l'activité du système Homme-machine. Les modalités de répartition de ces tâches sont guidées par des principes de coopération Homme-machine. La résilience d'un système peut s'exprimer au travers de la redondance mise en place à différents niveaux :

- Redondance opérationnelle par les différents comportements et les différents algorithmes disponibles.
- Redondance décisionnelle par les capacités de prise de décision du robot et de l'opérateur humain.
- Redondance des systèmes d'alarme et de communication.
- Redondance induite par le partage d'informations, création d'une conscience de la situation partagée.

Contrôle des situations imprévues	Propriétés de résilience	Apport et application aux Systèmes Homme-machine
Adaptation à des situations imprévues	Résilience locale et résilience globale (cf. section 5.2)	Modification du mode de fonctionnement du système et de la répartition des tâches entre les agents humains et techniques
Récupération des situations imprévues	Evaluation de l'anticipation, de la réaction et de la récupération [Zieba <i>et al.</i> 2007a] Emergence de solutions par interaction des agents du système [Anders <i>et al.</i> 2006]	Récupération par élaboration de solutions grâce à l'interaction entre les agents humains et techniques Approche de système cognitif couplé [Hollnagel & Woods 1999]
Lien avec la maîtrise de situations et l'analyse des risques	Approche proactive, réactive et interactive de la gestion des risques [Hollnagel 2006] Recherche des causes de la fiabilité du système	Complément aux méthodes de sûreté de fonctionnement et d'analyse des risques Application du modèle Bénéfice - Coût - Déficit [Polet <i>et al.</i> 2004]

Tableau 4. Apports de la résilience à la conception de systèmes Homme-machine.

Ce chapitre a présenté les problématiques liées à la conception de systèmes Homme-machine en se focalisant sur les interrogations issues du domaine de la robotique mobile terrestre et sur le besoin de résilience pour de tels systèmes. Le chapitre suivant s'attachera à décrire les moyens de la résilience dans les systèmes Homme-robot au travers de l'autonomie ajustable et de la coopération Homme-machine.

CHAPITRE 2 : AUTONOMIE AJUSTABLE POUR LA RESILIENCE DES SYSTEMES HOMME-ROBOT

Le premier chapitre a présenté la problématique relative à la conception de systèmes robotiques du point de vue des systèmes Homme-machine. Les exigences en termes de fiabilité et d'autonomie nécessitent de prendre en compte la résilience du système, c'est-à-dire sa capacité à anticiper les erreurs, à y réagir et à les récupérer. Un système Homme-machine doit mettre en œuvre des moyens capables de gérer les propriétés issues de la résilience organisationnelle, à savoir la proactivité, la réactivité et l'interactivité. Dans un système Homme-robot, la résilience va se traduire par la capacité du système à s'adapter au contexte, i.e. à posséder une autonomie ajustable. Les ajustements d'autonomie ne doivent pas introduire de nouvelles perturbations mais au contraire en permettre l'évitement ou la récupération. Ces ajustements impliquent les différents agents, humains et techniques, composant le système Homme-machine et doivent donc reposer sur des principes de coopération Homme-machine.

La première partie de ce chapitre est consacrée aux notions d'autonomie et d'autonomie ajustable et à leur application aux systèmes Homme-robot. L'efficacité des ajustements d'autonomie repose sur une conscience de la situation commune et une conscience de l'interaction Homme-robot dont les principes sont présentés dans les sections suivantes. Cette conscience de l'interaction est exploitée et développée dans le cadre de la coopération Homme-machine et de son application au contrôle coopératif Homme-robot.

1 Définition de l'autonomie des systèmes automatisés

1.1 Etymologie de l'autonomie

Dans un premier temps, l'étymologie du mot autonomie peut renseigner sur ses différentes significations possibles. Ce terme est dérivé de la combinaison de deux mots grecs : *autos*, qui signifie "soi-même" et *nomos* qui signifie "loi". Le dictionnaire définit ce terme comme étant la capacité d'un individu ou d'un groupe à prendre soin de lui-même en agissant librement selon les règles qu'il a lui-même choisies ou acceptées et à ne pas dépendre d'un pouvoir extérieur [Girodet 1976].

Les premières définitions que nous présentons maintenant établissent une distinction entre ces deux aspects de l'autonomie qui définissent deux dimensions essentielles.

1.2 Dimensions de l'autonomie

Relativement aux deux sens évoqués précédemment, les actions de l'agent peuvent être classifiées selon deux dimensions [Bradshaw *et al.* 2004] :

- Une dimension descriptive qui décrit les actions que l'agent est capable de faire,
- Une dimension prescriptive que l'agent est autorisé à faire ou obligé de faire.

Si on s'intéresse à la *dimension descriptive*, on a en premier lieu les *actions potentielles* qui représentent toutes les actions réalisables dans toutes les situations. Ce sont ici les actions

réalisables en termes de conception de l'agent. Ensuite, on considère les *actions possibles* qui sont les actions réalisables par un agent donné dans une situation donnée. Enfin, le dernier type d'actions est appelé *actions réalisables*. Une action est réalisable si un agent a la capacité de l'accomplir, cette capacité étant fonction des compétences de cet agent (opérateur humain ou robot) et des conditions de réalisation de l'action.

La *dimension prescriptive* est gérée par des règles définissant des permissions et des obligations. On distingue ainsi des *actions permises* et des *actions requises*. Les actions permises sont soumises à des autorisations positives pour les actions que l'agent est autorisé à faire et des autorisations négatives pour les actions que l'agent n'est pas autorisé à faire. On retrouve la même distinction pour les actions requises, à savoir des obligations positives pour les actions que l'agent est tenu d'accomplir et des obligations négatives pour celles qui peuvent être ignorées.

Cette dimension prescriptive permet d'obtenir un cadre très précis pour le domaine d'action d'un agent. Dans un contexte Homme-robot, cela contribue à garantir à l'opérateur humain que le robot agira toujours dans les limites qui lui ont été fixées.

La distinction de ces deux dimensions de l'autonomie trouve une première application dans le domaine des systèmes multi-agents.

1.3 Autonomie dans les systèmes multi-agents

L'étude de ce domaine permet de définir des caractéristiques essentielles d'un système autonome. Un agent peut être défini comme un système informatique, situé dans un environnement, capable d'agir de façon autonome et flexible de façon à atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu [Jennings *et al.* 1998].

Cette définition fait apparaître des problématiques communes aux définitions retenues dans le domaine de la robotique et de l'interaction Homme-robot comme la situation dans l'environnement, l'autonomie et la flexibilité. La situation dans l'environnement est à rapprocher du concept de *situation awareness*, à savoir la capacité à percevoir de l'information sur l'environnement et à agir sur celui-ci. La flexibilité traduit le fait pour l'agent d'être capable de répondre à temps, d'être proactif et social. Le dernier point, qui nous intéresse particulièrement ici, concerne l'autonomie en tant que capacité de l'agent à agir sans intervention directe de l'opérateur humain (ou d'un autre agent) et à avoir un contrôle sur ses propres actions et son état interne.

Carabelea *et al.* [2003] utilisent l'approche VOYELLES, proposée par Demazeau [1995] pour définir l'autonomie dans les systèmes multi-agents. Les auteurs distinguent ainsi plusieurs formes d'autonomie :

- La A-autonomie fait référence au fait qu'un agent est autonome par rapport à lui-même s'il a plusieurs comportements disponibles et s'il peut en choisir un.
- La E-autonomie fait référence au fait qu'un agent est situé dans un environnement mais n'est pas contrôlé par celui-ci.
- La I-autonomie concerne les interactions entre les agents et la notion d'adoption de but. Un agent X est autonome par rapport à un agent Y pour l'adoption d'un but G si X peut refuser l'adoption du but G de Y, c'est-à-dire que si l'agent Y sollicite l'agent X pour prendre en charge un but G initialement alloué à Y, l'agent X peut refuser de prendre en charge ce but.

- La O-autonomie est en relation avec l'organisation et un agent est O-autonome par rapport à une norme s'il peut violer cette norme.
- La U-autonomie caractérise le fait qu'un agent est autonome par rapport à l'utilisateur pour choisir une action à exécuter s'il peut réaliser le choix de cette action sans intervention de l'utilisateur.

Pour cette classification, les auteurs retiennent le fait que la A-autonomie est peu étudiée. Dans le cadre de notre étude, cette forme d'autonomie correspond à l'autonomie ajustable et est donc au centre de notre problématique. La O-autonomie est à rapprocher de l'axe que nous avons retenu pour définir l'autonomie et qui concerne les autorisations accordées au robot. La I-autonomie et la U-autonomie sont à rapprocher du contrôle coopératif Homme-robot. La définition de la I-autonomie relativement à l'adoption de but est complétée par une approche de l'autonomie basée sur la délégation.

1.4 Autonomie et délégation

Castelfranchi et Falcone [1998] proposent une approche de l'autonomie en termes de délégation et d'adoption de but selon laquelle un agent inclut dans ses buts la réalisation d'actions par un autre agent. Les auteurs définissent l'autonomie comme la possibilité d'adopter un comportement inattendu (incluant un refus possible) qui diffère du comportement initialement requis (convenu ou non). L'agent autonome peut être autorisé ou non à accomplir un tel comportement. Dans la définition de l'autonomie, les auteurs établissent une distinction entre [Falcone et Castelfranchi 2001] :

- la possibilité pratique : elle regroupe les actions que le robot est capable d'accomplir,
- la possibilité déontologique : elle regroupe les actions que le robot est autorisé à accomplir.

Cette distinction est à rapprocher des deux dimensions présentées précédemment : la dimension descriptive et la dimension prescriptive. Une autre distinction à établir, dans le but de proposer une approche de l'autonomie, consiste à replacer la notion d'autonomie relativement à celle d'automatisation d'un système technique ou d'intelligence.

1.5 Automatisation, autonomie et intelligence

Steels [1995] propose une définition de l'autonomie d'agents intelligents inspirée d'un point de vue biologique. Il est ainsi établi une distinction entre agents automatiques, agents autonomes et agents intelligents. L'auteur part de la notion de base selon laquelle l'autonomie signifie être relativement indépendant de quelqu'un ou quelque chose.

L'auteur discute ensuite relativement aux deux sens étymologiques du mot autonomie, à savoir la capacité à prendre soin de soi et la capacité à ne pas dépendre de quelqu'un. Le premier cas est assimilé aux systèmes automatiques qui sont capables d'appliquer des règles mais pas de les élaborer. De tels systèmes, en prenant l'exemple de robots mobiles peuvent se diriger en suivant un chemin donné et éventuellement corriger les effets de perturbations extérieures. Le second cas concerne les systèmes dits autonomes, considérés comme des systèmes pouvant développer les lois et stratégies régissant leurs comportements. En reprenant l'exemple des robots mobiles, ils sont à présent capables de déterminer leur itinéraire et de le suivre.

Le point intéressant de cet article est la hiérarchie établie entre les systèmes automatiques et les systèmes autonomes selon laquelle un système autonome est un système automatique. Cette hiérarchie est logique car un robot ne peut pas élaborer des règles et des stratégies pour réguler des comportements qu'il ne maîtrise pas. La réciproque n'est cependant pas vraie, c'est-à-dire qu'un système automatique n'est pas nécessairement un système autonome.

Ce point permet cependant d'amener une discussion sur le degré de liberté accordé au robot par l'opérateur. En effet, dans ce cas de figure, l'autonomie accordée par l'opérateur au robot ne correspond pas nécessairement à l'autonomie dont il peut faire preuve dans une situation donnée. Cette hiérarchie montre l'importance d'une représentation correcte du robot et de ses capacités pour l'opérateur ou tout autre agent. Dans le cadre d'un système complexe, cette représentation peut être communiquée et partagée entre tous les agents afin d'accroître la cohésion du système. Par ailleurs, le cas d'un opérateur humain qui enverrait intentionnellement le robot dans une situation qu'il ne peut pas maîtriser ne concerne pas notre étude, ce point posant notamment le problème de la responsabilité de l'opérateur dans l'activité de supervision du robot.

L'auteur conclut son propos par le fait que les robots actuels ne sont pas autonomes, relativement au sens considéré ici de l'autonomie, car ils ne possèdent pas leurs propres objectifs ou motivations, seulement ceux de leurs concepteurs.

Ces premières approches de l'autonomie sont issues pour la plupart du domaine de l'intelligence artificielle et des systèmes multi-agents et ne montrent pas de hiérarchie entre différents niveaux possibles d'autonomie pour un système. Le domaine d'application visé nécessite de recourir à une approche de l'autonomie qui se fondera sur les catégories d'activité réalisables par le système robotisé. La section suivante s'attache à décrire des définitions de l'autonomie basées sur celles présentées précédemment et appliquées au domaine des systèmes robotisés.

1.6 Définitions de l'autonomie pour les systèmes robotisés

Dalgarrondo [2003] définit l'autonomie comme la capacité à résister à des perturbations externes en utilisant ses ressources internes. Pour l'auteur, l'autonomie est liée aux :

- Capacités du robot (morphologie, perception, décision, action...),
- Caractéristiques de l'environnement auquel le robot est confronté,
- Tâches à effectuer.

Cette définition de l'autonomie peut être rapprochée de la résilience comme la capacité à gérer des perturbations. Un système résilient est un système autonome dans cette acception de l'autonomie, c'est-à-dire pouvant choisir les lois et les actions permettant de résoudre un problème. Cependant, la réciproque n'est pas vraie, c'est-à-dire qu'un système autonome n'est pas un système résilient ou ne vérifie que de façon partielle la définition de la résilience organisationnelle. En effet, pour cette définition de l'autonomie, les aspects d'anticipation, de récupération face à des défaillances ne sont pas pris en compte. On est pour ce type de système dans une autonomie plutôt réactive.

L'auteur considère qu'un système est autonome dès l'instant où il est capable de choisir les lois à appliquer sans les développer. Un robot sélectionnant son comportement en fonction des perceptions de son environnement et de règles déterministes écrites *a priori* peut donc être considéré comme un robot autonome.

L'axe relatif à l'environnement rend le concept d'autonomie plus complexe à définir. En effet, être autonome implique une indépendance du système vis-à-vis des contraintes de l'environnement mais également une dépendance car le système va puiser dans l'environnement les informations nécessaires pour agir. Deux capacités, l'adaptation et l'apprentissage, permettent de compléter la définition de l'autonomie.

L'adaptation est la capacité de maintenir des performances au niveau requis face à des variations de l'environnement, des tâches à effectuer ou des capacités du système.

L'apprentissage est un processus d'acquisition de connaissances permettant au système de gérer toute nouvelle situation imprévue à partir d'autres connaissances qui ont permis de résoudre des situations similaires.

Ces trois niveaux du concept d'autonomie (choix des lois à appliquer, adaptation à des variations, apprentissage de connaissances) peuvent être rapprochés des trois niveaux d'autonomie de la classification suivante [Zeigler 1990] :

1. Capacité à accomplir des objectifs imposés.
2. Capacité à s'adapter à des modifications de l'environnement
3. Capacité à développer ses propres objectifs.

Les trois axes (capacités du robot, caractéristiques de l'environnement, tâches à effectuer) utilisés par Dalgalarondo [2003] pour définir l'autonomie peuvent être rapprochés de ceux proposés par le groupe de travail ALFUS (Autonomy Levels For Unmanned Systems) qui propose une définition de l'autonomie appliquée aux véhicules non habités.

1.7 L'autonomie dans les véhicules non habités

Aux Etats-Unis, le National Institute of Standards and Technology (NIST) travaille actuellement sur un projet de standardisation du concept d'autonomie d'un système automatisé. Ce projet, baptisé ALFUS pour Autonomy Levels For Unmanned Systems a commencé par définir précisément la notion d'autonomie comme étant la capacité pour un système automatisé et plus précisément un véhicule terrestre sans pilote, de percevoir, d'analyser, de communiquer et de prendre des décisions afin d'accomplir des objectifs assignés par un opérateur humain au travers d'interactions Homme-robot [Huang *et al.* 2004].

Ce référentiel a pour but de déterminer des critères pertinents et des indicateurs mesurables pour définir les niveaux d'autonomie en s'articulant autour de 3 axes (Figure 16) : la complexité de la mission, la difficulté de l'environnement et le niveau d'interaction Homme-machine [Huang *et al.* 2004]. Chacun de ces axes est caractérisé par un certain nombre d'indicateurs.

La complexité de la mission est définie par quatre classes d'indicateurs objectifs :

- le nombre et le type des tâches définissant la mission ainsi que les interactions entre ces tâches,
- le niveau de coordination au sein du système défini par le nombre d'entités présentes et par les interfaces utilisées (types des informations échangées, fréquence des échanges...),
- la performance du système dans la réalisation de la mission évaluée *a priori*, pendant la mission et *a posteriori*,

- les exigences de perception et de représentation du monde évaluées par la conscience de la situation requise et la dépendance vis-à-vis des informations disponibles.

La complexité de la mission est liée à la complexité de l'environnement. En effet, les modifications de l'environnement comme les conditions météorologiques par exemple peuvent augmenter la complexité de la mission en rendant impraticable un terrain normalement sans danger. La complexité de l'environnement est définie par des indicateurs renseignant sur la nature de l'environnement (statique, dynamique, rural, urbain...), du terrain (type de sol, dénivelé...) et sur les obstacles présents (fréquence, densité, nature...).

Le troisième axe représente l'interaction Homme-robot qui est quantifiée par des indicateurs répartis en 4 groupes majeurs : interventions de l'opérateur, charge de travail, compétences de l'opérateur et le ratio opérateur / nombre de robots contrôlés . Plus le niveau de l'axe évaluant l'interaction Homme-robot est bas, plus le système doit être autonome. Cependant, la prise en compte de l'environnement de l'interaction Homme-machine n'apparaît pas dans cet axe. En effet, une communication limitée en termes de possibilités de dialogue ou peu fiable peut dégrader le niveau d'autonomie de même qu'une mauvaise interprétation des informations échangées.

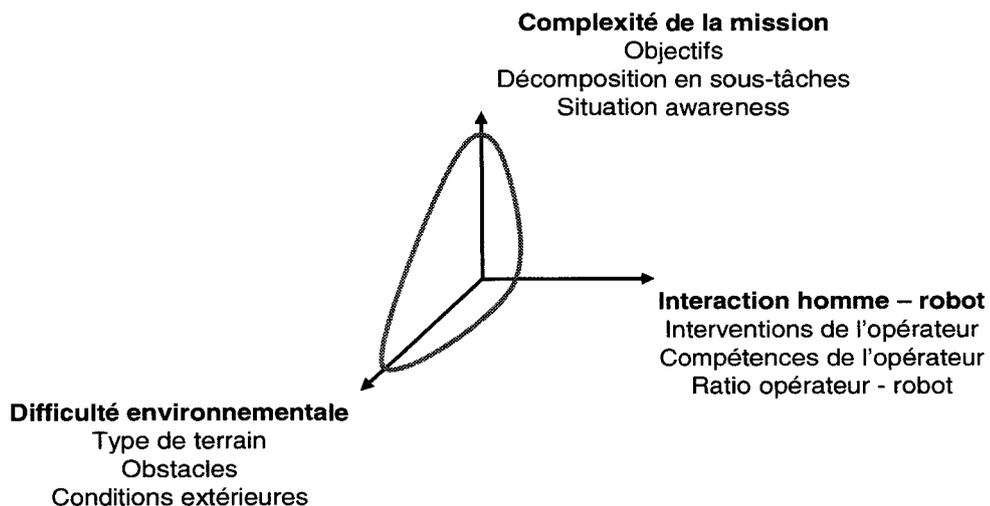


Figure 16. Représentation du modèle ALFUS (d'après [Huang *et al.* 2004]).

La Figure 16 représente les 3 axes du modèle ALFUS qui permet de représenter l'autonomie du système comme un vecteur de valeurs et non une valeur unique. Chacun des trois axes peut donc être divisé en plusieurs axes correspondant aux valeurs les définissant. De façon générale, plus la mission que le robot est capable d'effectuer est complexe, plus le niveau d'autonomie requis de ce robot est considéré comme étant élevé. On a la même interprétation pour l'environnement de la mission, à savoir que plus l'environnement dans lequel circule le robot est complexe, plus le niveau d'autonomie requis est élevé de façon à pouvoir appréhender cet environnement. Pour l'axe concernant l'interaction Homme-machine, on le considère de façon inversement proportionnelle, à savoir que plus l'interaction est faible, plus le robot doit être autonome.

1.8 Discussion

L'autonomie a été présentée selon deux approches majeures. La première, inspirée des travaux en systèmes multi-agents, définit l'autonomie d'un agent relativement à un but poursuivi, à ses capacités ou à des normes. La seconde approche définit l'autonomie en fonction des catégories d'activité réalisables par le système. Cette approche n'est plus centrée sur un agent en particulier mais sur le système global. Dans la perspective de l'autonomie ajustable, il est intéressant de concilier ces deux niveaux de définition. Le Tableau 5 dresse un parallèle entre les caractéristiques des systèmes autonomes et celles des systèmes résilients. L'adaptation et la contribution de l'ensemble des agents à la gestion des événements imprévus sont les notions à mettre en avant dans la conception de systèmes résilients.

Systèmes résilients	
Adaptation à des événements imprévus	Résilience locale et résilience globale
Résilience globale dépend de la résilience des agents du système	Interactions croisées entre les constituants du système [Hollnagel & Woods 2006]
Compromis entre procédures définies et capacités d'adaptation	Résilience est le résultat d'une sécurité contrainte et d'une sécurité gérée [Morel 2007]
Systèmes autonomes	
Adaptation par rapport à des événements imprévus	Adaptation à des modifications de l'environnement [Zeigler 1990] Autonomie et adaptation évoluent simultanément [Dalgarrondo 2003]
Autonomie dans les systèmes multi-agents	Prise en compte de l'autonomie de chacun des agents du système [Carabelea <i>et al.</i> 2003] Autonomie définie de façon locale au niveau des agents
Autonomie globale du système	Autonomie du système global dépend de l'autonomie des agents

Tableau 5. Récapitulatif des approches de l'autonomie par rapport au concept de résilience.

Des différentes définitions passées en revue, on peut définir une approche de l'autonomie basée sur l'expression des compétences, des capacités du système et des prescriptions qui lui sont accordées afin de réaliser différents niveaux d'activité [Zieba *et al.* 2007b, Zieba *et al.* 2007c, Zieba *et al.* 2009]. La définition proposée met en relation les aspects sémantiques de l'autonomie issus des travaux en systèmes multi-agents et les catégories d'activité issues de définitions appliquées.

Les compétences font référence à la technologie et aux algorithmes nécessaires pour traiter une situation ainsi qu'à l'existence de procédures permettant de réaliser une action. Elles font donc partie de la définition du système. Les capacités sont susceptibles d'évoluer au cours du temps. Les capacités représentent la possibilité pour un agent de mettre en œuvre une compétence donnée à un instant donné. Elles sont soumises à des aléas comme la charge de travail de l'agent décideur (l'opérateur humain ou le robot), des ressources disponibles ou des domaines de fonctionnement des différents algorithmes. Les prescriptions définissent l'ensemble des actions que le système est autorisé ou interdit à accomplir ou des décisions qu'il est autorisé ou interdit à prendre.

Ces trois aspects sémantiques se retrouvent dans chacune des trois catégories d'activité que l'on définit et que l'on peut rapprocher des niveaux opérationnel, tactique et stratégique. La première de ces catégories correspond à la réalisation d'un objectif donné, c'est-à-dire à l'enchaînement des tâches nécessaires à la réalisation de celui-ci. La seconde concerne la sélection d'une alternative appropriée à la réalisation d'un objectif donné et correspond à une autonomie décisionnelle. La troisième catégorie consiste à définir un plan d'action permettant la réalisation d'un objectif donné en prenant en compte les aspects sémantiques de l'agent.

L'autonomie définie selon les trois aspects sémantiques et selon les trois niveaux d'activité décrits servira de cadre de spécification au contrôle coopératif Homme-robot. Cependant, les catégories d'activité prises en compte dans cette définition sont génériques. L'opérationnalisation de cette définition doit reposer sur l'exploitation de classifications des niveaux d'autonomie existantes dans le domaine des systèmes Homme-machine et plus précisément dans les missions robotisées.

2 Classifications des niveaux d'autonomie

De façon générale, un niveau d'autonomie élevé pour un système robotique correspond à un niveau élevé d'automatisation. Les niveaux d'automatisation sont définis par rapport aux catégories d'activité du système, depuis l'acquisition et l'analyse des informations aux fonctions de décision et d'action.

2.1 Niveaux d'automatisation des fonctions de traitement de l'information

Parasuraman *et al.* [2000] adoptent un modèle simplifié du traitement de l'information par un opérateur humain en quatre étapes (Figure 17 (a)). Les étapes de ce modèle sont à rapprocher du modèle de Rasmussen révisé par Hoc [1996] (cf. section 4.2 du chapitre 1).

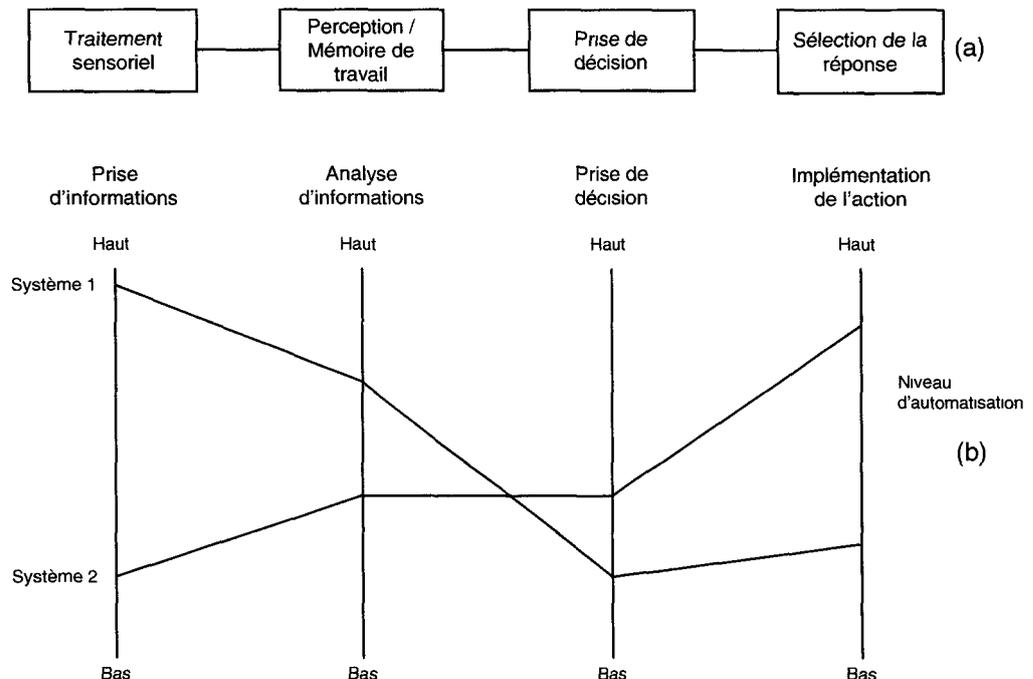


Figure 17. Niveau d'automatisation des catégories du modèle de traitement de l'information d'un opérateur humain (d'après [Parasuraman *et al.* 2000]).

A partir de ce modèle de traitement de l'information par un opérateur humain, Parasuraman *et al.* [2000] proposent un modèle des fonctions du système pouvant être automatisées (Figure 17 (b)). Chaque catégorie peut avoir son propre degré d'automatisation, ce qui permet d'obtenir différentes configurations pour le système traduites par différents modes d'autonomie. De la même façon que pour le modèle de l'opérateur humain, l'automatisation des activités du modèle peut être rapprochée des architectures de contrôle hybrides (cf. section 2.4 du chapitre 1). En effet, les fonctions de prise d'informations et d'implémentation de l'action peuvent être associées à des comportements réactifs alors que les fonctions d'analyse d'informations et principalement de prise de décision font appel à des comportements délibératifs (cf. section 2 du chapitre 1).

Les niveaux d'automatisation possibles pour ces catégories sont définis en fonction des quantités respectives du contrôle manuel et du contrôle automatique dans l'exécution des tâches correspondantes. L'allocation des tâches entre l'opérateur humain et le système automatisé peut correspondre à différents modèles de contrôle partagé par exemple [Hoppenot et Colle 2002].

Sheridan [1999] applique la définition de dix niveaux d'automatisation aux fonctions d'acquisition et d'analyse de l'information (Tableau 6).

Plus autonome	10	Le système présente les informations formatées sans possibilité de prendre en compte d'autres informations.
	9	Le système présente les informations formatées et autorise la prise en compte d'autres sources.
	8	Le système intègre et présente les informations de façon cohérente en y associant un indice de confiance.
	7	Le système intègre et présente les informations de façon cohérente.
	6	Le système répond aux questions posées sans réduction de syntaxe.
	5	Le système répond aux questions posées par une syntaxe réduite.
	4	Le système guide l'opérateur humain vers une information particulière.
	3	Le système réduit le nombre de sources d'informations possibles.
	2	Le système suggère plusieurs sources d'informations.
	Moins autonome	1

Tableau 6. Niveaux d'automatisation pour les fonctions d'acquisition et d'analyse de l'information [Sheridan 1999].

Les mêmes niveaux peuvent être appliqués aux fonctions de décision et d'action en les complétant d'un niveau supplémentaire proposé par Inagaki *et al.* [1998] (Tableau 7).

Ces niveaux d'automatisation font apparaître l'évolution de la relation entre l'opérateur humain et le robot. L'opérateur humain passe en effet du statut d'élément indispensable à la conduite de la mission (niveau 1) à celui de superviseur observant les décisions du robot (niveau 10). Inagaki *et al.* [1998] complète les niveaux d'automatisation par un niveau supplémentaire, noté 6.5 dans lequel le système automatisé prévient l'opérateur humain de l'exécution automatique d'une action. Ce niveau supplémentaire réduit les possibilités de *surprises* dues à l'automatisation par rapport au niveau 7 et le délai de réponse par rapport au niveau 6. Cette échelle se réfère principalement à l'automatisation des fonctions de décision et d'action dans un système Homme-machine.

Plus autonome	10	Le système agit de façon totalement autonome, en ignorant l'opérateur humain.
	9	Le système n'informe l'opérateur humain que s'il le décide.
	8	Le système n'informe l'opérateur humain de l'action que si celui-ci en fait la demande.
	7	Le système exécute automatiquement cette suggestion puis en informe l'opérateur humain.
	6.5 Le système exécute automatiquement l'action après avoir informé l'opérateur humain de ce qu'il va faire.	
	6	Le système alloue à l'opérateur un délai de réponse avant une exécution automatique.
Moins autonome	5	Le système exécute cette suggestion si l'opérateur humain approuve.
	4	Le système suggère une alternative.
	3	Le système réduit la sélection à un sous-ensemble plus pertinent.
	2	Le système propose toutes les alternatives de décision ou d'action.
	1	Le système n'offre aucune assistance, l'opérateur humain est en charge de toutes les décisions et actions.

Tableau 7. Niveaux d'automatisation pour les fonctions de décision et d'action [Sheridan 1992 ; Inagaki et al. 1998].

Les catégories d'activité proposées dans le modèle de Parasuraman se retrouvent dans le modèle de prise de décision dans le domaine militaire développé par Boyd [1996]. Le modèle Observe, Orient, Decide, Act (OODA) a été développé afin de comprendre le processus de prise de décision de l'ennemi et à terme, de le perturber. Il est composé des étapes d'observation de la situation, d'orientation de la prise de décision, de décision et d'action. Le modèle met en évidence l'influence des caractéristiques propres à un individu dans les étapes de décision, d'action et d'observation (Figure 18). Cette étape d'orientation est elle-même influencée par plusieurs facteurs internes et externes : culture, expérience, informations nouvelles... et par la phase d'observation. Les boucles de contrôle et de retour d'informations présentes à chacune des étapes montrent à la fois l'aspect séquentiel du processus et l'interdépendance de ces étapes.

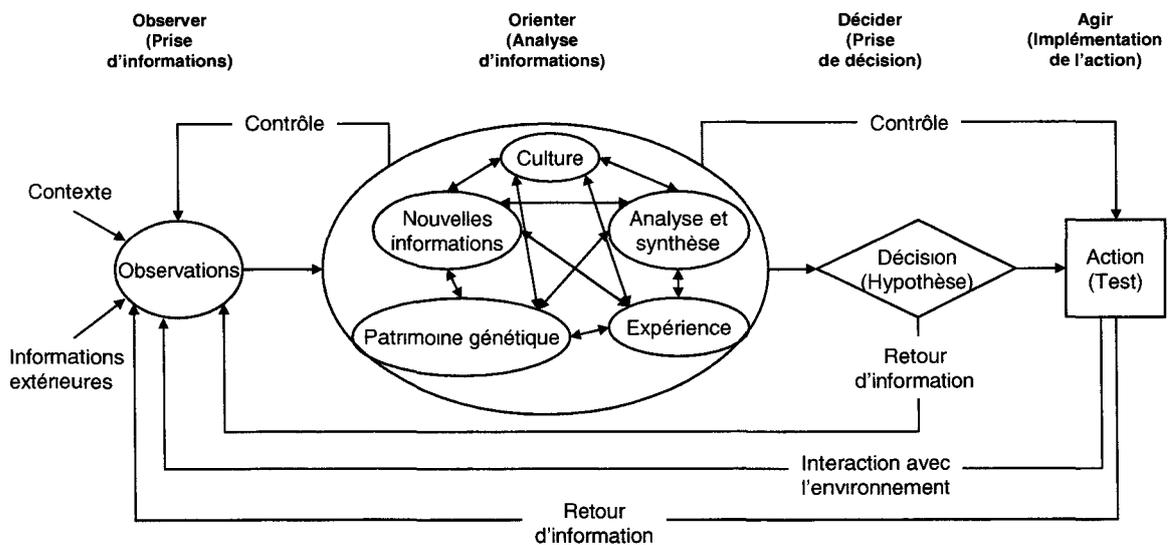


Figure 18. Modèle de prise de décision "Observer, Orienter, Décider, Agir" [Boyd 1996].

Ce modèle de prise de décision est à l'origine de classifications de modes d'autonomie appliquées au domaine de la robotique.

2.2 Modes d'autonomie et robotique

2.2.1 Modes d'autonomie et missions robotisées

Dans le cadre des missions robotisées, plusieurs classifications existent pour la définition de modes d'autonomie qui sont généralement inspirées de l'échelle de Sheridan [1992] ou du modèle de Parasuraman *et al.* [2000]. Proud *et al.* [2003] propose une classification qui définit le niveau d'autonomie que devrait atteindre le système. Cette classification distingue 8 niveaux d'autonomie appliqués au contexte militaire et sont très proches des degrés d'automatisation du modèle de Sheridan. Dans les niveaux 1 et 2, l'opérateur humain reste prioritaire par rapport au système automatisé. Dans les niveaux 3 à 5, le système automatisé et l'opérateur humain interagissent. Dans les niveaux 6 à 8, le système automatisé opère indépendamment de l'opérateur humain et celui-ci a un accès de plus en plus restreint aux informations et aux possibilités d'action. Les activités propres à chaque niveau d'autonomie sont décrites selon le modèle OODA [Boyd 1996].

Deux autres classifications exploitent ce dernier modèle ainsi que le modèle de Parasuraman *et al.* [2000] afin d'établir des niveaux correspondant à des missions robotisées exploitant différentes plates-formes. Clough [2002] propose le modèle ACL (Autonomous Control Levels) organisé en 11 niveaux décrivant différents types de missions et de plates-formes robotiques, depuis un robot téléopéré à plusieurs robots coopératifs. Ces 11 niveaux sont déclinés selon des catégories d'activité semblables à celles du modèle de Parasuraman : perception et conscience de la situation, analyse et prise de décision, communication et coopération. La description de plates-formes robotiques et de missions se retrouve également dans la classification établie par le programme américain FCS (Future Combat Systems) [Kamsickas et Ward 2003] (cité dans [Dalgalarondo 2003]). Ces niveaux sont au nombre de dix et vont de la téléopération filaire à la réalisation de missions en mode autonome avec des buts individuels et différés. Chacun de ces niveaux est décrit selon les capacités de perception, de décision et d'action.

Ces premières classifications sont définies au niveau des tâches et des objectifs du système Homme-robot de façon globale. D'autres classifications prennent en compte les interactions Homme-machine de façon plus précise en associant à chaque mode d'autonomie un paradigme d'interaction Homme-robot différent.

2.2.2 Modes d'autonomie et modes d'interaction Homme-robot

Dalgalarondo [2003] définit huit modes d'interaction Homme-robot pour la gestion de l'autonomie décisionnelle du robot :

1. Commandes déportées ou manuelles : dans ce mode, l'opérateur humain contrôle en continu le robot.
2. Contrôle supervisé : l'opérateur humain décompose la mission en une succession de tâches que le robot peut accomplir seul.
3. Commande de comportements : c'est une variante du contrôle supervisé. Dans ce mode, les tâches à accomplir sont remplacées par des comportements sensorimoteurs.
4. Echange de contrôle : l'opérateur humain contrôle par intermittence le robot.
5. Contrôle partagé : l'opérateur humain ne contrôle qu'une partie des fonctions autonomes du robot.

6. Autonomie ajustable : il s'agit d'un modèle d'interaction Homme-robot dans lequel le niveau d'autonomie est choisi en fonction de la situation à l'initiative du robot ou de l'opérateur humain.
7. Contrôle coopératif : dans ce mode, l'opérateur humain et le robot sont considérés comme des partenaires et entament un dialogue grâce auquel le robot peut demander conseil à l'opérateur humain.
8. Initiatives mixtes : dans ce mode, l'opérateur humain et le robot joignent leurs capacités afin d'accomplir un but commun. Le dialogue instauré entre eux est continu et de haut niveau. Les problématiques inhérentes à ce mode de contrôle concernent le traitement de la parole et l'assimilation d'ordres complexes.

Cette classification peut donner lieu à une discussion concernant notamment les modes 6 à 8. En effet, dans l'étude du contrôle coopératif exploitant des principes d'autonomie ajustable, il ne nous apparaît pas opportun de considérer l'autonomie ajustable comme un niveau d'autonomie ou comme un mode d'interaction Homme-robot.

L'autonomie ajustable peut être définie comme la propriété d'un système possédant plusieurs niveaux d'autonomie et permettant de commuter entre ces différents niveaux. L'autonomie ajustable permet alors de commuter dynamiquement entre les niveaux 1 à 5.

De même, le contrôle coopératif et les initiatives mixtes doivent être plutôt considérés comme des architectures de contrôle pouvant donc contenir des mécanismes d'autonomie ajustable. Ces architectures de contrôle doivent permettre à l'opérateur humain et au robot de gérer en commun les buts à atteindre et les actions à réaliser.

L'interaction entre les agents d'un système résilient contribue à la récupération de l'occurrence d'événements imprévus par l'élaboration d'alternatives de fonctionnement. Ces agents doivent être capables de s'adapter à l'alternative de fonctionnement sélectionnée. L'intégration de principes d'autonomie ajustable à une architecture de contrôle coopératif permet en effet de capitaliser les échanges et d'affiner les critères de décision et d'ajustement d'autonomie.

3 L'autonomie ajustable

3.1 Définition de l'autonomie ajustable

De nombreuses définitions existent pour l'autonomie ajustable. Afin de cerner concrètement l'utilité d'un tel procédé dans le cadre de l'interaction Homme-robot, on peut commencer en citant l'exemple suivant.

Dans le cadre de simulations de recherche et d'assistance aux victimes en milieu urbain, le problème de la rupture de communication entre le robot et l'opérateur humain est évoqué [Drury *et al.* 2003]. Dans ce cas de figure, le robot cesse de fonctionner jusqu'au rétablissement de la communication. L'intérêt de l'autonomie ajustable est ici évident. En effet, un ajustement du niveau d'autonomie permettrait au robot de continuer la mission sans l'aide de l'opérateur humain. Plusieurs points peuvent être abordés à partir de cet exemple comme la détection des défaillances par le robot et la conception d'algorithmes pouvant réagir à ces défaillances. L'autonomie ajustable contribue dans ce cas à l'aspect proactif d'un système résilient en permettant la détection voire l'évitement de défaillances.

Le concept d'autonomie ajustable est proche de celui d'automatisation adaptative (adaptive automation) [Inagaki 2003]. Il établit que le contrôle de fonctions peut être affecté dynamiquement à l'opérateur humain ou au robot selon des critères liés à l'environnement, à la charge de travail de l'opérateur et aux performances du système Homme-machine.

L'autonomie ajustable peut qualifier un système possédant plusieurs niveaux d'autonomie et dans lequel l'opérateur humain a le contrôle total du changement de niveau. Ensuite, dans chacun des modes, le robot a un certain contrôle sur les différents comportements en fonction du mode d'autonomie choisi et l'opérateur humain ne peut qu'influencer le comportement du robot au travers des commandes de l'interface [Goodrich *et al.* 2001]. Cette définition de l'autonomie ajustable nous semble incomplète car elle ne prend pas en compte l'aspect dynamique de la situation ou les critères de charge de travail de l'opérateur nécessitant un ajustement de l'autonomie. De plus, le changement de niveau d'autonomie est ici laissé uniquement à l'initiative de l'opérateur humain.

Nous considérons que cette dernière restriction ne permet pas la définition d'un système d'autonomie ajustable réellement efficace. En effet, si un ajustement du niveau d'autonomie est nécessaire suite à une négligence de l'opérateur, il est possible que celui-ci ne soit pas disponible ou ne dispose pas des données nécessaires pour le réaliser. Le robot doit donc pouvoir ajuster lui-même son niveau d'autonomie. Néanmoins cet auto-ajustement est soumis aux prescriptions délimitant le comportement du robot et nécessite par exemple une autorisation préalable de l'opérateur humain. Les ajustements d'autonomie à l'initiative d'un agent humain ou d'un agent technique sont donc soumis aux autorisations de décision relatives à chacun de ces agents.

La définition que nous retenons est celle qui est la plus proche de l'interprétation que nous avons du concept d'autonomie ajustable, à savoir la propriété d'un système autonome à changer son niveau d'autonomie parmi plusieurs pendant le fonctionnement du système. L'opérateur humain, un autre système ou le système autonome lui-même peut ajuster le niveau d'autonomie du système autonome [Dorais *et al.* 1999].

Dans cette définition, le système autonome représente pour nous le robot mobile terrestre. L'autre système mentionné pouvant ajuster le niveau d'autonomie peut être assimilé à un calculateur gérant la répartition des tâches. En fonction des choix de développement et de l'architecture choisie, ce système peut être déporté sur l'unité de commande distante du robot ou être intégré au robot lui-même.

3.2 Applications de l'autonomie ajustable

3.2.1 Autorisation de décision

La commutation entre les différentes tâches d'un décideur donné est liée à l'autorisation à démarrer et à stopper un comportement autonome [Goodrich *et al.* 2001]. Les auteurs considèrent qu'un système automatisé doit faciliter :

- des transitions fluides entre les tâches réalisées par la machine et celles qui le sont par l'opérateur humain. Cela se traduit par la conservation du même niveau de performance lors d'une transition d'un niveau d'autonomie à un autre ou d'un transfert de contrôle entre l'opérateur humain et le robot grâce au maintien de la conscience de la situation pour ces deux décideurs. L'autonomie ajustable peut être considérée comme un moyen de maintenir le système sous contrôle malgré l'occurrence de

perturbations tout en maintenant un niveau de performance suffisant, i.e. un moyen de contribuer à la résilience du système.

- une allocation non ambiguë de l'autorisation à commuter entre ces différentes tâches.

Une distinction est établie entre les systèmes dans lesquels l'opérateur humain choisit de déléguer une tâche à la machine et les systèmes où la machine prend le pas sur la prise de décision de l'opérateur humain pour exécuter une tâche. Un système conçu selon des principes d'autonomie ajustable doit permettre ces deux cas de figure.

Pour évoquer cette capacité à démarrer ou à stopper un comportement autonome, on peut introduire la notion d'autorisation de décision (*decision authority*) [Inagaki 2003]. L'auteur évoque la possibilité de concevoir des systèmes dans lesquels les stratégies d'invocation des fonctions automatisées sont basées sur un ensemble de règles déterministes mais montre que le problème de la fiabilité ne rend pas cette solution efficace.

3.2.2 Autonomie ajustable et fiabilité

Les problèmes de fiabilité peuvent être dus à des problèmes matériels, logiciels voire humains... Il est irréaliste de parvenir à développer des algorithmes infaillibles ou pouvant gérer toutes les erreurs susceptibles de se produire. Il est ainsi préférable de concevoir des systèmes pouvant récupérer des défaillances connues et identifiables et pouvant simplement reconnaître des défaillances plus rares [Firby 1989]. Ces types de défaillances sont à rapprocher des catégories de menaces, régulières et irrégulières, face auxquelles un système peut être résilient ou non. Un système conçu selon des principes d'autonomie ajustable peut alors adopter un mode de fonctionnement adapté à la défaillance identifiée.

La connaissance des défaillances pouvant se produire et la capacité de les détecter permet au robot mobile de construire un modèle du système qu'il contrôle. Grâce à ce modèle, il peut identifier les causes de symptômes observés et proposer une solution de façon à pouvoir continuer la mission. Une approche de l'autonomie ajustable basée sur cette utilisation de diagnostic à base de modèle est ainsi proposée [Dorais *et al.* 1999]. Ce type d'approche laisse supposer que le robot a les compétences et les autorisations nécessaires pour intervenir au niveau des composants du système et ainsi ajuster son niveau d'autonomie. L'approche suivante propose quelques éléments de réponse sur ces politiques d'autorisations et d'obligations.

3.2.3 Autonomie ajustable et autorisations

L'ajustement de l'autonomie doit être réalisé de façon continue et transparente afin de répondre aux exigences de performance [Bradshaw *et al.* 2004]. Le but de l'autonomie ajustable est de maintenir le système à un niveau d'équilibre entre commodité (le fait de pouvoir déléguer chaque tâche au système) et confort d'utilisation (le fait de pouvoir garder le contrôle des tâches pour lesquelles on ne considère pas le système performant ou des tâches que l'opérateur humain souhaite accomplir).

Les auteurs proposent plusieurs types d'ajustement du niveau d'autonomie en rapport avec les deux dimensions définissant l'autonomie, à savoir la dimension descriptive (actions que l'agent est capable de faire) et la dimension prescriptive (actions que l'agent est autorisé à faire). Cette dernière dimension est déclinée en quatre prescriptions : des autorisations positives (A^+) et négatives (A^-) et des obligations positives (O^+) et négatives (O^-). Une autorisation positive définit une action que l'agent est autorisé à accomplir alors qu'une autorisation négative correspond à une interdiction. Une obligation positive correspond à une

action que l'agent est obligé d'accomplir alors qu'une obligation négative définit une action dont la réalisation par l'agent n'est pas obligatoire. L'autonomie ajustable peut être alors vue comme un ajustement des autorisations accordées à l'agent, de ses obligations ou des actions qu'il est capable d'accomplir.

3.2.4 Autonomie ajustable et négligence de l'opérateur

L'autonomie d'un robot peut être considérée en se focalisant sur l'axe concernant le degré de liberté accordé au robot et en se plaçant du point de vue de l'opérateur, ce qui se traduit par le degré de négligence de l'opérateur envers le robot [Goodrich *et al.* 2001]. Le degré de négligence dans cet article est assimilé aux temps de réponse de l'opérateur. Ces temps de réponse, qui sont une donnée clé dans le domaine de l'interaction Homme-robot et notamment de la téléopération, dépendent essentiellement des conditions de communication entre l'opérateur humain et le robot. Une réponse à ce problème a été le contrôle supervisé, développé notamment pour l'exploration planétaire.

Les auteurs discutent sur le lien entre le niveau d'autonomie du robot et la négligence de l'opérateur et son influence sur l'efficacité du robot. L'efficacité du robot mesure la performance du robot pour la réalisation de la tâche et dans quelle mesure la tâche du robot est compatible avec la mission du système Homme-robot. Le sens de l'autonomie qui est ici considéré est le niveau de délégation accordé au robot ce qui permet d'expliquer le point de vue de l'article selon lequel plus le niveau d'autonomie augmente, plus l'ampleur des tâches que peut effectuer le robot décroît. En effet, le robot dispose d'un ensemble de compétences limité pour lequel les performances peuvent être supérieures à celles de l'opérateur humain qui dispose d'un ensemble de compétences plus large. Plus l'opérateur néglige le robot, plus celui-ci sera limité face à des situations ne pouvant être gérées que par l'opérateur humain, notamment pour des situations correspondant au niveau délibératif par exemple (cf. section 2.2 du chapitre 1).

La Figure 19 compare l'efficacité du robot pour différents niveaux d'autonomie en fonction de la négligence de l'opérateur. Les recherches en téléopération étant les plus avancées, elles permettent d'obtenir des robots très efficaces mais on constate que la moindre négligence de l'opérateur entraîne une perte rapide de l'efficacité. Un robot totalement autonome est quant à lui moins efficace mais est indépendant des actions de l'opérateur et peut maintenir un niveau égal de performance quel que soit le niveau de négligence de celui-ci. Enfin, les robots semi-autonomes cherchent à minimiser la quantité d'interaction Homme-machine et à maximiser leur efficacité. Cela revient à chercher un compromis entre l'efficacité du robot et la charge de travail de l'opérateur.

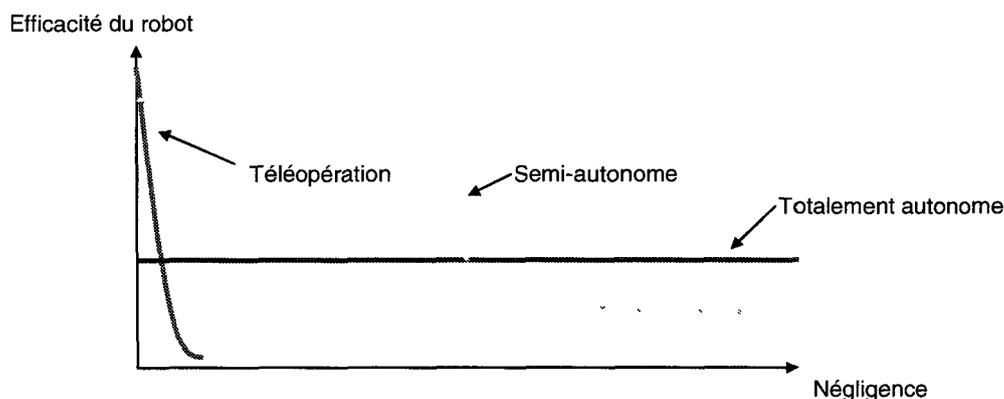


Figure 19. Effet de la négligence de l'opérateur (d'après [Goodrich *et al.* 2001]).

3.3 Discussion

L'autonomie ajustable est un premier moyen de contrôle de la résilience d'un système Homme-machine dont les apports sont résumés dans le Tableau 8. L'autonomie ajustable est envisageable selon deux aspects.

Le premier aspect consiste à ajuster dynamiquement l'espace opérationnel d'un agent selon ses ensembles de compétences, de capacités et de prescriptions. Ce type d'ajustement correspond au type de résilience locale (cf. section 5.2 du chapitre 1). Celui-ci consiste à fournir une réponse connue et adaptée à une situation sans modifier le mode de fonctionnement courant.

La modification du mode de fonctionnement courant est le deuxième type d'ajustement que l'on retient. Celui-ci est plus classique et peut être initié par un agent technique ou par l'opérateur humain. Un ajustement de ce type correspond au type de résilience globale (cf. section 5.2 du chapitre 1). Celui-ci est caractérisé par la transition du système vers un mode de fonctionnement différent soumis à un nouvel ensemble de contraintes et à une répartition des tâches différente.

Systèmes résilients	
Résilience locale	Systèmes stables (résistants) [Lundberg et Johansson 2007]
Résilience globale	Systèmes multi-stables (résilients) [Lundberg et Johansson 2007]
Proactivité et analyse constante de l'activité et de l'état du système	Surveillance constante du système et anticipation des défaillances [Hollnagel 2006]
Autonomie ajustable	
Ajustement local	Ajustement des compétences, capacités et prescriptions d'un agent Modification des interactions entre les agents
Ajustement global	Modification du mode d'autonomie courant
Autonomie ajustable et fiabilité	Ajustement du modèle du système et gestion des défaillances [Dorais <i>et al.</i> 1999]

Tableau 8. Récapitulatif des apports de l'autonomie ajustable à la résilience d'un système Homme-machine.

L'efficacité des ajustements de modes d'autonomie suppose que le système est capable de constamment s'auto-évaluer afin de déterminer dans quel état il se trouve et de transmettre cette information à l'opérateur humain. Cette capacité est partie intégrante de l'aspect proactif d'un système. C'est également l'une des capacités nécessaires de la résilience qui a été dégagée au chapitre précédent. Cette auto-évaluation des paramètres internes du système doit cependant être complétée par une évaluation de la situation globale du système, c'est-à-dire prenant en compte les paramètres externes à celui-ci (environnement du système Homme-machine...).

Une ambiguïté qui nous semble également intéressante à éviter concerne l'affectation des rôles de l'opérateur humain et du robot selon les différents niveaux d'autonomie. En effet, dans le but d'une coopération Homme-machine efficace, l'opérateur humain doit à tout instant

connaître exactement le mode de contrôle dans lequel se trouve le robot ainsi que son niveau d'autonomie. Ainsi, pour un niveau d'autonomie (manuel, semi-automatique, automatique) et pour un mode de contrôle (contrôle partagé, échange de contrôle, contrôle supervisé) donnés, l'opérateur humain doit toujours savoir quelles sont les actions dont il a la charge.

Au début de la mission, la répartition des tâches doit se faire de façon statique. La meilleure stratégie à adopter semble être une répartition selon les compétences de l'opérateur humain et du robot. Contrairement à une approche purement statique dans laquelle la répartition est effectuée une fois pour toutes, les mécanismes d'autonomie ajustable pourront ensuite ajuster la répartition des tâches en fonction de l'évolution de la situation. Cette répartition devant être effectuée en fonction du contexte, une conscience de la situation très fine est nécessaire. Dans le cadre d'un système résilient, le contexte prend également en compte les interactions entre les agents du système. Celui-ci doit être capable de déterminer quels sont les agents qui communiquent et de quelle façon ceux-ci interagissent. L'application à un système Homme-robot nécessite la prise en compte de la conscience de l'interaction Homme-robot (*Human-robot Interaction Awareness*).

4 La conscience de la situation et de l'interaction Homme-robot

4.1 Définition de la conscience de la situation

De même que pour l'autonomie ajustable, la nécessité de la conscience de la situation peut être mise en avant par l'exemple suivant. La comparaison des performances de quatre équipes d'opérateurs humains et de robots est effectuée lors de compétitions de "*search and rescue*" (simulations de recherche et d'assistance à des personnes blessées dans des environnements complexes) [Drury *et al.* 2003]. Les résultats de l'article s'intéressent aux incidents survenus durant les simulations et tentent d'en déterminer les causes en se référant aux différents types de conscience de la situation. Ces causes sont principalement un manque d'informations pour l'opérateur concernant la localisation du robot et son environnement, c'est-à-dire un problème de conscience de la situation.

Le modèle le plus utilisé pour représenter la conscience de la situation (*situation awareness*) est celui proposé par Endsley [1996] qui distingue trois niveaux pour la conscience de la situation :

- la perception d'informations dans un volume fini d'espace et de temps (SA1),
- la compréhension de leur signification (SA2),
- la projection de l'état du système dans le futur (SA3).

Le mot conscience est à prendre ici comme la traduction du mot anglais *awareness*. Ce terme, que l'on retrouve dans la littérature concernant le travail coopératif assisté par ordinateur (ou CSCW pour *Computer-Supported Cooperative Work*) désigne la connaissance que les membres d'un groupe de travail ont des autres membres du groupe et de leurs activités [Luczak *et al.* 2003].

Un parallèle peut être établi entre le modèle de Endsley et le modèle de Parasuraman *et al.* [2000]. Les trois niveaux du modèle proposé par Endsley correspondent aux phases de prise d'informations, d'analyse d'informations et d'une partie de la sélection d'une décision du modèle de Parasuraman. Le Tableau 9 présente les parallèles pouvant être établis entre ces deux modèles et montre que cette approche de la conscience de la situation intervient dans les étapes précédant la prise de décision. La connaissance des informations nécessaires à la

représentation de la situation doit être la plus fine et la plus précise possible. De la même façon, un parallèle peut être établi entre les trois niveaux de la conscience de la situation et les deux premières boucles du modèle OODA.

Niveaux de conscience de la situation	Catégories d'activités du modèle de Parasuraman <i>et al.</i>
SA1	Détection d'informations
	Recherche explicite
	Filtrage des informations pertinentes
SA2	Analyse des informations
	Interprétation de la situation
SA3	Elaboration d'alternatives

Tableau 9. Parallèle entre conscience de la situation et modèle de Parasuraman *et al.* [2000].

Le Tableau 9 dresse un parallèle entre le modèle de conscience de la situation et le modèle du traitement de l'information. L'automatisation de ces catégories d'activité doit alors prendre en compte des exigences en termes de conscience de la situation nécessaires pour gérer les interactions Homme-machine dans les différentes catégories d'activité.

4.2 Conscience de la situation et interactions Homme-machine

Cette notion de conscience de la situation est primordiale dans le cadre des interactions Homme-machine, tant du point de vue de l'opérateur que du système technique. En effet, dans le cas de l'opérateur confronté à une requête du système automatisé, cela se traduit par la compréhension de l'état courant du système technique, de l'avancement actuel de sa tâche, de la raison de sa requête et de l'action appropriée à entreprendre [Sellner *et al.* 2006]. Pour ces auteurs, la conscience de la situation minimale doit permettre à l'opérateur d'entreprendre un plan d'action à court terme.

La présentation des informations, la conception des interfaces et les limitations dues aux capteurs ou caméras peuvent avoir une forte influence sur la conscience de la situation pour l'opérateur.

La quantité d'informations présentée à l'opérateur est une donnée fondamentale dans la gestion de la conscience de la situation. La présentation constante de toutes les données disponibles n'est pas une situation envisageable (débit limité, délai de transmission, surcharge d'informations pour l'opérateur...). Les informations minimales doivent donc correspondre à des situations précises que l'on peut illustrer au travers de l'échange de contrôle.

Dans l'échange de contrôle, l'opérateur humain contrôle le robot pendant une partie de la tâche et le robot est autonome pendant l'autre partie de la tâche. Les transitions entre mode automatisé et mode manuel initiées du fait de cette répartition temporelle des tâches nécessitent une conscience de la situation de chacun des agents afin de prendre en compte l'activité des autres agents [Kortenkamp *et al.* 1997]. En effet, dans ce mode de contrôle, le robot peut ne pas savoir quel sera l'état du système une fois que l'opérateur humain lui rendra le contrôle. Le même problème se pose pour l'opérateur humain lorsque l'on passe d'un mode automatisé à un mode manuel, ce qui illustre l'importance de cette conscience de la situation dans une activité de coopération.

L'intégration des principes d'autonomie ajustable au sein d'une architecture de contrôle doit gérer les transitions entre modes d'autonomie et plus particulièrement lors de la transition d'un mode automatisé à un mode où une intervention de l'opérateur humain est nécessaire. Une approche possible de cette gestion est basée sur l'utilisation d'un *buffer* de données contenant des informations sur l'état courant du système et également sur le laps de temps précédant le changement de niveau [Sellner *et al.* 2006]. Les informations minimales nécessaires avant et pendant un changement de mode doivent être déterminées en prenant en compte la nécessité de l'interaction Homme-robot et les spécificités des interactions liées au mode de contrôle.

4.3 L'interaction Homme-robot

4.3.1 Définition de l'interaction Homme-robot

L'interaction Homme-robot est plus complexe que l'interaction Homme-ordinateur du fait de la prise en compte de l'autonomie décisionnelle du robot. Scholtz [2003] identifie six dimensions caractérisant cette complexité. Ces dimensions concernent les rôles que peut avoir l'opérateur humain, la complexité des robots, leur nature dynamique, l'environnement dans lequel ils évoluent, le nombre de robots avec lequel l'opérateur humain peut interagir et les capacités autonomes des robots.

Le premier rôle de l'opérateur humain dans le cadre d'une interaction Homme-robot différente de la téléopération est un rôle de superviseur. Sheridan [1992] distingue cinq fonctions principales de supervision pour l'opérateur humain :

- Planifier quelles sont les tâches à accomplir et comment les accomplir,
- Indiquer au robot ce qui a été planifié,
- Surveiller le bon déroulement de l'action et détecter les défaillances,
- Intervenir si le but a été atteint ou en cas d'urgence pour spécifier un nouveau but,
- Apprendre pour améliorer ses compétences.

Cependant, d'autres rôles sont envisageables dans le cadre de systèmes Homme-robot à autonomie ajustable. Ceux-ci peuvent en effet varier de celui de spectateur à celui de coéquipier du robot, en passant par un rôle de superviseur. Ces rôles se traduisent par différentes tâches, nécessitant des niveaux différents de conscience de la situation [Scholtz 2003].

Le premier chapitre a présenté la résilience comme une composante souhaitable des systèmes et organisations afin de gérer efficacement les perturbations connues et inconnues selon des capacités d'anticipation, de réaction et de récupération. Les propriétés d'une organisation résiliente font apparaître la nécessité d'une organisation proactive, capable de s'auto-évaluer constamment afin de déterminer le positionnement du système par rapport aux limites de fonctionnement. La proactivité d'une organisation suppose alors une conscience de la situation permettant l'anticipation voire l'évitement d'événements indésirables.

La conscience de la situation doit cependant être complétée par la conscience de l'interaction entre les agents du système. En effet, les propriétés d'interactivité d'un système résilient permettent l'émergence de solutions permettant la récupération de l'occurrence d'événements imprévus. Une de ces formes particulières de conscience de l'interaction liée au domaine des systèmes Homme-machine concerne l'interaction existant entre l'opérateur humain et le système automatisé, qui est ici le robot mobile terrestre.

4.3.2 Conscience de l'interaction Homme-robot

La première qui nous intéresse est la conscience de l'interaction Homme-robot (*Human robot interaction awareness*). Cette conscience de l'interaction peut être définie comme la compréhension que l'opérateur humain a de la localisation, de l'activité, du statut et de l'environnement du robot et également la connaissance que le robot a des commandes de l'opérateur humain et des contraintes sous lesquelles il doit opérer [Drury *et al.* 2003]. Le niveau de cette conscience de l'interaction Homme-robot dépend du niveau d'autonomie du robot.

Le niveau de conscience de la situation dépend également du type d'interaction Homme-robot définissant ainsi des rôles précis pour les agents. Scholtz [2003] liste cinq types d'interaction :

- Les interactions de type superviseur ont pour but de surveiller et de contrôler la situation globale.
- Les interactions de type opérateur ont lieu au niveau de l'action et modifient le modèle du robot lorsque le comportement de celui-ci n'est pas acceptable.
- Les interactions de type mécanique sont de nature physique et intègrent la surveillance de l'effet de l'interaction sur le comportement du robot.
- Les interactions de type partenaire ont lieu au niveau du but et sont soumises aux contraintes temporelles de modification du but,
- Les interactions de type spectateur correspondent à un ensemble restreint d'actions possibles.

La conscience de l'interaction Homme-robot est une part importante de la conscience de la situation et si l'on se réfère au référentiel ALFUS, l'interaction Homme-robot est une composante essentielle de l'évaluation de l'autonomie d'un robot.

4.3.3 Evaluation de l'interaction Homme-robot

L'évaluation de l'interaction Homme-robot est basée sur la constitution de différents indicateurs et métriques. Olsen et Goodrich [2003] identifient six métriques permettant d'évaluer l'interaction Homme-robot :

- l'efficacité de la tâche,
- la tolérance à la négligence,
- l'attention requise pour un robot,
- le temps disponible,
- le nombre de robots supervisés par un même opérateur humain,
- l'effort de l'interaction.

Ces métriques ont pour but d'évaluer la performance de l'interaction Homme-robot. Le but de ces évaluations est de guider la conception des interfaces Homme-machine afin de réduire l'effort de l'interaction sans diminuer l'efficacité de la tâche.

La métrique relative à l'efficacité de la tâche peut concerner différents aspects de réalisation de la tâche. Cette métrique peut ainsi être le temps mis pour réaliser une tâche, le nombre d'erreurs ou le degré d'accomplissement d'un but de la mission. Le problème avec une telle métrique est d'obtenir une mesure de l'efficacité courante. Dans le cadre du contrôle coopératif, une telle métrique devra nécessairement prendre en compte l'opérateur humain et le but courant du robot.

L'efficacité de la tâche dans le cadre de l'interaction Homme-robot peut être assimilée aux performances du système Homme-machine [Fong *et al.* 2004]. Les auteurs établissent également une distinction entre efficacité et efficience :

- L'efficacité (*effectiveness*) représente le pourcentage de la mission qui a été accompli avec le mode d'autonomie désigné. Le nombre et la durée des interventions de l'opérateur humain peuvent être utilisés pour calculer cette métrique.
- L'efficience (*efficiency*) représente le temps requis pour achever une tâche.

Goodrich et Olsen [2003] identifient sept principes sur lesquels doit être basée l'interaction Homme-robot:

1. Transitions implicites des interfaces et des modes d'autonomie.
2. Utiliser des interfaces basées sur des modèles naturels.
3. Interagir avec l'environnement plutôt qu'avec le robot.
4. Interagir sur la relation entre le robot et l'environnement.
5. Laisser les opérateurs interagir avec les informations présentées.
6. Soutenir la mémoire des opérateurs.
7. Aider au maintien de l'attention de l'opérateur.

L'un des types d'interaction qui a été évoqué concerne l'interaction de type partenaire entre les agents. Ce type d'interaction peut s'appliquer à la mise en place d'une coopération Homme-machine. La coopération Homme-machine est un moyen de contribuer à la résilience d'un système Homme-machine en gérant les interactions entre les agents du système afin de réaliser un but commun. La section suivante présente une application de la coopération Homme-machine au système Homme-robot au moyen du contrôle coopératif Homme-robot.

5 Coopération Homme-Machine et contrôle coopératif Homme-robot

5.1 Définition de la coopération Homme-machine

La coopération Homme-machine est définie de la façon suivante par Hoc [1996]. Deux agents sont en situation de coopération aux deux conditions suivantes :

- ils poursuivent chacun des buts qui peuvent entrer en interférence, soit au niveau des résultats, soit au niveau des procédures ;
- et ils font en sorte de traiter ces interférences pour que les activités de chacun soient réalisées de façon à faciliter la réalisation de celles de l'autre.

Hoc [2005] définit plusieurs modes de coopération Homme-machine développés dans le cadre de la conduite automobile. Ces modes se distinguent par le niveau d'intrusion du système automatisé dans l'activité du conducteur :

- Le mode perceptif correspond à la présentation d'informations au conducteur dont le format dépend du comportement attendu du conducteur. Si un processus symbolique est requis, des signes ou des formes sont transmis afin d'être interprétés par le conducteur. Dans le cas contraire, l'information peut être sub-symbolique et intégrée au contrôle sensorimoteur.
- Le contrôle mutuel fournit un jugement sur l'activité du conducteur à l'approche d'une limite. Ce mode peut prendre différentes formes selon l'intervention du système automatisé dans l'activité du conducteur : avertissement, suggestion d'action, limitation, correction.
- La délégation de fonctions correspond à une intervention continue du système automatisé dans l'activité. Ce mode peut être médiatisé par l'activation d'un système

automatisé, la consigne pouvant être fixée par le conducteur (mode de contrôle) ou par l'exploitant (mode de prescription).

- Le mode totalement automatisé est envisagé dans des situations d'urgence ou des situations difficiles mais pose le problème du retour à un contrôle manuel.

La coopération Homme-machine permet de répondre à des difficultés rencontrées par un ou plusieurs agents. Cette coopération peut prendre différentes formes en fonction du besoin.

5.2 Formes de coopération de Schmidt

Schmidt [1991] définit trois formes de coopération : augmentative, intégrative et confrontative qui permettent d'étudier pourquoi s'effectue la coopération (Figure 20). Dans les définitions suivantes, le terme agent désigne l'opérateur humain ou le système automatisé.

La forme de coopération augmentative a pour but de compenser les limitations individuelles des agents. Ces agents possèdent des savoir-faire similaires et la tâche à accomplir est divisée en sous-tâches équivalentes. La coopération augmentative cherche à agréger ces capacités pour parvenir à une meilleure performance. Un exemple est l'assistance que peut fournir l'opérateur humain au robot mobile pour éviter un obstacle en infléchissant la trajectoire d'évitement.

La forme intégrative permet d'intégrer les savoir-faire différents mais complémentaires des différents agents. Dans ce cas, la tâche à accomplir est divisée en sous-tâches, chacune d'elles étant réalisable par l'agent le plus compétent pour celle-ci. La contribution de chaque agent peut aider à la réalisation d'une autre tâche. Un exemple de coopération intégrative est lié à la différence de perception de l'opérateur humain et du robot. Le robot peut indiquer sur une carte interactive un obstacle non perçu par l'opérateur, cette information pouvant alors être utilisée par cet opérateur.

La forme confrontative s'applique à une tâche qui n'est pas décomposée et à des agents aux savoir-faire similaires. Cette forme de coopération vise à confronter les résultats des différents agents en vue de parvenir à un meilleur résultat. Un exemple de cette forme de coopération est donné par le dialogue instauré entre l'opérateur humain et le robot sur une situation éventuellement conflictuelle, chaque agent devant alors justifier son point de vue et sa stratégie.

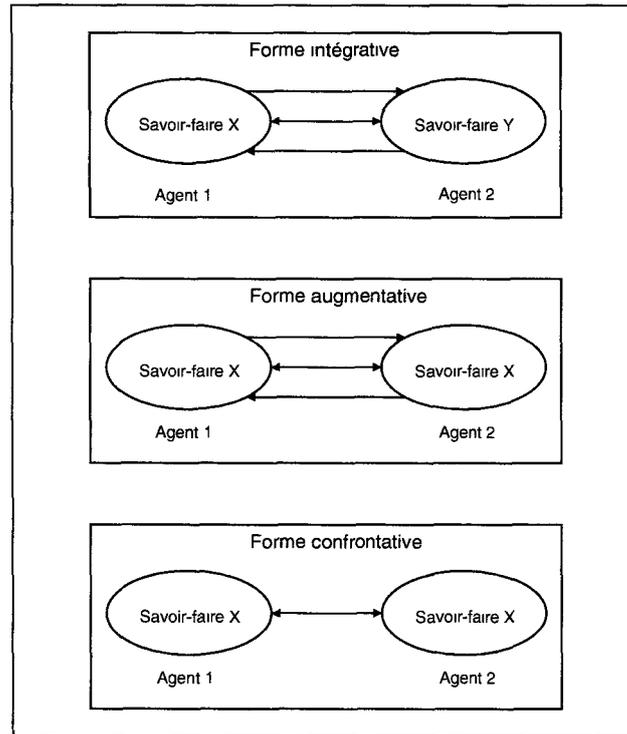


Figure 20. Formes de coopération de Schmidt (d'après [Lemoine 1998]).

La coopération Homme-machine peut ensuite être définie d'un point de vue structurel.

5.3 Structures de coopération

Millot [1988] distingue deux structures de coopération Homme-machine : la coopération verticale et la coopération horizontale.

5.3.1 Coopération verticale

Dans une structure de coopération verticale (Figure 21), les outils d'aide à la décision sont hiérarchiquement inférieurs à l'opérateur humain. Les deux agents (opérateur humain et système automatisé) sont tous deux capables d'établir des stratégies de prise de décision mais seul l'opérateur humain décide de la stratégie à adopter et de sa mise en œuvre.

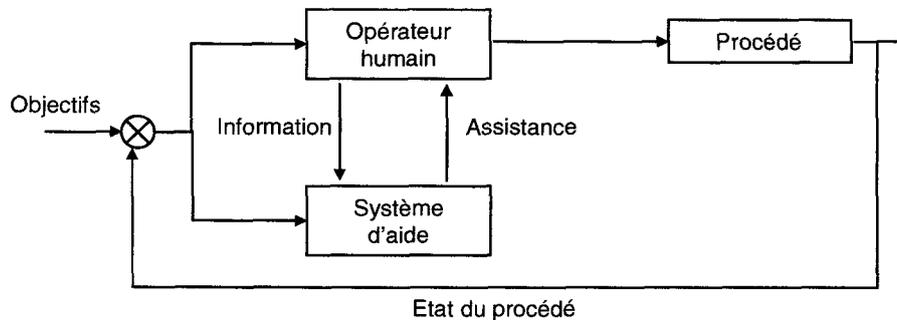


Figure 21. Structure de coopération verticale.

5.3.2 Coopération horizontale

Le principe de la coopération horizontale (Figure 22) consiste à répartir dynamiquement les tâches entre l'opérateur humain et le robot. Ce partage des tâches doit permettre d'optimiser

les performances du système et de maintenir l'opérateur actif dans la boucle de contrôle à un niveau de charge de travail acceptable. En effet, les états de sous-charge ou de surcharge de travail sont à éviter car ils peuvent entraîner soit une perte d'attention soit un dépassement des capacités de l'opérateur et peuvent aboutir à des erreurs.

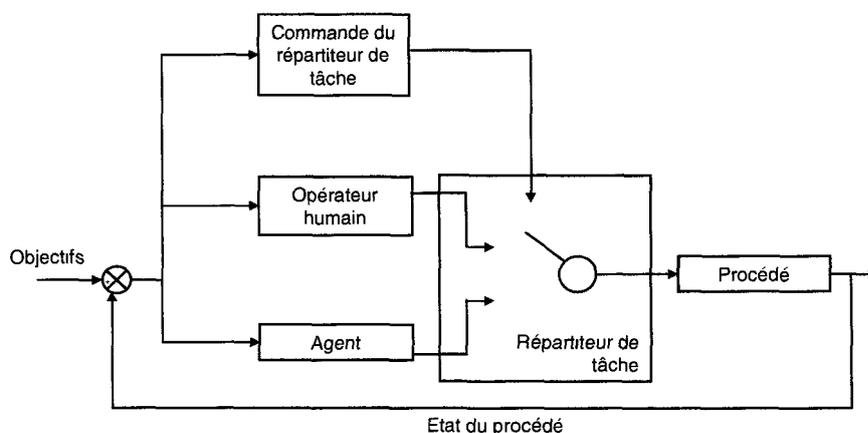


Figure 22. Structure de coopération horizontale.

Cette répartition dynamique des tâches qui intervient dans la structure de coopération horizontale peut être effectuée selon deux principes.

5.3.3 Répartition dynamique des tâches

Deux structures sont possibles pour la répartition dynamique des tâches selon que le répartiteur de tâches est humain ou automatisé : les structures explicite et implicite.

Dans la structure explicite, la répartition des tâches est commandée par l'opérateur humain. Celui-ci doit donc avoir une connaissance globale du système et de ses capacités. La structure explicite assistée est une variante dans laquelle l'opérateur humain dispose d'une aide à la décision pour effectuer le partage des tâches.

Dans la structure implicite, la répartition est effectuée automatiquement par le système automatisé. Les critères de répartition pour l'algorithme de partage sont essentiellement des indicateurs de performance et de charge de travail de l'opérateur.

Des études dans le domaine du contrôle du trafic aérien ont montré une augmentation des performances lors de l'utilisation des structures de répartition dynamique des tâches. Des inconvénients ont cependant été notés [Vanderhaegen 1993]. En effet, les opérateurs ont tendance à ne pas avoir confiance dans le système d'aide et à lui allouer peu de tâches de résolution en raison d'un désaccord sur la définition du conflit à résoudre. De plus, lorsque les opérateurs humains ne sont pas en charge de la répartition des tâches, ils ont tendance à ne pas superviser l'activité du système d'aide. Ces limitations ont mené à la définition d'une autre approche : la délégation de fonctions.

5.3.4 La délégation de fonctions

La délégation de fonction permet de répondre aux limitations de la répartition des tâches [Hoc et Debernard 2002]. Une fonction est définie à un plus haut niveau d'abstraction qu'une tâche et peut donc apparaître dans plusieurs tâches. Dans la délégation de fonctions, la tâche est définie par l'opérateur humain qui transmet un problème et un plan au système d'aide. Ce dernier définit alors une procédure de résolution conforme au plan. L'implication de

l'opérateur dans la supervision de l'activité du système d'aide est plus importante. La délégation de fonctions, comme la répartition dynamique de tâches, s'effectue au travers d'un partage des informations sur l'état du procédé et la situation courante via un espace de travail commun.

5.4 L'espace de travail commun

Afin d'accomplir leur tâche, les opérateurs se construisent un référentiel dans lequel ils se représentent leur activité. Ce référentiel peut être vu comme une représentation de la situation et contient plusieurs attributs : informations, problèmes, stratégies, solutions et commandes. A partir de ce référentiel, il leur est possible de planifier leurs actions et de détecter les situations anormales dans l'activité [Hoc 2001 ; Pacaux-Lemoine et Debernard 2002]. Lorsque deux agents humains ou techniques coopèrent, un référentiel commun est élaboré à partir de leurs propres référentiels. La coopération Homme-machine au travers du référentiel commun se situe à différents niveaux d'activité. Hoc [2001] distingue la coopération dans l'action, la coopération dans le plan et la méta-coopération :

- La coopération dans l'action consiste à résoudre les problèmes à court terme par la création, la détection, la résolution et l'anticipation d'interférences. A ce niveau, un référentiel commun peut être maintenu.
- La coopération dans le plan concerne la compréhension de la situation et la planification de l'action. Dans les situations de coopération, ce niveau intègre les buts et les plans communs ainsi que l'allocation de fonctions.
- La méta-coopération est élaborée après une certaine expérience de coopération entre les agents. Elle consiste en l'élaboration d'un code de communication commun, des représentations compatibles et de modèles de soi et de l'autre.

Le système de répartition des tâches qui est mis en place dans un système Homme-machine a pour but d'augmenter les capacités de prévention et de récupération d'un agent ou de faciliter son activité par l'intervention d'un autre agent. L'intervention de plusieurs agents suppose la mise en place d'un système de communication qui a pour but de minimiser les interférences entre les tâches allouées à différents agents [Vanderhaegen, 1999 ; Vanderhaegen, 2003]. Une structure peut alors être mise en œuvre afin de gérer ces interférences. Dans le cadre de la coopération Homme-machine, la coopération entre un opérateur humain et le système technique est basée sur l'utilisation du référentiel commun. La matérialisation du référentiel commun est appelée espace de travail commun [Pacaux-Lemoine et Debernard 2002]. L'échange d'informations entre les agents au travers de cet espace de travail commun permet de mettre en évidence les formes de coopération de Schmidt : la forme augmentative (1), la forme intégrative (2) et la forme confrontative (3) (Figure 23).

Le modèle des décideurs (opérateur humain et système automatisé) intègre les modèles de l'opérateur humain de Rasmussen et de Parasuraman en décomposant l'étape de prise de décision en deux blocs distincts : la prise de décision schématique ou succincte et la prise de décision précise.

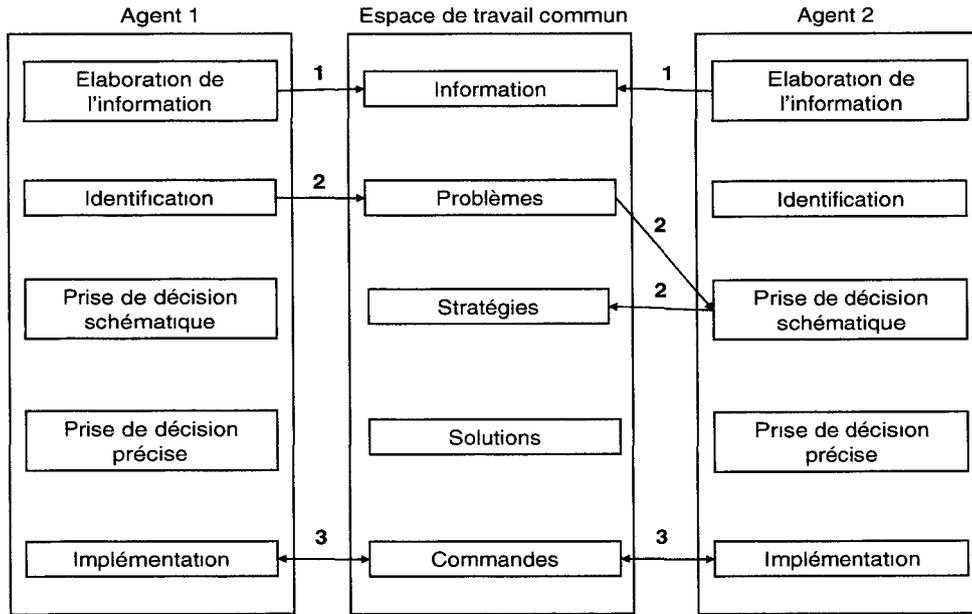


Figure 23. Coopération au travers d'un espace de travail commun (d'après [Pacaux-Lemoine et Debernard 2002]).

La mise à jour de l'espace de travail commun implique des activités de la part de chacun des agents, humain et technique [Pacaux-Lemoine et Debernard 2002] :

- La mise à jour des attributs du référentiel commun est effectuée à partir des référentiels de chaque agent.
- Le contrôle du référentiel commun est une forme de contrôle mutuel dans lequel chaque agent compare le référentiel commun avec son propre référentiel afin de détecter d'éventuelles interférences.
- La gestion des interférences correspond à l'identification des différences entre le référentiel commun et le référentiel d'un agent puis à la résolution de l'interférence.

Trois formes de résolution sont possibles pour un agent humain : l'acceptation, l'imposition et la négociation. La négociation a pour but de réduire les différences entre le référentiel commun et le référentiel d'un agent en modifiant l'un d'entre eux. L'acceptation est la mise à jour du référentiel d'un agent à partir du référentiel commun. Enfin, l'imposition est le contraire de l'acceptation.

Le contexte des travaux présentés dans cette thèse s'intéresse à un domaine particulier de la coopération Homme-machine : le contrôle coopératif Homme-robot.

5.5 Le contrôle coopératif Homme-robot

5.5.1 Introduction

Le contrôle coopératif peut être défini comme l'élaboration d'une commande unique à partir de sources multiples (Figure 24) où l'agrégation des commandes permet d'augmenter les performances du système et sa fiabilité [Goldberg et Chen 2001].

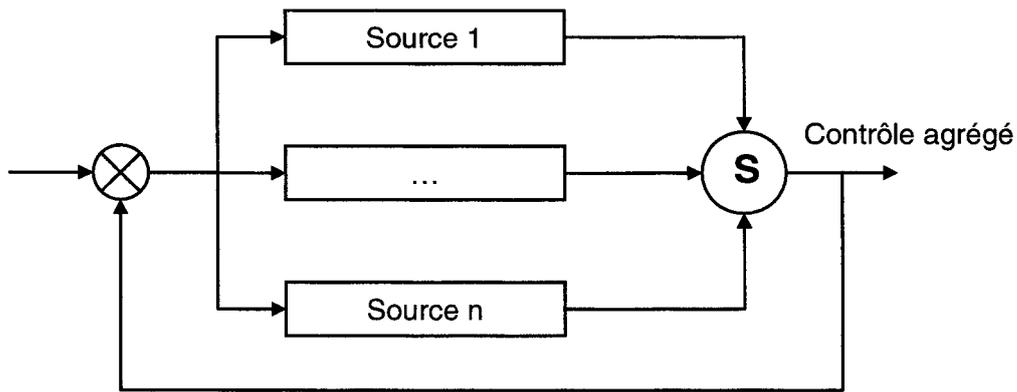


Figure 24. Contrôle coopératif (d'après [Goldberg et Chen 2001]).

Cette première définition du contrôle coopératif se rapproche plus du contrôle partagé mais se distingue par la phase d'agrégation. En effet, l'opérateur humain et le robot réalisent ici la même tâche alors que dans le contrôle partagé, ils réalisent des tâches différentes. Cette définition nous semble limitée dans le cadre de notre étude de par l'absence d'une réelle coopération Homme-machine. Ce point, qui est pour nous l'élément essentiel dans notre définition du contrôle coopératif, est abordé dans la définition suivante.

5.5.2 Définition du contrôle coopératif Homme-robot

Le contrôle coopératif peut être décrit comme un mode d'interaction Homme-robot plaçant l'opérateur humain et le robot au même plan décisionnel. Ils sont alors considérés comme des partenaires agissant ensemble en vue de parvenir à un but commun. L'opérateur humain est à présent considéré comme un collaborateur et non comme un superviseur mais le robot reste cependant subordonné à une stratégie de haut niveau élaborée par cet opérateur humain [Fong *et al.* 1999].

La caractéristique principale d'un tel contrôle concerne la mise en place d'un dialogue. Un premier type d'interactions correspond aux ordres et commandes de l'opérateur humain vers le robot. L'intérêt du contrôle coopératif provient de la possibilité qu'a le robot de s'adresser à l'opérateur établissant ainsi un dialogue constructif. Ce dialogue de la part du robot peut porter sur de la demande d'informations, de la confirmation d'ordres donnés par l'opérateur. On peut imaginer des phases de communication plus élaborées dans lesquelles le robot pourra émettre un avis sur la procédure à suivre pour réaliser la mission puis confronter son point de vue avec celui de l'opérateur.

Il est donc nécessaire que le robot possède une certaine conscience de ses propres capacités et de celles de l'opérateur humain. Cette conscience va se traduire par la capacité à détecter les limitations de l'opérateur et à juger de la pertinence des informations qu'il reçoit. A terme, le robot pourra donc considérer l'opérateur humain comme une source limitée et imprécise d'informations et cela dans le but d'augmenter les performances du système Homme-machine par des activités de coopération entre décideurs. Dans la perspective de l'application de la coopération Homme-machine telle qu'elle a été définie précédemment, les formes de coopération peuvent être intégrées au modèle de coopératif et ne pas limiter les interactions à la résolution d'un conflit ponctuel.

L'instauration du dialogue entre l'opérateur humain et le robot dans le contrôle coopératif doit en effet permettre d'exploiter les différences des points de vue ou des capacités des différents agents. Les points de vue différents sur une situation donnée peuvent être confrontés, les

informations de certains agents intégrées par d'autres et les capacités d'un ensemble d'agents augmentées.

Un exemple d'application de ce dialogue peut avoir comme origine la différence de perception de l'environnement. En effet, l'opérateur humain a à sa disposition une vue globale du terrain de mission (cartographie) qui est une vue statique et peu précise. Cette cartographie peut être complétée par des vidéos retransmises par le robot. Le contrôle coopératif permet donc à l'opérateur humain et au robot de compléter leurs compétences et également de négocier une situation.

Notre approche du contrôle coopératif s'inscrit en tant qu'architecture de contrôle du robot. Celle-ci va permettre à l'opérateur humain et au robot de gérer en commun les modes de contrôle et d'autonomie du robot, les actions à entreprendre et leurs conséquences. Pour cela, nous considérons que l'autonomie ajustable doit être partie intégrante d'une telle architecture et non un niveau d'autonomie ou un mode d'interaction Homme-robot particulier.

6 Conclusion

Ce chapitre a présenté les applications possibles au domaine de la robotique mobile du concept de résilience. Ces applications se posent comme des moyens de contrôle de la résilience, c'est-à-dire le contrôle des perturbations avant, pendant et après leur occurrence. Le Tableau 10 résume la contribution de l'autonomie ajustable et du contrôle coopératif à la résilience d'un système Homme-machine.

Les différentes définitions de l'autonomie montrent deux dimensions essentielles à prendre en compte dans l'autonomie d'un système : l'autonomie opérationnelle et l'autonomie décisionnelle. Ces deux formes d'autonomie distinguent respectivement les actions que le système est capable d'accomplir et les actions que le système est autorisé à accomplir. Une synthèse a ainsi été proposée selon les trois axes suivants pour exprimer l'autonomie d'un système Homme-robot :

- Les compétences, capacités et prescriptions pour atteindre un objectif donné.
- Les compétences, capacités et prescriptions pour sélectionner une alternative de réalisation d'un objectif donné.
- Les compétences, capacités et prescriptions pour définir un plan d'action permettant la réalisation d'un objectif en fonction des aspects sémantiques de l'autonomie de l'agent.

La première distinction dans cette approche porte sur les aspects sémantiques de l'autonomie au travers des compétences, des capacités et des prescriptions. Les compétences correspondent aux actions réalisables par le système au sens de l'existence de solutions permettant la mise en œuvre de ces actions. Les capacités correspondent aux actions réalisables par le système en fonction de la situation courante. Enfin, les prescriptions correspondent aux actions dont la réalisation est accordée ou interdite au système. La seconde distinction porte sur les catégories d'activité du système à savoir la réalisation d'un objectif, la sélection d'une alternative de réalisation de l'objectif et enfin la définition d'un plan d'action en fonction des aspects sémantiques.

Autonomie ajustable	
Gestion des interactions entre les agents	Choix d'un mode d'interaction Homme-robot approprié à la situation contrôle partagé, échange de contrôle [Dalgalarondo 2003] Application du mode d'interaction sélectionné en termes de forme de coopération
Adaptation	Résilience locale : modification de l'autonomie des agents selon les aspects sémantiques de l'autonomie [Bradshaw <i>et al.</i> 2004] Résilience globale : modification du mode d'autonomie du système global [Dorais <i>et al.</i> 1999] Définition d'un plan d'action en fonction de l'autonomie des agents
Amélioration de la proactivité du système	Gestion des défaillances [Dorais <i>et al.</i> 1999] Capitalisation des ajustements d'autonomie face à différentes situations
Contrôle coopératif Homme-robot	
Anticipation d'événements indésirables	Conscience de la situation et de l'interaction Homme-robot : prédiction de la situation par projection de l'état du système dans le futur [Endsley 1996 ; Scholtz 2003]
Réaction à l'occurrence d'événements indésirables	Conscience de la situation pour la modification de la répartition des tâches entre les agents
Récupération	Application des formes de coopération augmentative, intégrative et confrontative [Schmidt 1991]
Emergence	Elaboration de solutions par coopération entre les agents Intégration de l'espace de travail commun [Pacaux-Lemoine et Debernard 2002]

Tableau 10. Contribution de l'autonomie ajustable et du contrôle coopératif Homme-robot à la résilience d'un système Homme-machine.

L'autonomie ajustable contribue à la résilience du système Homme-robot par la capacité d'adaptation à des perturbations. Ces perturbations (défaillances techniques, perturbations dues à l'environnement ou erreurs humaines) peuvent être à l'origine d'une dégradation des performances ou de la sûreté du système et nécessiter différentes réponses en termes de résilience. Ces réponses consistent en différents types d'ajustement de l'autonomie qui peuvent concerner un agent donné au travers de ses compétences, capacités et prescriptions. L'ajustement d'autonomie peut également concerner le système global et consister en une transition de mode d'autonomie du système global qui modifie alors la répartition des tâches entre les agents par exemple.

Le contrôle coopératif permet le partage d'informations nécessaires à la cohésion du système Homme-robot et contribue de ce fait à la résilience du système au travers des principes de

coopération Homme-machine. La coopération Homme-machine apporte une adaptabilité au système résultant des formes de coopération définies afin de répondre à des situations où les capacités des agents sont limitées. La détermination des conditions nécessaires à l'application de ces formes de coopération entre dans un processus proactif.

Ce processus proactif est lié à la conscience de la situation du système Homme-machine au travers de la transmission entre les agents des informations nécessaires à la réalisation de l'objectif. Cette conscience de la situation est primordiale dans l'évaluation de la composante proactive de la résilience. En effet, la conscience de la situation contribue à la détection de situations potentiellement dangereuses pour le système Homme-machine devant conduire à une remise en cause du plan d'action initial.

Le chapitre suivant propose une approche du contrôle coopératif Homme-robot afin de contribuer à la résilience du système Homme-robot. L'approche proposée pour l'autonomie est formalisée, à la fois pour les aspects sémantiques et pour les catégories d'activité, de façon à constituer la base d'un modèle de contrôle coopératif Homme-robot résilient.

CHAPITRE 3 : CONCEPTION D'UN SYSTEME COOPERATIF HOMME-ROBOT RESILIENT

Le chapitre précédent s'est focalisé sur l'étude de l'autonomie ajustable et de la coopération Homme-machine, illustrée par le contrôle coopératif. Ces deux concepts sont identifiés comme les moyens de la résilience dans un système Homme-machine. En effet, il a été montré que l'autonomie ajustable et le contrôle coopératif Homme-robot contribuent à l'anticipation, la réaction et la récupération de l'occurrence de situations indésirables.

Ce chapitre commence par présenter l'ensemble des contributions apportées dans le cadre du projet TAROT (Technologies d'Autonomie pour les RObots Terrestres). Quatre modes d'autonomie, définis au niveau du système global, ont été proposés et une réflexion a été menée sur la gestion des transitions entre modes d'autonomie. Les contributions du projet TAROT ont posé les bases des travaux présentés dans ce mémoire.

Ce chapitre propose une définition du contrôle coopératif Homme-robot contribuant à la résilience du système Homme-robot par des principes d'autonomie ajustable. Les modes d'autonomie définis dans le projet TAROT sont complétés par un formalisme de l'autonomie défini au niveau d'un agent du système. Les ajustements d'autonomie qui découlent de ces deux niveaux de définition permettent d'accroître l'adaptabilité du système. Cette adaptabilité est également renforcée par les interactions entre les agents du système qui sont à l'origine de processus de prise de décision et de planification définis à l'échelle du système.

1 Présentation du projet TAROT

1.1 Contexte du projet

Le programme d'études amont (PEA) TAROT concerne les Technologies d'Autonomie pour les RObots Terrestres. Ce programme de la DGA (Délégation générale pour l'Armement) s'inscrit dans un projet à plus long terme englobant la Bulle Opérationnelle Aéroterrestre (BOA) et prenant en compte les innovations tant sur le plan de la nature des interventions que des avancées technologiques disponibles.

L'un des points majeurs sera ainsi le recours à des moyens déportés (drones, robots mobiles...). Il est primordial que ces moyens déportés soient dotés de capacités autonomes, permettant leur mise en œuvre par les personnels présents sur les terrains d'opération. La robotisation est alors considérée comme un moyen de réduction des risques pris par les personnels lors des missions en les éloignant du terrain d'opérations. De plus, l'intérêt opérationnel d'un tel programme, incluant l'utilisation de véhicules non habités, ne sera acquis que si ceux-ci n'engendrent pas de charge de travail supplémentaire pour les personnels.

1.2 Problématique

L'objectif technique du projet TAROT est d'augmenter l'autonomie décisionnelle des robots sans pour autant atteindre l'autonomie décisionnelle complète. En effet, celle-ci n'est pas souhaitable d'un point de vue opérationnel. L'opérateur humain doit pouvoir reprendre le

contrôle partiel ou total du robot à tout moment, en cas de difficulté pour le robot ou de changement de stratégie par exemple. Enfin, cette autonomie décisionnelle complète ne paraît pas accessible dans l'état actuel de la technologie, de part le manque de robustesse des algorithmes existants.

Le but du PEA TAROT est d'exploiter au mieux les compétences et les capacités complémentaires de l'opérateur humain et du robot en fonction des situations rencontrées. L'un des objectifs est de soulager l'opérateur humain de tâches fastidieuses et répétitives et de limiter sa charge de travail en n'attirant son attention que sur des événements importants. En effet, l'un des postulats du projet est de considérer que l'opérateur peut effectuer une autre tâche que la supervision du robot. L'opérateur humain est alors considéré comme une ressource limitée en termes de disponibilité par exemple dont l'utilisation doit être la plus judicieuse possible. L'objectif est donc de démontrer la faisabilité d'un ajustement dynamique de l'autonomie du système.

Le contexte envisagé dans le PEA TAROT est celui de missions d'observation, de reconnaissance, de surveillance, d'acquisition ou de désignation effectuées dans un cadre mono-robot par des plates-formes terrestres.

1.3 Démarche technique

Le projet TAROT est basé sur un robot équipé de comportements sensorimoteurs. Ces comportements, basés essentiellement sur des asservissements perceptuels, permettent notamment de résoudre les problèmes de localisation peu précise. Les comportements étudiés sont les suivants :

- Suivi et ralliement d'amas visuels naturels et artificiels,
- Suivi de lisières naturelles et artificielles,
- Suivi de véhicules,
- Localisation et ralliement de points de passage,
- Caractérisation et évitement d'obstacles,
- Localisation et construction de carte associée.

Des indices de confiance sont associés à chacun de ces comportements sensorimoteurs. Ces indices évaluent les performances d'un comportement sensorimoteur et sa capacité à remplir sa fonction correctement. Ces indices de confiance sont des composantes essentielles de la gestion des transitions entre les comportements et les modes d'autonomie du système Homme-robot.

1.4 Définition des modes d'autonomie du robot dans le projet TAROT

L'exécution d'une mission dans le cadre du projet est basée sur l'exploitation d'un fichier de mission. Ce fichier est préparé par l'opérateur humain sur la base d'informations tactiques et il rassemble les données nécessaires au robot pour accomplir la mission (description des sous-butts et tâches, modes d'autonomie à utiliser, chenal de navigation...). Une mission est décomposée en buts, eux-mêmes décomposés en tâches. Une tâche peut être une tâche de mobilité, réalisée par un comportement sensorimoteur ou plusieurs dans le cas de la progression libre. Les autres tâches sont des tâches d'observation et de synchronisation.

Dans un premier temps, le projet TAROT s'est attaché à la définition de modes d'autonomie pour le système Homme-robot. Les premières réflexions consistaient à définir les modes

d'autonomie en fonction de la répartition des tâches entre l'opérateur humain et le robot. Cette solution a cependant été écartée car une telle approche, basée sur l'autonomie opérationnelle, est dépendante des spécificités des différents comportements sensorimoteurs. L'ajout d'un nouvel algorithme ou d'un nouveau comportement aurait nécessité une adaptation de la répartition des tâches. La définition des modes d'autonomie s'est donc focalisée sur l'autonomie décisionnelle, rejoignant en cela les objectifs du projet TAROT. Le critère principal qui a guidé la démarche est celui de la prise de décision. On considère ainsi qu'un mode d'autonomie est caractérisé par l'autonomie décisionnelle accordée au robot et la définition d'un mode est donc indépendante des spécificités d'un algorithme ou d'un comportement.

La définition des modes d'autonomie est basée sur l'exploitation du modèle de Parasuraman *et al.* [2000] (cf. section 2.1 du chapitre 2). Quatre modes d'autonomie ont été définis en se basant sur la répartition des catégories d'activité entre l'opérateur humain et le système automatisé [TOSA/RMU – 063 2007]. Le Tableau 11 détaille cette répartition entre l'opérateur humain (H) et le robot (R). Le premier élément d'une case du tableau indique la prédominance du décideur dans la catégorie d'activité.

	Mode 0	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Prise d'informations	R – H	R	R	R
Analyse d'informations	H – R	R - H	R	R
Prise de décision	H	H	H - R	R
Implémentation de l'action	H	R	R	R

Tableau 11. Répartition des catégories d'activité entre l'opérateur humain (H) et le robot (R) (d'après [TOSA/RMU-063 2007]).

La description des quatre modes est la suivante :

- Mode 0 : c'est un mode de téléopération. L'opérateur décide de toutes les actions à réaliser et manipule le robot en temps réel. Aucune prise de décision n'est le fait du robot mais l'opérateur peut cependant être assisté par des fonctions de sécurité comme l'anti-collision.
- Mode 1 : dans ce mode, l'opérateur humain décide de toutes les actions à effectuer qui sont ensuite réalisées par le robot de façon automatique. Dans le cadre du PEA TAROT, ces actions peuvent être décrites dans le fichier de mission décrivant les buts et tâches à réaliser. Les transitions entre les sous-buts et les tâches doivent être acquittées par l'opérateur humain. Les requêtes adressées à l'opérateur sont bloquantes.
- Mode 2 : dans ce mode, les requêtes concernant les transitions entre sous-buts et tâches ne sont pas bloquantes et le robot est autorisé à exécuter automatiquement l'action en cas de non-réponse de l'opérateur. Le délai de réponse accordé à l'opérateur doit dépendre du contexte (vitesse courante du robot, criticité de la requête...). Lorsque l'opérateur refuse une requête du robot, il doit justifier son refus.
- Mode 3 : dans ce mode, le robot exécute les actions automatiquement sans demander de validation à l'opérateur. L'opérateur reste cependant informé de la progression du robot et de ses décisions.

L'objectif du projet TAROT repose sur la capacité à sélectionner le plus approprié des quatre modes d'autonomie en fonction du contexte. L'ajustement du mode d'autonomie peut être

décidé par l'opérateur humain ou le robot et reprend en cela les principes d'autonomie ajustable présentés précédemment.

1.5 Intégration de principes d'autonomie ajustable

On considère que l'ajustement d'autonomie peut prendre deux formes (Figure 25):

- un ajustement que l'on peut qualifier d'horizontal et qui consiste à changer le comportement sensorimoteur en charge de la mobilité du robot. Le mode d'autonomie ne change pas dans ce type d'ajustement. Cet ajustement se situe au niveau d'un même mode d'autonomie et peut être considéré comme un type de résilience locale (cf. section 5.2 du chapitre 1) appliqué à l'autonomie ajustable (cf. section 3.4 du chapitre 2).
- un ajustement que l'on peut qualifier de vertical et qui consiste à changer de mode d'autonomie. Ce type d'ajustement amène à modifier la répartition des tâches entre l'opérateur humain et le robot. Ce type d'ajustement se situe au niveau du système et peut être considéré comme un type de résilience globale (cf. section 5.2 du chapitre 1) appliqué à l'autonomie ajustable (cf. section 3.4 du chapitre 2).

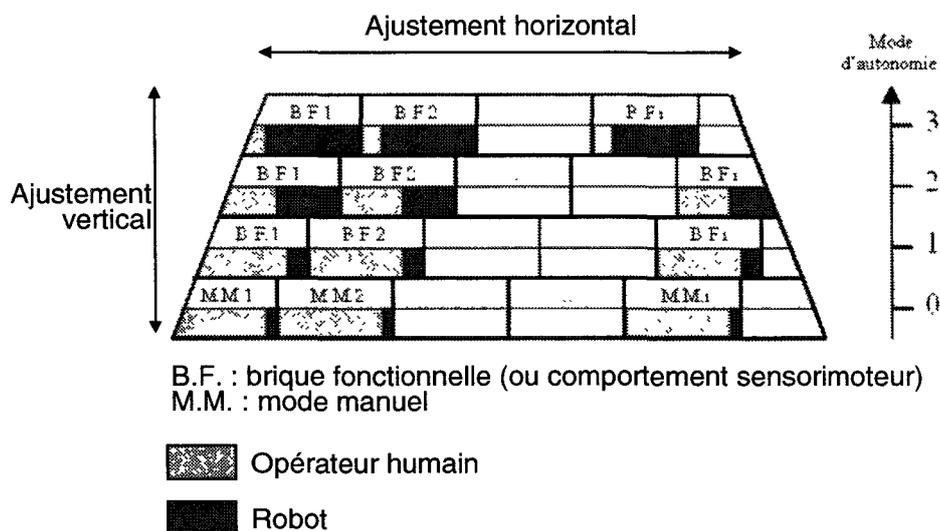


Figure 25. Représentation des comportements sensorimoteurs et des modes d'autonomie [TOSA/RMU – 2007, 063].

La gestion de l'autonomie ajustable est organisée autour du contrôleur de mission (MIC) qui a pour principales fonctions de gérer l'avancement de la mission et d'évaluer la situation courante afin d'arbitrer les comportements sensorimoteurs et les modes d'autonomie. L'ajustement de l'autonomie est réalisé sur la base d'indicateurs objectifs regroupés comme suit : des données en temps réel, des données relatives à la définition de la mission et des connaissances *a priori* sur le fonctionnement du système.

Les connaissances *a priori* résultent principalement d'évaluations effectuées hors ligne. Ces évaluations permettent de collecter des données sur les performances des comportements sensorimoteurs en fonction des caractéristiques de l'environnement et sur leur robustesse.

Les données relatives à la définition de la mission renseignent sur les objectifs à atteindre et les contraintes de la mission. Cette classe de données peut également intégrer les préférences apportées par l'opérateur.

Les données temps réel représentent les grandeurs dynamiques évoluant au cours de la mission. Ces données comprennent notamment les indices de confiance des comportements sensorimoteurs, les données concernant la dynamique du robot (vitesse, position), l'activité de l'opérateur humain et les coûts cognitifs, les ressources disponibles (capteurs, calcul...).

1.6 Validation des modes d'autonomie

Une première campagne expérimentale a été menée dans le cadre du projet TAROT afin de valider les modes d'autonomie définis et leur acceptation par les opérateurs humains [TOSA/RMU – 063 & 158, 2007]. Cette campagne expérimentale exploite le principe du magicien d'Oz afin de simuler les comportements sensorimoteurs dont est doté le système. Les résultats de ces premières expérimentations ont montré que les modes d'autonomie étaient acceptés par les opérateurs humains.

Les problématiques soulevées par le projet TAROT constituent les fondements de la contribution apportée par ces travaux de thèse. Complétés par la notion de résilience d'un système Homme-machine, les concepts du projet TAROT débouchent sur la conception d'un système coopératif Homme-robot où la résilience est contrôlée par la coopération Homme-machine et l'autonomie ajustable.

2 Problématique de conception du contrôle coopératif

2.1 Architecture de contrôle d'un agent du système Homme-robot

Le modèle de contrôle coopératif est géré par les principes d'autonomie ajustable. L'autonomie ajustable est un moyen de mise en œuvre de la résilience du système Homme-robot et est traduite par les transitions de modes d'autonomie, de comportements sensorimoteurs ou par la modification de l'espace opérationnel d'un agent du système afin de maintenir un niveau suffisant de performance. L'approche de l'autonomie proposée permet l'opérationnalisation des modes d'autonomie et de la coopération Homme-machine.

Un agent au sein du système Homme-robot est conçu selon l'approche proposée pour l'autonomie dans la section 1.8 du chapitre 2. On rappelle cette approche définie autour des compétences, capacités et prescriptions à réaliser un but, à décider comment réaliser un but et à définir un plan d'action permettant la réalisation du but. Cette définition correspond ainsi aux caractéristiques des trois niveaux (comportement, séquenceur et délibératif) des architectures de contrôle hybrides en robotique (cf. section 2.4 du chapitre 1). Chacun de ces trois niveaux prend en compte les aspects sémantiques de l'autonomie (Figure 26).

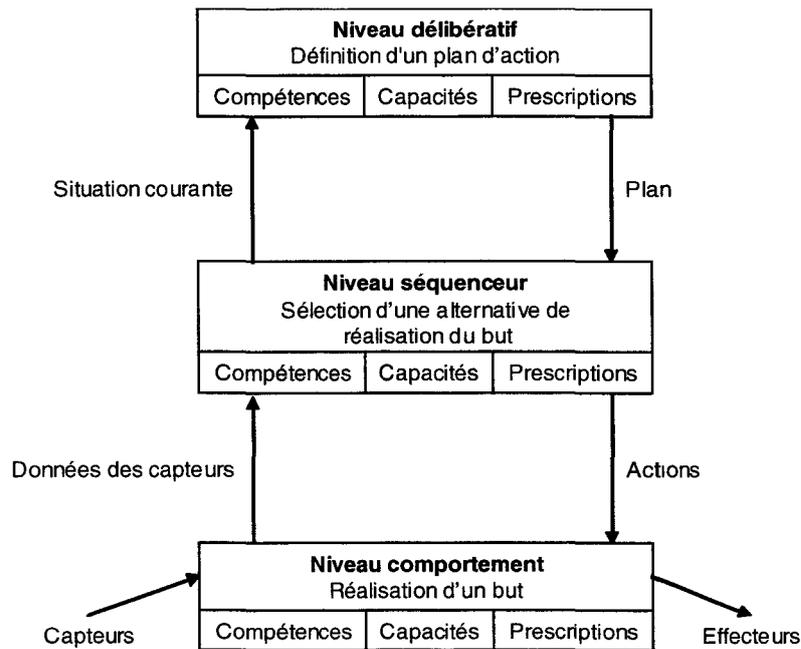


Figure 26. Architecture de contrôle d'un agent du système coopératif Homme-robot.

Les architectures de contrôle hybrides présentées dans le chapitre 1 sont basées sur un modèle d'activité différenciant les niveaux stratégiques, tactiques et opérationnels. Une telle décomposition de l'activité du système ne permet cependant pas une coopération d'égal à égal (pair à pair) entre les différents agents et plus précisément entre les agents techniques et l'opérateur humain. En effet, ce type d'architecture de contrôle est plus proche d'une relation maître-esclave entre les agents responsables d'une activité stratégique ou tactique et les agents responsables d'une activité opérationnelle. L'opérateur humain reste habituellement responsable du niveau stratégique et commande le déroulement du niveau tactique. Au niveau opérationnel, les deux types d'agents – humain et technique – peuvent être impliqués dans une relation de pair à pair mais ce niveau concerne essentiellement des tâches liées à la mobilité du robot et basées sur des comportements essentiellement réactifs.

Les modèles de traitement de l'information par l'opérateur humain [Parasuraman *et al.* 2000] (cf. section 2.1 du chapitre 2) et les modèles de contrôle de systèmes cognitifs couplés [Hollnagel et Woods 1999] (cf. section 4.3.3 du chapitre 1) sont susceptibles de contourner ce problème et d'aborder une coopération d'égal à égal entre les différents agents du système.

2.2 Modèle de contrôle des niveaux d'activité d'un agent du système Homme-robot

Le contrôle coopératif proposé est basé sur l'exploitation du modèle de Parasuraman *et al.* [2000]. En effet, les modes d'autonomie du projet TAROT, qui posent les bases de cette contribution, ont été définis suivant ce modèle. Afin de maintenir une conscience de la situation correcte, les interactions entre les agents décideurs doivent reposer sur la même structure afin de disposer d'un support commun de représentation de l'information entre les agents.

Chaque niveau d'activité d'un agent de la Figure 26 (réalisation d'un but, sélection d'une alternative et définition d'un plan d'action) est décomposable selon les catégories du modèle de Parasuraman *et al.* [2000] : prise d'informations, analyse d'informations, prise de décision et implémentation de l'action (cf. section 2.1 du chapitre 2). Cette décomposition est

représentée à la Figure 27 en prenant en compte une interprétation du modèle de Rasmussen [1983] (cf. section 4.2.1 du chapitre 1).

Les étapes de prise d'informations et d'implémentation de l'action font essentiellement référence aux comportements réactifs alors que les étapes d'analyse d'informations et de prise de décision se basent principalement sur des comportements délibératifs (cf. section 2 du chapitre 1). Une première boucle ne concerne que les étapes de prise d'informations et d'implémentation de l'action. Cette boucle correspond à un cycle perception-action et peut être rapprochée du niveau skill-based du modèle de Rasmussen. Une deuxième boucle consiste à analyser les informations perçues et à exécuter directement une action. Cette boucle correspond au niveau rule-based par la reconnaissance d'une situation déjà rencontrée et l'association d'une règle connue apportant une solution à cette situation en termes d'actions à réaliser. La troisième boucle englobe toutes les étapes du modèle et correspond au niveau knowledge-based dans le cas où la situation identifiée n'a jamais été rencontrée auparavant ou pour laquelle les deux autres boucles n'ont pas pu apporter une solution.

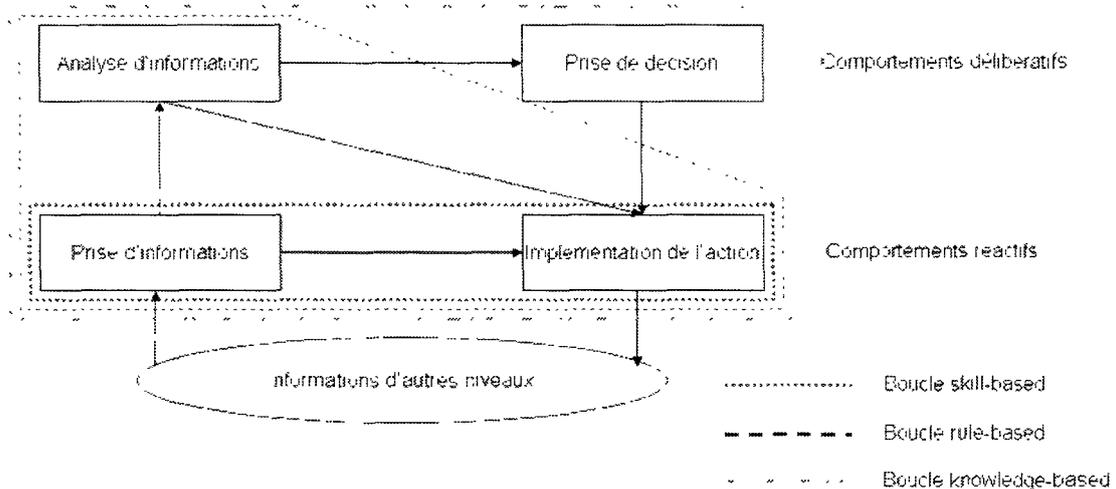


Figure 27. Modèle de contrôle d'un niveau d'activité d'un agent (adapté de [Rasmussen 1983] et [Parasuraman et al. 2000]).

2.3 Définition des étapes du modèle de traitement de l'information

Le Tableau 12 présente une approche pour la définition des étapes du modèle de traitement de l'information. Chaque catégorie du modèle de Parasuraman est divisée en catégories de tâches plus précises. Le croisement du modèle de Sheridan et du modèle de Parasuraman permet de définir de façon plus précise la répartition des tâches entre l'opérateur humain et le robot en faisant apparaître le degré d'automatisation de chaque catégorie. Cette matrice renseigne donc sur le niveau minimal d'automatisation requis pour une tâche donnée. En remplaçant les niveaux d'automatisation de la prise de décision et de l'action par les niveaux concernant le traitement de l'information, il est possible de faire apparaître les nécessités en termes de Situation Awareness.

Ce raffinement des modes d'autonomie permet de définir de façon informelle les notions d'actions et de tâches. Une tâche englobe une ou plusieurs des catégories du modèle de Parasuraman. Une telle tâche peut alors être décomposée en plusieurs sous-tâches correspondant aux sous-catégories qui composent les étapes du modèle de Parasuraman. On considère que si une tâche peut être affectée à une et une seule catégorie d'activité du modèle

de Parasuraman, alors elle est décomposable en une suite finie d'actions élémentaires dont les préconditions et les effets sont connus.

Une tâche peut être décomposée selon deux niveaux d'activité. Dans un premier temps, la tâche peut s'inscrire dans le processus séquentiel du traitement de l'information et du processus de prise de décision. Dans un second temps, les catégories d'activité du modèle de Parasuraman peuvent se dérouler en parallèle dans les trois niveaux de l'architecture de contrôle d'un agent du système Homme-robot présentée dans la section 2.1 de ce chapitre.

		Mode 0	Mode 1	Mode 2	Mode 3		
Prise d'informations	Détection	Le système n'offre aucune assistance, l'opérateur humain est en charge de toutes les décisions et actions.	Le système exécute automatiquement puis en informe l'opérateur humain.	Le système exécute automatiquement puis en informe l'opérateur humain.	Le système n'informe l'opérateur humain de l'action que si celui-ci en fait la demande.		
	Recherche explicite		Le système propose toutes les alternatives de décision ou d'action.	Le système exécute automatiquement puis en informe l'opérateur humain.			
	Filtrage			Le système réduit la sélection à un sous-ensemble plus pertinent.			
Analyse d'informations	Analyse de la situation		Le système n'offre aucune assistance, l'opérateur humain est en charge de toutes les décisions et actions.	Le système propose toutes les alternatives de décision ou d'action.	Le système exécute automatiquement puis en informe l'opérateur humain.	Le système exécute automatiquement et en informe l'opérateur humain.	
	Interprétation de la situation				Le système alloue à l'opérateur un délai de réponse avant une exécution automatique.		
	Elaboration d'alternatives			Le système propose toutes les alternatives de décision ou d'action.	Le système suggère une alternative.		
Prise de décision	Proposition des alternatives possibles			Le système n'offre aucune assistance, l'opérateur humain est en charge de toutes les décisions et actions.	Le système propose toutes les alternatives de décision ou d'action.	Le système alloue à l'opérateur un délai de réponse avant une exécution automatique.	Le système exécute automatiquement et en informe l'opérateur humain.
	Suggestion d'une ou plusieurs alternatives						
	Sélection d'une alternative				Le système propose toutes les alternatives de décision ou d'action.	Le système alloue à l'opérateur un délai de réponse avant une exécution automatique.	
Implémentation de l'action	Initialisation de l'action				Le système n'offre aucune assistance, l'opérateur humain est en charge de toutes les décisions et actions.	Le système exécute cette suggestion si l'opérateur humain approuve.	Le système alloue à l'opérateur un délai de réponse avant une exécution automatique.
	Déroulement de l'action	Le système exécute automatiquement puis en informe l'opérateur humain.				Le système exécute automatiquement puis en informe l'opérateur humain.	
	Arrêt de l'action	Le système exécute automatiquement puis en informe l'opérateur humain.				Le système exécute automatiquement puis en informe l'opérateur humain.	

Tableau 12. Définition des étapes du modèle de traitement de l'information.

Le modèle proposé à la Figure 27 peut être appliqué aux trois niveaux d'activité de l'autonomie d'un agent, à savoir : réalisation d'un but, sélection d'une alternative de réalisation et définition d'un plan d'action. Ces trois niveaux peuvent être étendus au niveau du système.

2.4 Niveaux d'activité d'un agent et niveaux d'activité du système

Les trois niveaux d'activité d'un agent sont représentés par les boucles de contrôle du déroulement du but, de la sélection d'une alternative et de la définition d'un plan d'action. Ces trois niveaux d'activité se retrouvent au niveau du système au travers de comportements émergents basés sur ces boucles de contrôle (Figure 28). Les processus au niveau du système consistent à suivre le déroulement des buts planifiés et exécutés par les différents agents, à sélectionner l'alternative et à planifier la réalisation des buts en fonction de l'autonomie de

l'ensemble des agents du système. Deux agents, ou plus, peuvent donc contribuer à l'émergence des activités du système en communiquant leur autonomie en termes de compétences, capacités et prescriptions (cf. section 1.8 du chapitre 2).

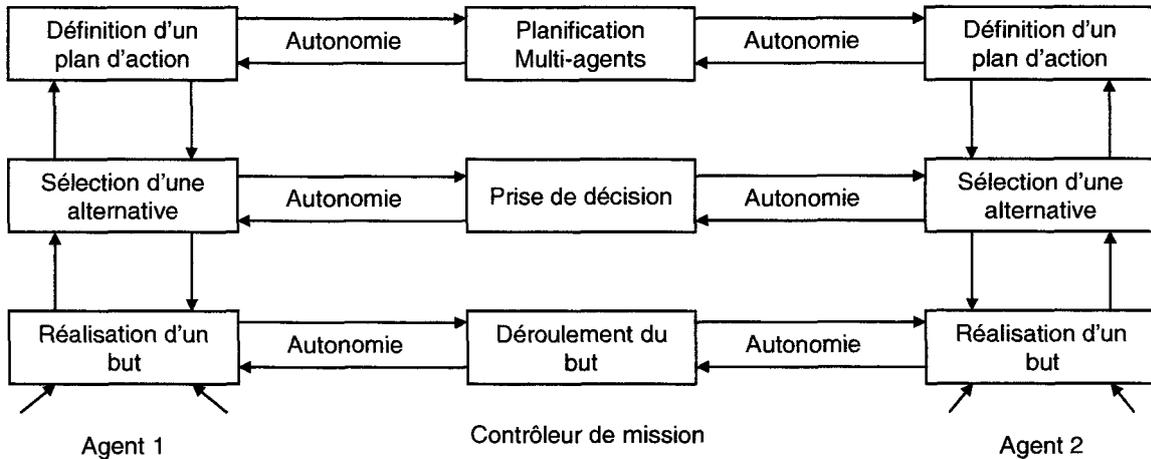


Figure 28. Relation entre les niveaux d'activité d'un agent et les niveaux d'activité du système.

La Figure 29 détaille l'activité globale du contrôleur de mission. La planification se base sur une décomposition hiérarchique de l'objectif à atteindre. Cette décomposition permet de produire une liste d'alternatives en fonction de l'autonomie des agents du système. Les alternatives élaborées par l'algorithme de planification utilisent éventuellement différentes formes de coopération. Une de ces alternatives est ensuite sélectionnée par un algorithme de prise de décision basée sur l'évaluation de la résilience. L'alternative sélectionnée ajuste éventuellement l'autonomie d'un ou plusieurs agents et conditionne la mise en œuvre des formes de coopération. Le but est alors réalisé en fonction de l'autonomie des agents et de la forme de coopération utilisée dans l'alternative sélectionnée. Les différentes étapes de ce modèle sont décrites dans la suite de ce chapitre.

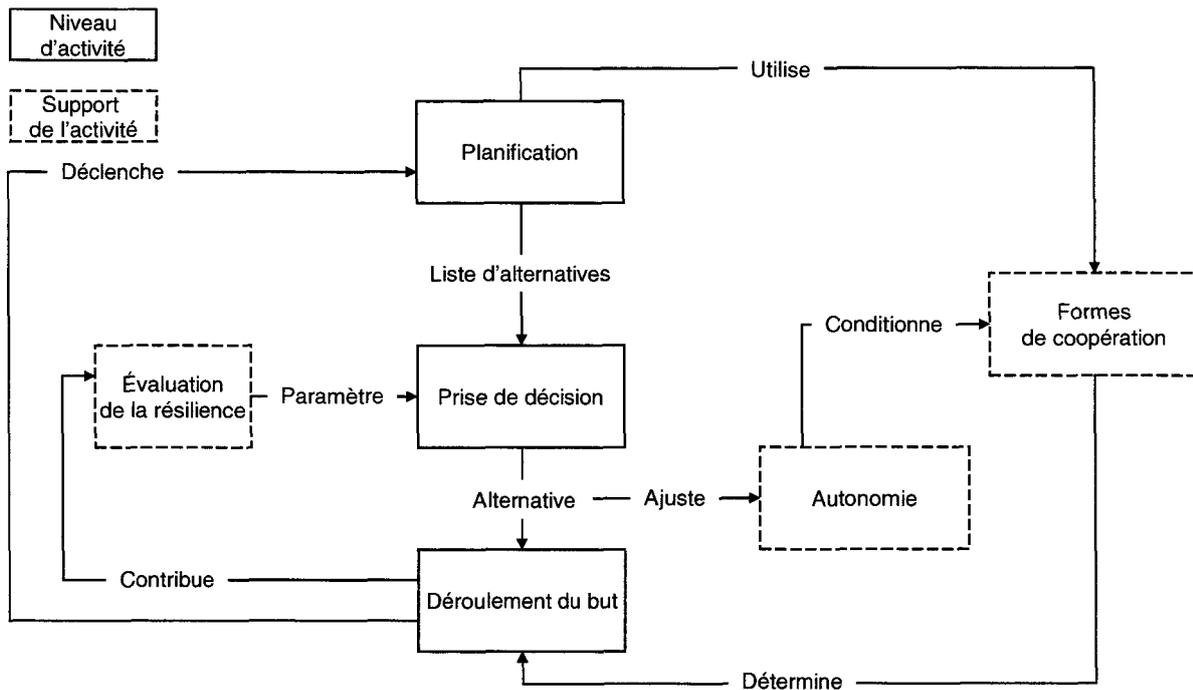


Figure 29. Représentation de l'activité globale du contrôleur de mission.

2.5 Positionnement et intégration du contrôle coopératif

Le contrôle coopératif est un mode d'interaction Homme-machine pouvant être activé ou désactivé par l'opérateur humain ou le système automatisé lui-même. L'activation ou la désactivation du contrôle coopératif est régit par les mêmes règles que pour les transitions entre modes d'autonomie dans le projet TAROT. Des critères supplémentaires doivent cependant être pris en compte afin de refléter la position au même niveau décisionnel de l'opérateur humain et du robot. Ces critères sont ceux qui ont été retenus pour définir la résilience, à savoir : l'efficacité, l'adaptabilité, le fonctionnement aux limites et les interactions au sein du système. Basés sur des indicateurs objectifs, ils permettent d'évaluer la capacité du système Homme-machine à anticiper les erreurs, à réagir à un événement imprévu et à récupérer une situation indésirable.

Le contrôle coopératif Homme-robot vient compléter les quatre modes d'autonomie proposés dans le cadre du projet TAROT (cf. section 1.4 du chapitre 3). Ce mode d'interaction ne remplace pas les modes d'autonomie précédents mais les complète en introduisant un mode basé sur l'interactivité existant entre les agents du système et adoptant une conception identique des agents techniques et humains. Cette conception définit des activités émergentes au niveau du système qui résultent de la complémentarité et de l'interaction entre les agents.

Les notions d'actions et de tâches sont à présent définies afin de mener à une formalisation de l'autonomie.

3 Formalisation des aspects sémantiques de l'autonomie

3.1 Notations employées

Act	ensemble des actions réalisables par le système Homme-robot
A	action élémentaire
Pre(α)	préconditions de l'action α
Post(α)	effets de l'action α
Δ	séquence finie d'actions élémentaires
Pol	ensemble des prescriptions possibles pour une action α
D	ensemble des ressources disponibles pour le système
U(x)	ensemble des ressources utilisables par un agent x
R(α)	ensemble des ressources nécessaires à la réalisation de l'action α
G(x, α)	ensemble des ressources allouées à l'agent x pour l'action α
M(x, α)	ensemble des ressources manquantes à l'agent x pour l'action α
θ	ensemble des tâches réalisables par le système Homme-robot
T _{ij}	tâche définie par le couple d'états (e_i, e_j) et définissant le but à atteindre
realisable(Δ, T)	prédicat évaluant la réalisabilité d'une tâche T selon la séquence d'actions Δ
(T _p , Δ)	opération de décomposition d'une tâche primitive
(T _c , d _c)	opération de décomposition d'une tâche composée
d _c	liste des décompositions d'une tâche composée
(pre _k , sub _k)	k ^{ème} élément de d _c
pre _k	préconditions nécessaires à la réalisation du k ^{ème} élément de d _c
sub _k	liste de tâches correspondant au k ^{ème} élément de d _c
S(x)	ensemble des compétences de l'agent x
C(x)	ensemble des capacités de l'agent x
P(x)	ensemble des prescriptions de l'agent x

$A(x)$	ensemble représentant l'autonomie d'un agent x
$s(x, T)$	prédicat évaluant les compétences d'un agent x pour réaliser une tâche T
$c(x, T)$	prédicat évaluant les capacités d'un agent x pour réaliser une tâche T
$p(x, T)$	prédicat évaluant les autorisations d'un agent x pour réaliser une tâche T
$a(x, T)$	prédicat évaluant l'autonomie d'un agent x pour réaliser une tâche T
$CA(E, T)$	prédicat évaluant les conditions d'application d'une forme de coopération augmentative pour réaliser une tâche T par un ensemble d'agents E
$CI(E, T)$	prédicat évaluant les conditions d'application d'une forme de coopération intégrative pour réaliser une tâche T par un ensemble d'agents E
$CC(E, T)$	prédicat évaluant les conditions d'application d'une forme de coopération confrontative pour réaliser une tâche T par un ensemble d'agents E

Afin de définir formellement l'autonomie du système opérateur humain – robot, nous définissons dans un premier temps les notions d'actions et de tâches [d'après Zieba *et al.* 2008].

3.2 Définition des notions d'actions et de tâches

3.2.1 Définition de l'état du système

Différents types d'agents sont à distinguer pour la définition d'un état. Quatre types d'agents sont identifiables dans le système Homme-robot : l'opérateur humain caractérisé par un état noté e_{OH} , le robot au sens vecteur physique de la mission (état e_R), le contrôleur de mission (état e_{MIC}) et les agents de type comportement sensorimoteur (états e_{CSI}, \dots, e_{CSn}).

L'opérateur humain est considéré comme un agent de niveau superviseur. Il est caractérisé par des grandeurs concernant sa charge de travail requise pour une tâche donnée ou sa charge de travail effective donnant une indication sur son affectation ou non à une tâche. Le niveau d'expertise de l'opérateur humain peut également être pris en compte.

Le robot au sens du vecteur physique de la mission est un agent que l'on peut qualifier de niveau opérationnel. Il est essentiellement caractérisé par des grandeurs physiques renseignant par exemple sur sa vitesse, sa position, son orientation. La définition du vecteur d'état relatif au robot est problématique en termes d'échantillonnage. En effet, le déplacement du robot ou une modification de la vitesse entraîne un changement d'état. On définit alors l'état du vecteur physique de la mission en termes d'écart par rapport à la trajectoire prévue. Les composantes de cet état peuvent alors être considérées comme des valeurs d'entrée pour l'état du contrôleur de mission.

Le contrôleur de mission est caractérisé par des grandeurs relatives au niveau d'activité tactique. On trouve par exemple le mode d'autonomie, le but courant, la tâche en cours de réalisation ainsi que les contraintes temporelles relatives à ces buts et tâches.

Les agents de type comportement sensorimoteur sont essentiellement caractérisés par leur autonomie en suivant le formalisme défini dans la section 3.2 de ce chapitre. L'état des comportements sensorimoteurs est également défini par les ressources en cours d'utilisation.

L'état du système Homme-machine noté e_S est donc défini par un vecteur composé des états décrits précédemment : $e_S = (e_{OH}, e_R, e_{MIC}, e_{CSI}, \dots, e_{CSn})$.

3.2.2 Définition d'une action

La définition d'une action contient les éléments suivants :

- des pré-conditions notées $Pre(a)$: elles correspondent aux conditions d'application nécessaires à la réalisation de l'action et sont constituées d'une conjonction et/ou d'une disjonction de faits. Ces faits peuvent être des évaluations logiques, numériques ou des affectations de variables [Nau 2003].
- des effets notés $Post(a)$: ils correspondent à l'application de l'action à l'état du monde et sont constitués d'une conjonction et/ou d'une disjonction de faits qui peuvent être séparés en deux sous-listes : les ajouts et les suppressions qui correspondent respectivement à des faits devant être ajoutés et retirés de la base de faits,
- les ressources nécessaires à sa réalisation,
- les propriétés de concurrence de l'action, c'est-à-dire les actions réalisables ou requises en même temps que l'action.

Soit $Act = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ l'ensemble des actions composant les différentes activités du système Homme-robot : la réalisation d'un but, la sélection d'une alternative de réalisation du but appropriée au contexte et la définition d'un plan d'action permettant la réalisation du but. Une action α_k peut être considérée comme une action élémentaire entre deux états e_i et e_j tels que $\alpha_k(e_i) = e_j$ avec $\alpha_k \in Act$ où l'état e_i vérifie les préconditions de l'ensemble $Pre(a)$ et où l'état e_j correspond à l'état résultant de l'application des effets de l'action α_k , c'est-à-dire $Post(a)$.

Chaque action est caractérisée par des ressources nécessaires à sa mise en œuvre. Plusieurs ensembles relatifs aux ressources du système Homme-robot doivent être définis afin de prendre en compte la dynamique du système.

Soit $D = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ l'ensemble des ressources disponibles. Les ressources initiales du système en l'absence de toute action en cours de réalisation sont connues, limitées et quantifiables. Soit $U(x) \subseteq D$ l'ensemble des ressources utilisables par un agent x . Une ressource peut ne pas appartenir à l'ensemble des ressources utilisables par un agent pour deux raisons :

- La ressource n'appartient pas à l'ensemble des ressources disponibles.
- L'agent n'a pas les compétences, les capacités ou les autorisations nécessaires pour accéder à la ressource.

Soit $R(\alpha)$ l'ensemble des ressources nécessaires à la réalisation de l'action α pour passer de l'état initial à l'état final, c'est-à-dire pour appliquer les effets de l'action a . L'application de ces effets consiste à appliquer chaque fait de l'ensemble $Post(a)$ sur l'état du monde. On définit ensemble $G(x, \alpha)$ l'ensemble des ressources allouées à l'agent x pour l'action α tel que $G(x, \alpha) = U(x) \cap R(\alpha)$.

A partir des ressources allouées à un agent, il est possible de définir les ressources manquantes à un agent pour réaliser une action. Soit $M(x, \alpha)$ les ressources manquantes à un agent x pour réaliser une action α tel que $M(x, \alpha) = R(\alpha) - G(x, \alpha)$.

3.2.3 Définition d'une tâche primitive

Soit $\theta = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ l'ensemble des tâches réalisables par le système Homme-robot. On définit une tâche de la façon suivante : soit $T_{ij} = (e_i, e_j)$ la tâche permettant de faire passer le système d'un état e_i à un état e_j .

A une tâche primitive peut être appliquée une opération de décomposition de la tâche en une suite finie d'actions. On définit un couple (T_p, Δ) où T_p est une tâche primitive et Δ une suite finie d'actions permettant de réaliser la tâche primitive T_p telle que $\Delta = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)$.

Une même tâche primitive peut être décomposée de plusieurs façons différentes. Les préconditions d'une tâche primitive correspondent aux préconditions de la première action de la décomposition. L'état final de la tâche primitive correspond à l'application de la dernière action de la décomposition sur l'état du monde.

Une tâche T_{ij} est considérée comme primitive et réalisable si et seulement s'il existe au moins une décomposition selon une séquence finie d'actions notée $\Delta = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ telle que $\alpha_m(\alpha_{m-1}(\dots\alpha_1(e_i))) = e_j$. A partir de cette séquence d'actions, on définit le prédicat réalisable (Δ, T) qui permet d'établir qu'une tâche T est réalisable selon la séquence d'actions Δ telle que $\text{realisable}(\Delta, T_{ij}) \leftrightarrow \exists \Delta = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \in Act^m, \alpha_m(\alpha_{m-1}(\dots\alpha_1(e_i))) = e_j$.

La Figure 30 illustre la notion de tâche primitive ainsi que l'application du prédicat réalisable (Δ, T) . Une tâche primitive est ainsi réalisable selon différentes séquences d'actions possibles.

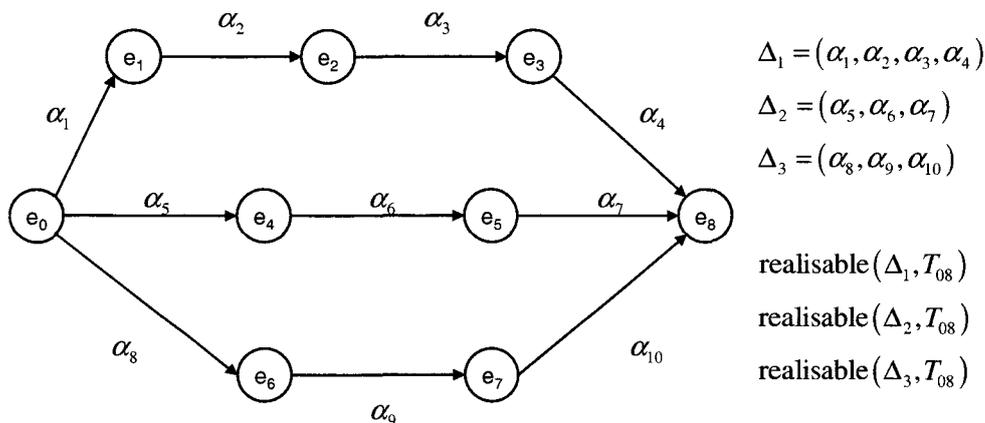


Figure 30. Représentation d'une tâche primitive.

Plusieurs agents peuvent être impliqués dans la réalisation d'une tâche primitive selon une forme de coopération augmentative ou intégrative. Dans le cas d'une coopération intégrative, la séquence d'actions correspondant à la tâche primitive est alors divisée en séquences

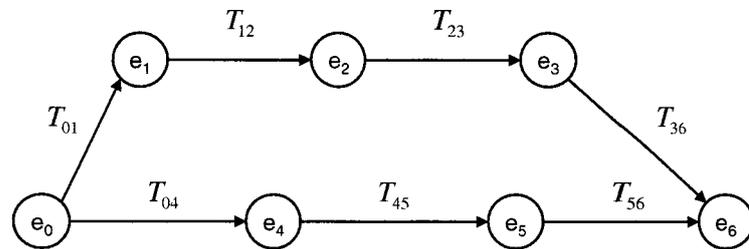
distinctes sur lesquelles un seul agent est impliqué. Dans le cas d'une coopération augmentative, les agents impliqués sur la tâche primitive sont affectés à l'intégralité de la séquence d'actions.

3.2.4 Définition d'une tâche composée

Les tâches composées sont définies indépendamment des agents et ne concernent donc pas nécessairement un agent unique. Plusieurs agents peuvent en effet être impliqués dans la réalisation des sous-tâches constituant une tâche composée. Une tâche composée peut être décomposée en plusieurs sous-tâches composées ou primitives. De la même façon que pour une tâche primitive, plusieurs décompositions sont possibles pour une tâche composée.

La structure de méthode peut également être appliquée à une tâche composée. Dans le cas d'une tâche composée, la méthode est représentée par un couple (T_c, d_c) où T_c est la tâche composée et $d_c = ((pre_1, sub_1), \dots, (pre_m, sub_m))$ la liste des décompositions possibles pour la tâche T_c . Un élément de la liste d_c est un couple (pre_k, sub_k) composé des préconditions, notées pre_k . Ces préconditions sont semblables aux préconditions d'une action, c'est-à-dire une conjonction de faits, et sont nécessaires à la réalisation de la décomposition associée. Cette décomposition, notée sub_k , peut être constituée de tâches composées et/ou primitives. Lorsque les préconditions pre_k sont remplies, la décomposition sub_k de T_c est possible.

La Figure 31 illustre la notion de tâche composée réalisable selon différentes décompositions. Chacune des tâches d'une décomposition possible est une tâche primitive ou composée. A chaque décomposition est associé un ensemble de préconditions nécessaires pour la réalisation de la tâche.



$$(T_{06}, d_{06})$$

$$d_{06} = ((pre_1, (T_{01}, T_{12}, T_{23}, T_{36})), (pre_2, (T_{04}, T_{45}, T_{56})))$$

Figure 31. Représentation d'une tâche composée.

A partir des notions d'actions et de tâches, on définit à présent les aspects sémantiques de l'autonomie, à savoir les compétences, les capacités et les prescriptions d'un agent.

3.3 Aspects sémantiques de l'autonomie

L'autonomie d'un agent x est caractérisée par le triplet suivant : $(S(x), C(x), P(x))$ où $S(x)$ représente l'ensemble des compétences de l'agent x , $C(x)$ l'ensemble des capacités de cet agent et $P(x)$ l'ensemble de ses prescriptions.

3.3.1 Définition des compétences

La notion de compétence associe à une tâche T donnée une alternative composée d'une séquence finie d'actions. Une même tâche peut alors être associée à plusieurs alternatives. L'association entre une tâche donnée T et une séquence d'actions Δ permettant sa réalisation est testée par le prédicat $\text{realisable}(\Delta, T)$ précédemment défini. Soit $S(x)$ l'ensemble des compétences d'un agent x ,

$$S(x) = \left\{ (\Delta, T_{ij}) \in Act^m \times \theta \mid \text{realisable}(\Delta, T_{ij}) \right\}.$$

La distinction entre tâche primitive et tâche composée ne s'applique pas au niveau de l'ensemble de compétences d'un agent. En effet, les compétences d'un agent supposent que l'on est dans le cas d'une situation connue et une tâche composée peut être finalement décomposée en une suite d'actions finie. On considère qu'un agent est compétent si au moins une décomposition d'actions est connue pour une tâche primitive ou composée.

La distinction entre tâche primitive et tâche composée reste cependant nécessaire dans le cadre d'un système où plusieurs agents coopèrent. Dans ce cas, un agent peut inclure dans son plan d'action une procédure accomplie par un autre agent. Un agent n'est alors pas compétent pour la tâche composée globale mais uniquement pour une sous-tâche, composée ou primitive, de la tâche globale alors qu'un ensemble d'agents est compétent pour la tâche globale. Cette distinction sera formalisée dans l'application du formalisme à un ensemble d'agents.

Relativement à l'ensemble de compétences, on définit ensuite le prédicat $s(x, T_{ij})$ qui détermine si l'agent x est compétent pour une tâche T_{ij} . Ce prédicat s'écrit :
 $s(x, T_{ij}) \leftrightarrow \exists \Delta = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), (\Delta, T_{ij}) \in S(x).$

3.3.2 Définition des capacités

Les capacités d'un agent évoluent au cours du temps en fonction des ressources disponibles. $C(x, t)$ représente l'ensemble des capacités d'un agent à un instant t et $c(x, T_{ij}, t)$ détermine si l'agent x a les capacités de réaliser la tâche T_{ij} à l'instant t . Par souci de simplification dans les notations, nous omettrons le paramètre t dans la suite.

L'ensemble des capacités d'un agent est défini en fonction de ses compétences. Si les compétences sont absentes, le système ne peut avoir les capacités de remplir la tâche. Les tâches composant l'ensemble des capacités d'un agent appartiennent donc nécessairement à son ensemble de compétences. Si les compétences sont présentes, on peut définir un prédicat, noté $c(x, T_{ij})$, relatif aux ressources permettant de déterminer si l'agent a les capacités de réaliser la tâche. Soit $C(x)$ l'ensemble des capacités d'un agent x ,

$$C(x) = \left\{ T_{ij} \in \theta \mid \exists (\Delta, T_{ij}) \in S(x), c(x, T_{ij}) \right\}.$$

On définit alors le prédicat $c(x, T_{ij})$ qui détermine si l'agent x a les capacités pour réaliser la tâche T_{ij} . Ce prédicat s'écrit :

$$c(x, T_{ij}) \leftrightarrow \left(\exists \Delta \in Act^m, \text{realisable}(\Delta, T_{ij}), \forall \alpha_k \in \Delta, R(\alpha_k) \subseteq G(x, \alpha_k) \right).$$

Ce prédicat traduit le fait que les ressources allouées à l'agent sont au moins égales aux ressources requises par les actions nécessaires à la réalisation de la tâche. Ces actions sont données par l'application du prédicat réalisable(Δ, T) sur une séquence d'actions donnée.

3.3.3 Définition des prescriptions

De la même façon, que pour les capacités, les prescriptions évoluent au cours du temps et le paramètre t est omis des notations des prescriptions.

La dimension prescriptive de l'autonomie peut être définie relativement à des permissions et des obligations. Les permissions sont déclinées en permissions positives (autorisations), notées A^+ et permissions négatives (interdictions), notées A^- . Les obligations sont déclinées en obligations positives (obligations), notées O^+ et obligations négatives (absences d'obligation), notées O^- [Bradshaw *et al.* 2004]. On définit alors l'ensemble $Pol = \{A^+, A^-, O^+, O^-\}$.

L'ensemble des prescriptions d'un agent est constitué des couples composés d'une action à laquelle est associée une prescription issue de l'ensemble Pol . Soit $P(x)$ l'ensemble des prescriptions d'un agent x , $P(x) = \{(\alpha, pol) \in Act \times Pol\}$.

On définit un prédicat associé aux prescriptions permettant de déterminer s'il n'est pas explicitement interdit à un agent d'accomplir une tâche selon une décomposition donnée, c'est-à-dire si la prescription associée à une action est différente d'une permission négative, qui équivaut à une interdiction. Ce prédicat est défini de la façon suivante :

$$p(x, T_{ij}) \leftrightarrow (\exists \Delta \in Act^m, \text{realisable}(\Delta, T_{ij}), \forall \alpha_k \in \Delta, \exists!(\alpha_k, pol) \in P(x), pol \neq A^-)$$

3.3.4 Définition de l'autonomie à partir des aspects sémantiques

L'autonomie d'un agent évolue au cours du temps en fonction de ses capacités et de ses prescriptions. A partir des aspects sémantiques de l'autonomie, on peut définir qu'un agent est autonome pour une tâche donnée si cet agent est compétent, s'il a les capacités de réaliser la tâche et s'il ne lui est pas interdit de réaliser la tâche. On définit alors ce fait par le prédicat suivant :

$$a(x, T_{ij}) \leftrightarrow s(x, T_{ij}) \wedge c(x, T_{ij}) \wedge p(x, T_{ij}).$$

L'autonomie d'un agent est alors donnée par l'ensemble des tâches pour lesquelles il est autonome :

$$A(x) = \{T_{ij} \in \theta \mid a(x, T_{ij})\}.$$

La mise en œuvre du contrôle coopératif Homme-robot nécessite de prendre en compte l'autonomie des différents agents présents au sein du système. Le formalisme proposé ici pour un agent peut être étendu à un ensemble d'agents afin de formaliser l'autonomie globale du système.

3.4 Extension de la définition de l'autonomie

Soit E un ensemble d'agents, l'ensemble des compétences de E correspond à l'union des ensembles de compétences de chacun des agents. Cet ensemble s'écrit de la façon suivante :

$$S(E) = \{T_{ij} \in \theta \mid s(E, T_{ij})\}.$$

Le prédicat relatif aux compétences d'un ensemble d'agents E pour une tâche T_{ij} est un prédicat récursif qui teste si un agent est compétent pour une tâche ou s'il existe au moins un agent de l'ensemble compétent pour chacune des sous-tâches d'une décomposition possible d'une tâche composée. Ce prédicat s'écrit de la façon suivante :

$$s(E, T_{ij}) \leftrightarrow (\exists x \in E, s(x, T_{ij})) \vee (\exists (T_{ij}, d_c), \exists d = (pre, sub) \in d_c, \forall T_{az} \in sub, s(E, T_{az})).$$

Afin de définir les capacités d'un ensemble d'agents, il est nécessaire d'étendre la définition de l'ensemble des ressources utilisables par un ensemble d'agents, noté $U(E)$.

Deux types de ressources doivent être distinguées que l'on peut qualifier de ressources qualitatives et quantitatives. Les ressources quantitatives (ressources de mobilité, ressources de calcul d'algorithmes ou de comportements sensorimoteurs...) sont quantifiables et peuvent être cumulées entre les différents agents. Pour ce type de ressources, un opérateur de sommation peut être appliqué. Les ressources qualitatives (capteurs, effecteurs...) quant à elles ne sont pas quantifiables. Pour ce type de ressources, l'opérateur ensembliste d'union peut être appliqué. La ressource présente dans l'ensemble $U(E)$ est alors la ressource identique à celle présente dans les ensembles des agents. On définit $U(E)$ de la façon suivante : $U(E) = \bigcup_{x \in E} (\forall r \in U(x), r \text{ est qualitative}) \cup \sum_{x \in E} (\forall r \in U(x), r \text{ est quantitative})$.

De même que précédemment, les ressources allouées à l'ensemble d'agents E pour l'action α sont définies de la façon suivante : $G(E, \alpha) = R(\alpha) \cap U(E)$.

Soit $C(E)$ l'ensemble des capacités d'un ensemble d'agents E ,

$$C(E) = \{T_{ij} \in S(E) \mid c(E, T_{ij})\}.$$

Comme précédemment, on définit le prédicat $c(E, T_{ij})$ qui détermine si un ensemble d'agents E donné a les capacités pour réaliser la tâche T_{ij} . Ce prédicat permet de savoir si un agent a les capacités de réaliser la tâche ou s'il existe, pour chacune des sous-tâches composant la tâche composée, au moins un agent ayant les capacités de réaliser cette sous-tâche. Ce second prédicat introduit également une clause supplémentaire qui permet de prendre en compte les capacités résultant de la mutualisation des ressources de plusieurs agents comme cela peut être le cas dans une forme de coopération augmentative. Ce prédicat s'écrit :

$$\begin{aligned} c(E, T_{ij}) \leftrightarrow & \\ & (\exists x \in E, c(x, T_{ij})) \vee \\ & (\exists \Delta \in Act^m, \text{realisable}(\Delta, T_{ij}), \forall \alpha_k \in \Delta_x, (R(\alpha_k) \subseteq G(E, \alpha_k))) \vee \\ & (\exists (T_{ij}, d_c), \exists d = (pre, sub) \in d_c, \forall T_{az} \in sub, c(E, T_{az})) \end{aligned}$$

Soit $P(E)$ l'ensemble des prescriptions d'un ensemble d'agents E ,

$$P(E) = \{\forall x \in E, (x, P(x))\}.$$

Le prédicat défini pour les prescriptions d'un ensemble d'agents est semblable au prédicat défini pour les compétences d'un ensemble d'agents et est défini de la façon suivante :

$$p(E, T_{ij}) \leftrightarrow (\forall x \in E, p(x, T_{ij})) \vee (\exists (T_{ij}, d_c), \exists d = (pre, sub) \in d_c, \forall T_{az} \in sub, p(E, T_{az})).$$

Dans le cas d'un ensemble d'agents, on considère donc que l'ensemble d'agents est autorisé à réaliser une tâche si chaque agent y est autorisé. Cette définition permet de résoudre les contraintes liées à des prescriptions différentes et de limiter le traitement des alternatives non acceptables comme cela peut être le cas lors de la réalisation d'une tâche primitive selon une forme de coopération augmentative.

L'autonomie des agents du système détermine les conditions d'application des formes de coopération. Les formes de coopération de Schmidt [1991] peuvent être définies en fonction des ensembles de compétences, de capacités et de prescriptions d'un agent.

4 Définition des conditions d'application de la coopération Homme-robot

Les formes de coopération précédemment définies (cf. section 5.2 du chapitre 2) ont pour but de répondre à un manque d'autonomie de la part d'un des agents pour les formes de coopération augmentative et intégrative ou d'utiliser de façon complémentaire l'autonomie, opérationnelle et décisionnelle, des agents pour la forme de coopération confrontative. Le résultat est alors un ajustement de l'autonomie de l'un des agents, cet ajustement pouvant alors prendre différentes formes (ajustement des compétences, des capacités ou des prescriptions) selon le manque d'autonomie auquel la forme de coopération a répondu. Les formes de coopération répondent à des besoins spécifiques et certaines conditions doivent être remplies pour leur mise en œuvre.

4.1 Conditions pour la coopération augmentative

La forme de coopération augmentative s'applique lorsque les agents ont des savoir-faire similaires. La tâche à accomplir peut être divisée en sous-tâches similaires. Les agents impliqués dans l'activité de coopération doivent être compétents pour la réalisation de la tâche concernée. Ils doivent également avoir les autorisations nécessaires pour mener cette tâche. Enfin, la somme des ressources disponibles pour chaque agent doit égaler ou dépasser les ressources nécessaires pour la réalisation de la tâche. Soient les conditions nécessaires à la mise en œuvre de la forme de coopération augmentative, notées $CA(\{x, y\}, T_{ij})$, entre deux agents x et y afin de réaliser une tâche T_{ij} :

$$\left(\begin{array}{l} (s(x, T_{ij}) \wedge s(y, T_{ij})) \wedge \\ (c(\{x, y\}, T_{ij})) \wedge \\ (p(x, T_{ij}) \wedge p(y, T_{ij})) \end{array} \right) \rightarrow CA(\{x, y\}, T_{ij})$$

La Figure 32 illustre la coopération augmentative entre deux agents x et y . On suppose que les deux agents x et y ont les mêmes ensembles de compétences et un ensemble de prescriptions les autorisant à réaliser la tâche T_{06} . On suppose que les agents n'ont pas les capacités pour réaliser la tâche composée T_{06} . Les deux agents ne sont pas autonomes. Cependant, la

mutualisation de leurs ressources permet à l'ensemble des deux agents d'avoir les capacités de réaliser cette tâche. Les conditions d'application d'une forme de coopération augmentative sont alors réunies. Les deux agents réalisent alors simultanément les sous-tâches puis les actions composant la tâche T_{06} .

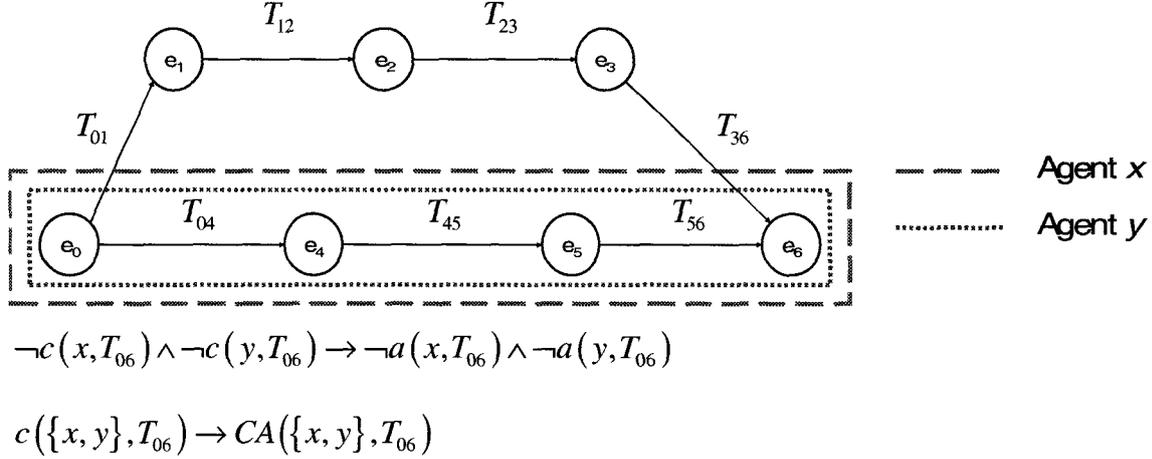


Figure 32. Illustration de la coopération augmentative.

4.2 Conditions pour la coopération intégrative

La forme de coopération intégrative répond à une spécialisation des agents. Ces agents possèdent ainsi des compétences ou des prescriptions spécifiques à chacun d'entre eux. La mise en œuvre de la coopération intégrative nécessite que les agents considérés soient autonomes pour réaliser la tâche qui leur est spécifique, c'est-à-dire qu'ils aient les compétences, capacités et autorisations nécessaires. Soient les conditions nécessaires à la mise en œuvre de la forme de coopération intégrative, notées $CI(\{x, y\}, T_{ij})$, entre deux agents x et y afin de réaliser une tâche T_{ij} :

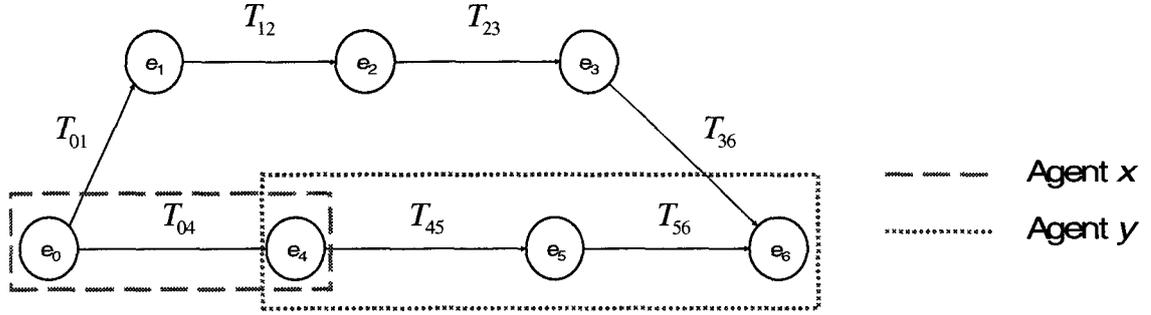
$$\left(\begin{array}{l}
 \exists T_{ik} \in \theta, T_{kj} \in \theta, T_{ij} = T_{ik} \cup T_{kj}, \\
 (s(x, T_{ik}) \wedge s(y, T_{kj})) \wedge \\
 (c(x, T_{ik}) \wedge c(y, T_{kj})) \wedge \\
 (p(x, T_{ik}) \wedge p(y, T_{kj}))
 \end{array} \right) \rightarrow CI(\{x, y\}, T_{ij})$$

Les conditions pour la coopération intégrative peuvent être simplifiées en utilisant la définition de l'autonomie d'un agent :

$$\left(\begin{array}{l}
 \exists T_{ik} \in \theta, T_{kj} \in \theta, T_{ij} = T_{ik} \cup T_{kj}, \\
 a(x, T_{ik}) \wedge a(y, T_{kj})
 \end{array} \right) \rightarrow CI(\{x, y\}, T_{ij})$$

La Figure 33 illustre la coopération intégrative entre deux agents x et y pour réaliser une tâche T_{06} . On suppose que les agents x et y ne sont pas autonomes pour réaliser la totalité de la tâche T_{06} . Une décomposition possible de cette tâche en permet cependant la réalisation. Sur cette

décomposition, l'agent x est autonome pour réaliser une partie de la tâche et l'agent y la partie restante. La totalité de la tâche étant couverte, les conditions d'application d'une forme de coopération intégrative sont alors réunies.



$$a(x, T_{04}) \wedge a(y, T_{46}) \rightarrow CI(\{x, y\}, T_{06})$$

Figure 33. Illustration de la coopération intégrative.

4.3 Conditions pour la coopération confrontative

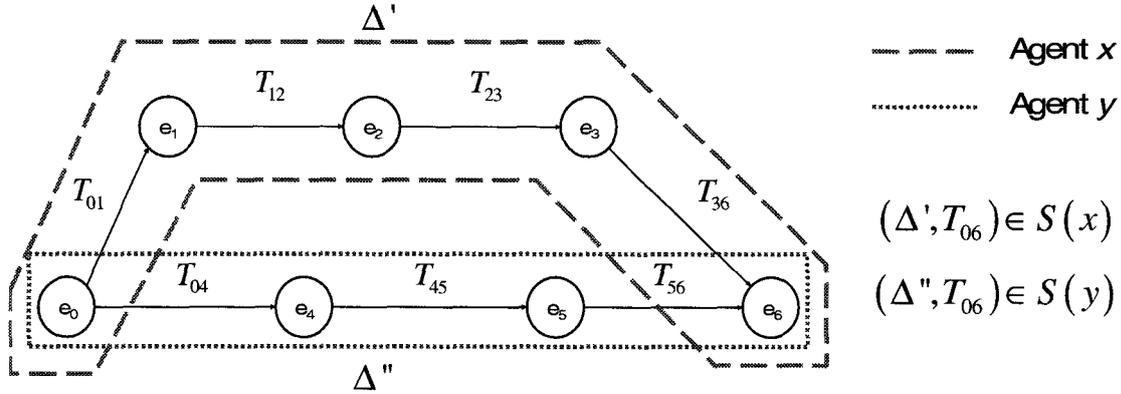
La forme de coopération confrontative illustre une situation dans laquelle les agents ont des savoir-faire similaires. La coopération confrontative peut être mise en œuvre lorsque les agents ont chacun une séquence d'actions permettant la réalisation de la tâche et que ces agents sont autonomes pour réaliser cette solution. Soient les conditions nécessaires à la mise en œuvre de la forme de coopération confrontative, notées $CC(\{x, y\}, T_{ij})$, entre deux agents x et y afin de réaliser une tâche T_{ij} :

$$\left(\begin{array}{l} \exists \Delta' \in Act^m, \text{realisable}(\Delta', T_{ij}), \\ \exists \Delta'' \in Act^m, \text{realisable}(\Delta'', T_{ij}), \\ \Delta' \neq \Delta'', (\Delta', T_{ij}) \in S(x), (\Delta'', T_{ij}) \in S(y), \\ (s(x, T_{ij}) \wedge s(y, T_{ij})) \wedge \\ (c(x, T_{ij}) \wedge c(y, T_{ij})) \wedge \\ (p(x, T_{ij}) \wedge p(y, T_{ij})) \end{array} \right) \rightarrow CC(\{x, y\}, T_{ij})$$

De même que précédemment, les conditions peuvent être simplifiées en utilisant le prédicat relatif à l'autonomie d'un agent :

$$\left(\begin{array}{l} \exists \Delta' \in Act^m, \text{realisable}(\Delta', T_{ij}), \\ \exists \Delta'' \in Act^m, \text{realisable}(\Delta'', T_{ij}), \\ \Delta' \neq \Delta'', (\Delta', T_{ij}) \in S(x), (\Delta'', T_{ij}) \in S(y), \\ (a(x, T_{ij}) \wedge a(y, T_{ij})) \end{array} \right) \rightarrow CC(\{x, y\}, T_{ij})$$

La Figure 34 illustre la forme de coopération confrontative entre deux agents x et y . Ces deux agents sont autonomes pour réaliser la totalité de la tâche T_{06} . L'existence de deux décompositions différentes pour lesquelles chaque agent est autonome permet l'application de la forme de coopération confrontative.



$$a(x, T_{06}) \wedge a(y, T_{06}) \rightarrow CC(\{x, y\}, T_{06})$$

Figure 34. Illustration de la coopération confrontative.

La mise en œuvre de ces formes de coopération dans l'activité du système homme-robot répond à des besoins différents, selon la forme de coopération sélectionnée et la situation. La coopération s'effectue à différents niveaux d'activité qui définissent l'autonomie d'un agent, à savoir la réalisation d'un but donné, la sélection d'une alternative appropriée au contexte pour réaliser un but donné et la définition d'un plan d'action permettant la réalisation d'un but. Ces niveaux d'activité sont à présent définis.

5 Réalisation d'un but

5.1 Mise en œuvre de la réalisation d'un but

La réalisation d'un but donné est le premier niveau d'activité définissant l'autonomie d'un agent. Ce niveau consiste à exécuter la séquence d'actions obtenues par les décompositions successives des tâches composant le plan. Les conditions à la réalisation d'une tâche sont l'autonomie d'un agent par rapport à cette tâche et la réalisabilité de la tâche précédemment définie, c'est-à-dire l'existence d'une séquence d'actions reliant l'état initial à l'état final de la tâche à un instant donné.

On propose un algorithme général de réalisation d'un but où celui-ci correspond à une séquence d'actions. Pour chaque action de la séquence, les ressources nécessaires à sa réalisation sont allouées aux agents autonomes pour celle-ci. L'ensemble des ressources disponibles est alors actualisé. L'action est ensuite réalisée par l'application des effets la définissant et l'état du système est modifié en conséquence.

Dans un contexte dynamique, la réalisation du but est remise en question lors de l'occurrence d'un événement imprévu. L'autonomie ajustable va prendre différentes formes en fonction de la situation et de l'autonomie de chacun des agents impliqués dans le processus de prise de décision et de résolution de problèmes.

Au cours de la réalisation des actions, si les préconditions de l'action suivante, ou plus généralement du plan global, ne sont pas remplies (Figure 35, ligne 7), les étapes du plan global sont triées en fonction de leur distance par rapport à l'état courant (ligne 8). Une requête est émise vers l'algorithme de replanification qui tente alors de reconstruire un chemin depuis l'état courant indésirable jusqu'à une étape du plan global (ligne 10). Une alternative est ensuite sélectionnée dans la liste retournée par le planificateur au moyen du processus de prise de décision détaillé dans la section suivante (ligne 11). Un nouveau plan est ensuite constitué (lignes 12 et 13) en concaténant l'alternative sélectionnée et le reste du plan global depuis la fin de l'alternative jusqu'à la tâche représentant le but final de la mission.

L'algorithme de déroulement d'un but sous planification continue s'inscrit dans une approche résiliente proactive qui consiste à éliminer les défauts du plan et à tirer parti de la résolution de conflits. Dans le cadre d'un système résilient, l'anticipation de situations indésirables est liée à la surveillance constante de l'état du système qui permet de déterminer les facteurs de maintien sous contrôle d'une situation.

```

1  REALISATION_BUT(Sequence sq)
2  tant que non_vide(sq)
3      allouer(ressources_necessaires, action, agents)
4      actualiser(ressources_disponibles)
5      appliquer(effets(action))
6      actualiser(etat_systeme)
7      si non(precond(action_suivante)) ou non(precond(plan_global))
8      alors
9          candidats<-trier_étapes(plan_global)
10         soit étape s dans candidats tel que
11         liste_alternatives<-PLANIFICATEUR(autonomie, s, état du système)
12         alternative <- SELECTION(liste_alternatives)
13         suite<- plan(s, but_final)
14         plan_global<-ajouter(alternative, suite)

```

Figure 35. Algorithme de déroulement d'un but sous planification continue.

L'autonomie ajustable se traduit par une répartition des tâches différente de la répartition définie par le plan initial. Cette modification de la répartition des tâches est valable pour un ajustement vertical ou horizontal (cf. section 1.5 de ce chapitre). Notre approche complète l'autonomie ajustable par un ajustement de l'autonomie d'un agent au sein du système, cet ajustement pouvant alors porter sur les ensembles définissant l'autonomie de cet agent, à savoir les compétences, les capacités et les prescriptions. Les capacités peuvent être modifiées par des perturbations externes, des défaillances techniques ou des erreurs humaines.

La mise en œuvre d'une forme de coopération particulière est prise en compte au premier niveau d'activité définissant l'autonomie, c'est-à-dire la réalisation d'un objectif, avec les contraintes spécifiques à chacune des formes.

5.2 Mise en œuvre d'une forme de coopération

Les activités préliminaires au déroulement d'une forme de coopération consistent à décomposer la tâche à réaliser en sous-tâches en fonction du savoir-faire des agents et à communiquer le savoir-faire des différents agents [Millot 1998]. Dans le cas présent, cette phase correspond à l'acquisition de l'autonomie des agents.

Dans la coopération augmentative, les agents réalisent les mêmes tâches, les compétences et les prescriptions ne sont alors pas des paramètres discriminants. La forme de coopération augmentative prend alors la forme d'un contrôle partagé exclusivement effectué sur les mêmes tâches par les agents impliqués dans l'activité de coopération. Les compétences et les capacités d'un agent ne sont pas modifiées par l'activité de coopération. Les capacités du système global sont quant à elles augmentées.

Deux formes d'interaction peuvent résulter de la mise en œuvre d'une coopération intégrative : le contrôle partagé et l'échange de contrôle [Sheridan 1992], ces deux formes d'interaction pouvant concerner des sous-tâches différentes. Le contrôle partagé peut s'appliquer à des sous-tâches pouvant être effectuées en parallèle, en prenant en compte les contraintes relatives à l'utilisation des ressources nécessaires à la réalisation des tâches. L'échange de contrôle répond à l'existence de contraintes de précédence entre les sous-tâches et correspond à un processus séquentiel. Lors de l'acquisition des résultats d'un agent, il est possible que les résultats diffèrent de ce qui était attendu. Dans ce cas, la résilience du système dépend de la capacité de celui-ci à s'adapter aux résultats fournis et à réaliser la tâche en conséquence. Deux cas sont possibles selon que les tâches effectuées sont parallèles ou séquentielles. Dans le cas de tâches parallèles, chaque agent peut exercer un contrôle continu sur la tâche de l'autre agent. Dans le cas de tâches séquentielles, le contrôle s'effectue lors de la transition du contrôle entre les agents.

La forme de coopération confrontative est assimilable à un processus de planification continue s'exécutant au niveau du plan. Cette forme de coopération contribue à la résilience du système au travers des interactions entre les agents et de la comparaison de leurs résultats qui mène à l'acceptation d'une solution commune. La coopération confrontative a pour but d'optimiser et de fiabiliser le plan d'actions qui permet la réalisation de la tâche. Ce plan d'actions peut consister en une concaténation de séquences spécifiques à certains agents. On est alors dans le cadre d'une coopération intégrative. Le plan d'actions retenu peut également amener les agents à coopérer sur une même séquence de façon à augmenter les capacités et les performances sur une sous-tâche précise. On est alors dans le cadre d'une coopération augmentative. La décision résultant d'une coopération confrontative peut enfin décider de l'affectation de la globalité de la tâche à un seul agent.

Le choix d'une forme de coopération spécifique à une tâche et plus généralement d'une alternative de réalisation d'une tâche est réalisé par le niveau d'activité correspondant à la sélection d'une alternative de réalisation.

6 Sélection d'une alternative de réalisation

La sélection d'une alternative appropriée au contexte consiste pour le système à sélectionner la meilleure alternative par rapport à des critères, objectifs et subjectifs. Les valeurs de ces critères sont calculées en fonction de l'autonomie des agents et évaluent la résilience du

système Homme-robot. La première étape de la méthode d'aide à la prise de décision pour la sélection d'une alternative de réalisation est la définition des critères à prendre en compte.

6.1 Définition des critères de résilience du système Homme-robot

Les travaux sur l'ingénierie de la résilience ont distingué des propriétés nécessaires à la conception de systèmes ou d'organisations résilientes. A partir des approches existantes dans la littérature, quatre critères ont été proposés : efficacité, adaptabilité, fonctionnement aux limites et interactions. Ces critères, qui rassemblent des indicateurs objectifs et subjectifs, sont à présent détaillés.

6.1.1 Détermination du critère d'efficacité

De façon générale, l'efficacité est définie en fonction des performances du système. On évalue au travers de ce critère l'écart par rapport aux performances optimales en fonction de contraintes données (contraintes temporelles, contraintes de ressources...).

Le critère d'efficacité comprend des indicateurs objectifs en rapport avec le type de mission à accomplir. Dans un contexte de mobilité robotisée, ces indicateurs sont par exemple le temps de réalisation de la mission, la distance parcourue...

6.1.2 Détermination du critère d'adaptabilité

Le critère d'adaptabilité se réfère aux menaces régulières et irrégulières pour lesquelles les facultés d'adaptation et d'élaboration de solutions du système sont primordiales. L'adaptabilité est donc liée au contrôle de la résilience par l'autonomie ajustable. L'élaboration de solutions dans le contrôle coopératif Homme-robot correspond à l'élaboration d'un plan basé sur l'autonomie des différents agents et sur la forme de coopération sélectionnée.

L'adaptabilité du système est donc dépendante du nombre de plans d'actions disponibles et de la diversité de ces plans d'actions en termes de mise en œuvre de comportements sensorimoteurs différents par exemple.

6.1.3 Détermination du critère de fonctionnement aux limites

Le fonctionnement aux limites est lié à l'interprétation de la résilience en termes de stabilité et de robustesse. Ce critère est lié au comportement du système lorsque celui-ci fonctionne à ses limites. Il peut donc être exploité pour analyser les transitions de comportements sensorimoteurs et de modes d'autonomie lors de l'occurrence d'une perturbation par exemple.

Le critère de fonctionnement aux limites permet de définir les limites des domaines de stabilité en obtenant pour une alternative donnée des valeurs limites pour des indicateurs. L'écart entre la valeur limite et la valeur observée d'un indicateur définit la marge par rapport à cet indicateur. Un second aspect concerne la tolérance par rapport à un indicateur et évalue le comportement d'un agent lorsque la marge par rapport à un indicateur atteint une valeur seuil. Cet aspect du critère peut être renseigné par une phase de capitalisation des réactions à différents événements indésirables.

6.1.4 Détermination du critère d'interactions

Les interactions sont liées au contrôle de la résilience par la coopération Homme-machine et par la mise en œuvre des trois formes de coopération : augmentative, intégrative et confrontative. Les interactions entre les agents sont spécifiques aux trois niveaux d'activité de l'autonomie : réalisation d'un but, sélection d'une alternative, définition d'un plan d'action. Au

dernier niveau, les interactions ont pour but de partager les informations nécessaires à la résolution d'un conflit et d'élaborer un plan impliquant plusieurs agents.

Chaque agent du système contribue à la réalisation du but en apportant son ensemble de compétences qui correspond à une alternative ou à une partie de l'alternative de réalisation du but. Au niveau du système, la contribution de chaque agent permet de mettre en œuvre un processus d'analyse hiérarchique afin d'ordonnancer les alternatives construites à partir de l'ensemble des agents.

6.2 Processus d'analyse hiérarchique des alternatives

6.2.1 Décomposition du problème

Le processus d'analyse hiérarchique ou AHP pour Analytic Hierarchy Process, est une méthode d'analyse multicritère proposée par Saaty [2000, 2008] qui permet de représenter hiérarchiquement un problème de prise de décision. Le choix s'est porté sur cette méthode pour sa capacité à exploiter des critères objectifs et subjectifs. La prise en compte d'indicateurs relatifs à l'opérateur humain dans l'évaluation de la résilience et du contrôle coopératif Homme-robot est alors possible. La structure hiérarchique de la méthode permet l'exploitation des critères de résilience et des indicateurs composant chacun des critères.

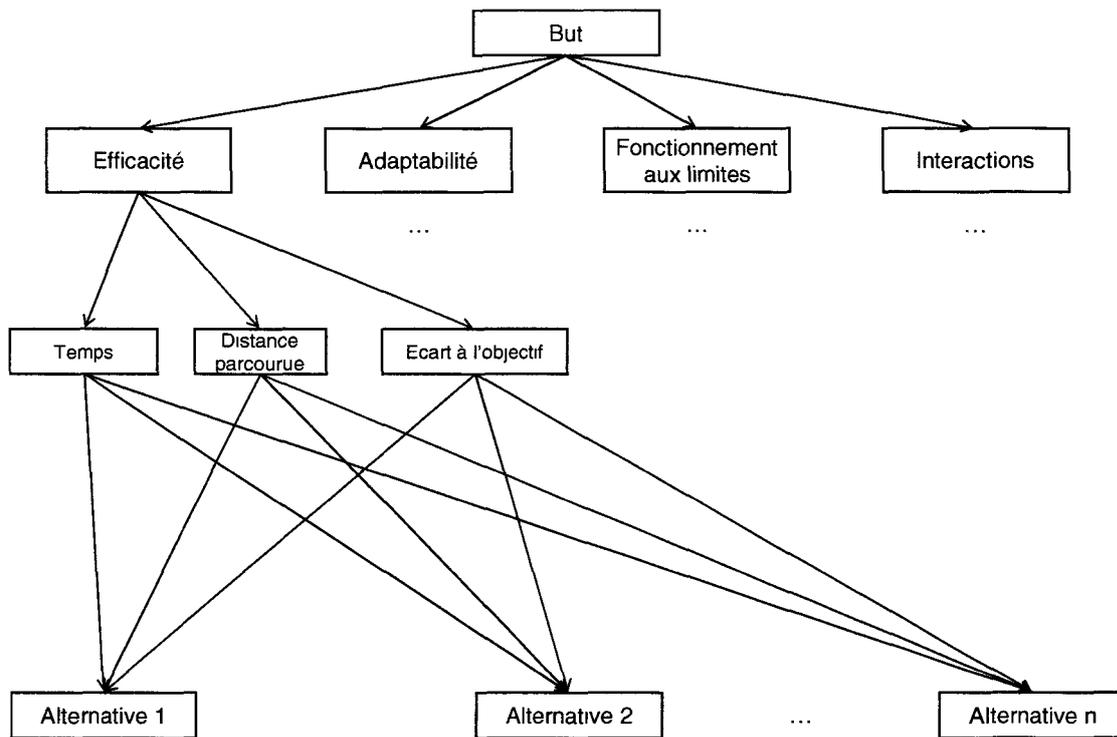


Figure 36. Exemple de hiérarchie pour une analyse multicritère.

La première étape d'une analyse hiérarchique est donc la construction de la hiérarchie des buts, critères et alternatives (Figure 36). Le but est donné par le fichier de mission. Les critères sont les critères de résilience du système Homme-robot, à savoir l'efficacité, l'adaptabilité, le fonctionnement aux limites et les interactions. Ces critères sont divisés en sous-critères qui correspondent aux indicateurs objectifs. Les alternatives représentent les différentes alternatives possibles pour la réalisation d'une tâche.

Cette méthode permet de prendre en compte des données objectives et subjectives. Les étapes de cette méthode sont les suivantes :

1. Comparaison des critères deux à deux selon une échelle de préférence de 1 à 9.
2. Déterminer l'importance de chaque critère.
3. Comparaison des alternatives deux à deux pour chaque critère.
4. Déterminer l'importance des alternatives par rapport à l'ensemble des critères.

6.2.2 Comparaisons binaires des critères

Le processus d'analyse hiérarchique se base sur les comparaisons binaires des critères, des indicateurs et des alternatives au moyen d'une échelle de préférence dont les valeurs sont consignées dans le Tableau 13. Cette échelle peut être complétée des valeurs paires intermédiaires afin de préciser les comparaisons entre des alternatives.

Valeur numérique de la comparaison (c_{ij})	Valeur qualitative de la comparaison
1	Importance égale des critères i et j
3	Critère i modérément plus important que le critère j
5	Critère i fortement plus important que le critère j
7	Critère i très fortement plus important que le critère j
9	Critère i extrêmement plus important que le critère j

Tableau 13. Valeurs qualitatives des comparaisons entre critères.

Les comparaisons des critères deux à deux sont organisées sous la forme d'une matrice C de la façon suivante :

$$\begin{cases} c_{ij} & \text{si le critère } i \text{ domine le critère } j \\ 1/c_{ij} & \text{si le critère } j \text{ domine le critère } i \\ 1 & \text{si aucun critère ne domine l'autre} \end{cases}$$

avec $c_{ij} \in [1;9]$

La première étape consiste à comparer les critères du premier niveau de la hiérarchie. Les quatre critères de résilience sont donc comparés deux à deux au moyen de l'échelle de préférence du Tableau 13. Un exemple de résultat de ces comparaisons est consigné dans le Tableau 14. Ce tableau peut correspondre au jugement d'un expert du domaine d'application. Ces matrices de comparaisons permettent de définir plusieurs types de résilience privilégiant certains critères ou indicateurs objectifs.

	Efficacité	Adaptabilité	Fonctionnement aux limites	Interactions
Efficacité	1	6	3	8
Adaptabilité	1/6	1	2	4
Fonctionnement aux limites	1/3	1/2	1	2
Interactions	1/8	1/4	1/2	1

Tableau 14. Exemple de comparaisons de critères deux à deux.

Ces matrices de comparaison permettent de privilégier certaines alternatives en fonction de situations particulières en définissant des types particuliers de résilience. Ces situations sont classées en fonction des menaces auxquelles le système peut être confronté : menaces régulières, menaces irrégulières et événements sans précédent. Ces différentes situations

nécessitent différentes réponses adaptées qui sont le résultat de différents types de résilience. Lors de l'occurrence d'un événement imprévu, la matrice correspondant au type de résilience nécessaire pour gérer cet événement est sélectionnée et utilisée dans le processus de prise de décision.

Ces comparaisons sont ensuite répétées pour les sous-critères d'un critère donné, c'est-à-dire pour les indicateurs objectifs composant un critère. Par exemple, les indicateurs relatifs à l'efficacité sont comparés entre eux. La deuxième étape consiste à présent à calculer l'importance relative de chaque critère.

6.2.3 Calcul de l'importance des critères

Les comparaisons évaluent la contribution de chaque indicateur objectif au critère correspondant. Pour le premier niveau de la hiérarchie, les comparaisons déterminent la contribution de chacun des critères de résilience à la réalisation du but. Cette contribution est calculée par une approximation du vecteur propre de la matrice que l'on appelle vecteur de priorité des critères. Plusieurs méthodes existent pour obtenir cette approximation. On détaille ici l'une d'entre elles composée des étapes suivantes :

1. Ajouter les valeurs d'une colonne de la matrice
2. Diviser chaque valeur d'une colonne par le total de la colonne obtenu en 1.
3. Calculer la moyenne de chaque ligne.

Le vecteur obtenu donne l'importance de chaque critère dans le choix d'une alternative pour réaliser le but. Soit la matrice de comparaison des matrices correspondant à l'exemple

précédent (Tableau 14) :
$$\begin{pmatrix} 1 & 6 & 3 & 8 \\ 1/6 & 1 & 2 & 4 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/8 & 1/4 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$
. On calcule le vecteur de priorité des critères

selon la méthode précédemment exposée. Le vecteur obtenu est le suivant :
$$\begin{pmatrix} 0.596 \\ 0.201 \\ 0.139 \\ 0.063 \end{pmatrix}$$
. Ce

vecteur indique que le critère d'efficacité est le plus important et contribue à 59.6% dans le choix d'une alternative.

Cette procédure est ensuite répétée pour le ou les niveaux inférieurs de la hiérarchie. Dans le cas de la hiérarchie de la Figure 36, un vecteur de priorité est déterminé pour les indicateurs objectifs de chaque critère. Appliquée au critère d'efficacité, la comparaison des indicateurs objectifs permet d'obtenir l'importance accordée au temps de réalisation par rapport à la distance parcourue par exemple. Soit la matrice relative aux indicateurs objectifs d'efficacité, respectivement le temps de réalisation, la distance parcourue et l'écart par rapport à

l'objectif :
$$\begin{pmatrix} 1 & 4 & 8 \\ 1/4 & 1 & 2 \\ 1/8 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$
. Le vecteur de priorité associé à cette matrice est le

suivant : $\begin{pmatrix} 0.727 \\ 0.182 \\ 0.09 \end{pmatrix}$. Celui-ci indique que le temps de réalisation est l'indicateur prioritaire dans l'évaluation de l'efficacité.

L'étape suivante de la procédure consiste à comparer les alternatives en fonction des critères présents au plus bas niveau de la hiérarchie. Ce niveau peut comporter à la fois des critères du premier niveau qui ne sont pas décomposés et des sous-critères d'un niveau inférieur. Dans le cadre de ce problème, les alternatives sont donc comparées en fonction des indicateurs objectifs composant chaque critère de résilience.

6.2.4 Comparaison des alternatives

Chaque alternative est caractérisée, via les tâches primitives la composant, par les valeurs des indicateurs objectifs. Une fonction $K_i(a(t_a), b(t_b))$ mesure l'écart entre la valeur d'un indicateur donné pour un critère i concernant deux alternatives a et b aux instants t_a et t_b :

$$K_i(a(t_a), b(t_b)) = v_i(b(t_b)) - v_i(a(t_a)).$$

Dans le cadre de la méthode AHP, les alternatives sont comparées deux à deux afin d'obtenir une matrice de préférence. On peut déduire que le calcul des valeurs des indicateurs pour des alternatives indépendantes est nécessaire uniquement pour $\text{rang}(a) > \text{rang}(b)$ avec $1 \leq \text{rang}(j) \leq n$ où n est le nombre d'alternatives.

Chaque valeur obtenue pour les différents indicateurs est alors transcrite en une valeur de l'échelle de préférence. Des seuils sont définis pour chaque indicateur permettant de convertir la valeur $K_i(a(t_a), b(t_b))$ en une valeur de l'échelle AHP. Un indicateur contribuant positivement à l'alternative a par rapport à l'alternative b correspond à une valeur c_{ab} telle que $9 \geq c_{ab} > 1$. De façon réciproque, un indicateur contribuant positivement à l'alternative b par rapport à l'alternative a correspond à la valeur c_{ba} telle que $1/9 \leq c_{ba} < 1$ et que $c_{ab} * c_{ba} = 1$. Dans le cas d'alternatives pour lesquelles les indicateurs objectifs ont des valeurs identiques, on a $c_{ab} = c_{ba} = 1$.

Dans le cas de deux agents ou plus impliqués sur une même tâche selon une forme de coopération augmentative, le calcul de la valeur d'un indicateur passe par une première étape qui consiste en l'union des capacités ou des ressources des agents impliqués. A partir des capacités totales des agents, les valeurs des indicateurs objectifs sont alors calculées pour l'alternative considérée.

La dernière étape consiste à sélectionner la meilleure alternative par rapport à l'ensemble des critères à partir des comparaisons des alternatives et des priorités des critères.

6.2.5 Classement des alternatives

Une matrice de comparaison est définie pour chaque indicateur objectif présent au plus bas niveau de la hiérarchie. Cette matrice est constituée selon la procédure présentée dans la section 6.2.4. Pour chacune de ces matrices, le vecteur de priorité est calculé selon la méthode décrite en 6.2.3. Ce vecteur de priorité donne le respect de chaque alternative par rapport à l'indicateur considéré.

Soit la matrice associée au temps de réalisation dans le cas où 3 alternatives sont comparées :

$$\begin{pmatrix} 1 & 1/4 & 1/8 \\ 4 & 1 & 1/2 \\ 8 & 2 & 1 \end{pmatrix}. \text{ Le vecteur de priorité de cette matrice est le suivant : } \begin{pmatrix} 0.077 \\ 0.308 \\ 0.615 \end{pmatrix}. \text{ Ce vecteur}$$

indique que la troisième alternative est celle qui privilégie le temps de réalisation.

Une matrice, notée G , est ensuite constituée à partir de ces vecteurs de priorité. On obtient une matrice $G=(g_{ij})$ de type (m, N) avec m le nombre d'alternatives et N le nombre d'indicateurs objectifs.

Soit la matrice G composée des vecteurs de priorité pour 3 alternatives, notées A, B et C et N

$$\text{indicateurs objectifs : } \begin{pmatrix} 0.077 & ind_{A2} & ind_{A3} & \dots & ind_{AN} \\ 0.308 & ind_{B2} & ind_{B3} & \dots & ind_{BN} \\ 0.615 & ind_{C2} & ind_{C3} & \dots & ind_{CN} \end{pmatrix}.$$

Le classement des alternatives est obtenu par la multiplication de la matrice G par un vecteur égal à la concaténation des vecteurs de priorité des critères de plus bas niveau. On obtient le

$$\text{vecteur suivant par concaténation des vecteurs de priorité des indicateurs objectifs : } \begin{pmatrix} 0.727 \\ 0.182 \\ 0.09 \\ p_4 \\ \dots \\ p_N \end{pmatrix}.$$

Ce dernier vecteur comprend donc N composantes pour les N indicateurs objectifs.

Dans le cas d'une hiérarchie bâtie sur plusieurs niveaux, chaque critère de plus bas niveau est pondérée par la valeur du critère parent. Dans notre cas, les valeurs du vecteur de priorité des indicateurs objectifs sont pondérées par les valeurs du vecteur de priorité des critères de résilience. On rappelle donc le vecteur de priorité correspondant aux critères de résilience et

$$\text{calculé dans la section 6.2.3 : } \begin{pmatrix} 0.596 \\ 0.201 \\ 0.139 \\ 0.063 \end{pmatrix}.$$

On associe enfin un score à chaque alternative calculé. Pour l'alternative A , ce score est calculé de la façon suivante :

$$S_A = 0.077 \cdot 0.727 \cdot 0.596 + ind_{A2} \cdot 0.182 \cdot 0.596 + ind_{A3} \cdot 0.09 \cdot 0.596 + ind_{A4} \cdot p_4 \cdot 0.201 + \dots + ind_{AN} \cdot p_N \cdot 0.063$$

L'alternative associée à la plus grande valeur est celle correspondant aux choix inscrits dans les matrices de comparaison.

Les alternatives étudiées dans ce module de prise de décision correspondent à des décompositions, des séquences différentes pour la réalisation d'une tâche. Celles-ci correspondent aux formes de coopération applicables en fonction du contexte. La sélection d'une de ces alternatives de réalisation peut entraîner un ajustement de l'autonomie selon les deux aspects envisagés dans ces travaux, à savoir une modification de l'espace opérationnel de l'agent et une modification du mode d'autonomie global du système Homme-robot qui se traduit par une répartition des tâches différente entre les agents.

La différence dans l'évaluation de la résilience des systèmes organisationnels ou des systèmes socio-techniques et des systèmes écologiques vient du fait que pour ces derniers, la résilience caractérise la vitesse de retour à l'état initial du système concerné, i.e. avant la perturbation. Cette approche suppose l'existence d'un état unique d'équilibre. Dans les systèmes socio-techniques, on va accepter d'être dans un état différent de l'état initial, à condition que le niveau de performance soit suffisant. Cela se traduit par l'adoption d'une alternative dans un mode de fonctionnement différent ou ajoutant des contraintes propres à un mode d'autonomie particulier.

Les alternatives ne sont pas élaborées à ce niveau d'activité mais au niveau de la définition d'un plan d'action permettant la réalisation du but. Le processus d'élaboration des alternatives est un processus résilient qui se traduit par l'implication commune des agents du système. Ceux-ci mettent à contribution et confrontent leur autonomie respective en termes de compétences, de capacités et de prescriptions.

7 Définition d'un plan d'action

Ce troisième et dernier niveau d'activité s'apparente à un processus résilient dans le sens où il met à contribution l'autonomie de l'ensemble des agents du système dans le but d'élaborer une solution cohérente.

La composante proactive de la résilience s'inscrit dans ce niveau d'activité en étant concrétisée par l'analyse de la situation courante et des conditions de maintien sous contrôle du système ainsi que par les interactions des différents niveaux d'activité du système. Les agents communiquent ainsi leur autonomie respective au contrôleur de mission et la confrontation de ces informations est une illustration de la forme de coopération confrontative. Celle-ci se traduit par une planification non seulement locale afin de résoudre un conflit sur une tâche ou un but précis mais également une planification à plus long terme afin de constamment évaluer la validité du plan global. Les préconditions non seulement de l'action suivante mais également du plan global sont constamment évaluées afin de décider de la nécessité d'une re planification partielle ou totale du plan d'action.

7.1 Définition du problème de planification

Un problème de planification est un triplet $\langle O, I, B \rangle$ où :

- O est le domaine de planification qui représente l'ensemble des actions réalisables par le système et l'ensemble des descriptions des tâches de haut niveau. Il correspond ici à l'ensemble de compétences du système qui définit la décomposition des tâches composées en tâches primitives puis en actions.
- I est la base de faits qui correspond à l'état initial du problème. Cet état correspond à l'état du système Homme-robot et à l'état du monde.

- B est un ensemble de faits qui représentent les buts à réaliser. Cet ensemble est établi à partir du fichier de mission qui fournit un plan initial réalisable par le système Homme-robot. Un but est représenté par une tâche composée pour laquelle au moins une décomposition est connue.

7.2 Définition de l'algorithme de planification

L'objectif de l'approche est de contribuer à l'amélioration de la résilience du système par l'élaboration d'alternatives de fonctionnement permettant de gérer des événements indésirables.

La définition d'un plan d'action utilise le formalisme HTN (Hierarchical Task Network) [Erol et al. 1994] sur lequel est basé l'algorithme de planification SHOP2 [Nau et al. 2003]. Les tâches primitives et composées (cf. section 3.1 de ce chapitre) sont les instanciations des méthodes définies dans le formalisme HTN. Elles permettent l'association à une tâche donnée d'un ensemble de réalisations possibles. La Figure 37 résume les principes de décomposition de cette méthode en associant les tâches composées au niveau « tâches », qui représente les buts du fichier de mission. Le niveau « actions » correspond aux tâches primitives. Les décompositions à ce niveau prennent en compte l'autonomie des agents du système.

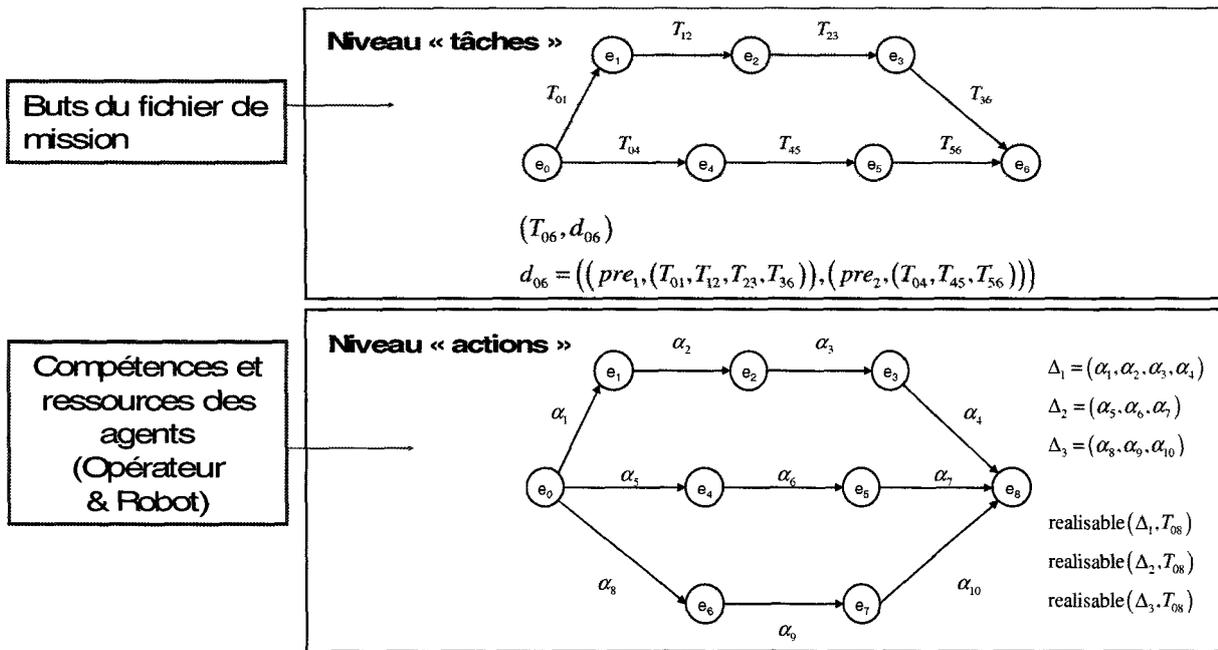


Figure 37. Principes de décomposition dans la méthode HTN.

L'algorithme proposé (Figure 38) pour la définition d'un plan d'action utilise les prédicats définis dans la section 3.2 de ce chapitre pour élaborer une alternative possible de réalisation du but.

L'algorithme ne se focalise pas sur la planification de l'ensemble des buts décrits dans le fichier de mission mais sur la capacité des agents à réagir à l'occurrence d'une situation indésirable en termes de répartition des tâches. L'autonomie des agents du système va décider de cette répartition. Si un ou plusieurs agents sont autonomes pour une tâche donnée, un agent est sélectionné et la totalité de la tâche primitive lui est affectée (lignes 22 à 26). La mise en œuvre d'une forme de coopération n'est pas nécessaire. La définition d'un plan d'actions

consiste cependant à élaborer plusieurs alternatives selon différentes formes de coopération par exemple. Une autre itération de l'algorithme permettra de mettre en œuvre une alternative où une forme de coopération est décidée.

La forme de coopération à appliquer est définie au niveau des tâches primitives (lignes 28 et 33) en vérifiant les conditions d'application d'une forme de coopération. Si la tâche est effectuée selon une forme de coopération augmentative, alors les agents exécutent la même tâche en mutualisant leurs capacités (lignes 27 à 32). Si la tâche est effectuée selon une forme de coopération intégrative, alors la suite d'actions finie est divisée en séquences distinctes qui sont affectées aux agents (lignes 33 à 40).

Dans le cas des tâches composées (lignes 46 à 57), l'algorithme détermine les décompositions possibles pour réaliser la tâche pour lesquelles les préconditions sont remplies (ligne 47).

L'algorithme de planification mémorise les alternatives précédemment constituées, c'est-à-dire selon les séquences, les décompositions et les agents sélectionnés respectivement aux lignes 18, 51 et 22. Différentes alternatives peuvent ensuite être élaborées en prenant en compte les autres possibilités de coopération et d'affectation des agents.

Dans le cas où plusieurs agents sont autonomes pour réaliser la totalité d'une tâche donnée, la forme de coopération confrontative peut être mise en œuvre (cf. section 4.3 de ce chapitre) en comparant les séquences d'actions des agents autonomes pour cette tâche de façon à définir la meilleure solution.

Si aucune alternative n'est trouvée par l'algorithme de replanification, le système adopte une démarche de résilience globale. Elle consiste à passer d'une approche fondée sur la coopération d'égal à égal à une approche telle qu'elle est proposée dans le cadre du projet TAROT au travers des quatre modes d'autonomie. De plus, cette transition est restreinte à un retour vers le mode M1, à savoir un mode dans lequel l'opérateur humain décide des actions à exécuter. En effet, une incapacité du système à élaborer une solution en utilisant le contrôle coopératif ne sera pas résolue en désactivant ce mode de contrôle tout en restant dans un mode d'autonomie dans lequel le système automatisé prend des décisions et les exécute.

```

1  PLANIFICATEUR(but, état du système, liste_alternatives)
2  D : ensembles de compétences du système
3  s = état du système
4  T : liste des tâches à réaliser = but
5  P : plan vide
6  Alternative = {}
7   $T_0 = \{t \in T \mid \text{predecesseurs}(t) = \emptyset\}$ 
8  répéter
9      si  $T = \emptyset$  alors
10         ajouter Alternative à liste_Alternatives
11     sinon
12         choisir une tâche  $t \in T_0$ 
13         si tache_primitive(t) alors
14              $M = \{m \mid m \text{ est une séquence pour réaliser } t \text{ dans } D, \text{precond}(m)\}$ 
15             si  $M = \emptyset$  alors
16                 retourner échec
17             sinon
18                 choisir un élément  $m \in M$  non présent dans
19                 liste_alternatives
20                  $E_T = \{agt \in Agt \mid a(agt, t)\}$ 
21                 si  $\text{Card}(E_T) \geq 1$ 
22                     choisir un agent de  $E_T$  non présent dans
23                     liste_alternatives
24                     pour chaque action a de m
25                         modifier s selon effets(a)
26                         ajouter a à Alternative
27                 sinon
28                     si  $CA(F, t)$  alors
29                         affecter les agents de F à t
30                         pour chaque action a de m
31                             modifier s selon effets(a)
32                             ajouter a à Alternative
33                     sinon si  $CI(F, t)$  alors
34                         séparer t en card(F) tâches distinctes t'
35                         affecter les agents agt de F
36                         tel que a(agt, t')
37                         pour chaque agt de F
38                             pour chaque action a de m
39                                 modifier s selon effets(a)
40                                 ajouter a à Alternative
41                 sinon

```

```

42         retourner échec
43         modifier T en retirant t
44          $T_o = \{t \in T \mid \text{predecesseurs}(t) = \emptyset\}$ 
45     sinon
46     si tache_composee(t) alors
47          $N = \{n \mid n \text{ est une décomposition pour réaliser } t \text{ dans } D, \text{precond}(n)\}$ 
48         si  $N = \emptyset$  alors
49             retourner échec
50         sinon
51             choisir un élément  $n \in N$  non présent dans
52             liste_alternatives
53             modifier T en remplaçant t par  $sub(n)$ 
54             si  $sub(n) \neq \emptyset$  alors
55                  $T_o = \{t \in sub(n) \mid \text{predecesseurs}(t) = \emptyset\}$ 
56             sinon
57                  $T_o = \{t \in T \mid \text{predecesseurs}(t) = \emptyset\}$ 

```

Figure 38. Algorithme de planification.

7.3 Traitement de l'ensemble des alternatives

Au travers de l'évaluation des autres agents et des autres séquences et décompositions, il est alors possible d'établir plusieurs alternatives possibles pour une liste de tâches à réaliser par des appels successifs à l'algorithme de planification. Dans le but de limiter le temps de traitement de cet algorithme, une borne maximale d'alternatives à traiter peut être utilisée comme paramètre de l'algorithme. Dans le cadre d'un système mono-opérateur mono-robot, le nombre d'alternatives en termes de répartition de tâches reste acceptable car limité par le nombre de comportements sensorimoteurs et d'algorithmes disponibles pour un même comportement.

Cependant, dans le cadre d'un système dynamique soumis à des contraintes de temps réel et dans la perspective de systèmes composés de plusieurs opérateurs et robots coopérant pour atteindre un objectif commun, l'algorithme peut être modifié afin de réduire le nombre de solutions possibles.

L'algorithme peut alors prendre en compte la matrice de comparaison des critères utilisée dans le processus de prise de décision. En effet, si le critère d'interactions est prioritaire alors on va privilégier les séquences d'actions impliquant plusieurs agents, c'est-à-dire les séquences d'actions appartenant à l'ensemble de compétences d'un ensemble d'agents et nécessitant alors la mise en œuvre d'une forme de coopération. La complexité de la planification du plan global peut également être réduite grâce au fichier de mission qui décompose l'objectif à atteindre en buts et tâches. Le problème de planification sur le plan global peut être ramené à une suite de planifications locales sur les buts et tâches du fichier de mission.

L'algorithme de planification conclut la description des niveaux d'activité d'un agent selon la définition proposée pour l'autonomie. Cet algorithme contribue à la résilience du système en permettant soit la récupération soit l'anticipation de l'occurrence d'une situation indésirable. En effet, dans le cas de préconditions non remplies pour l'action suivante, la résilience est plutôt de nature réactive contrairement à une requête émise suite à des préconditions non remplies au niveau du plan global. Dans ce dernier cas, la résilience est de nature proactive.

8 Conclusion

Ce chapitre a présenté un modèle de contrôle coopératif Homme-robot résilient exploitant les principes d'autonomie ajustable et de coopération Homme-machine. Ce modèle se base sur la formalisation de la définition de l'autonomie proposée au chapitre précédent.

La première section de ce chapitre a présenté les contributions apportées dans le cadre du projet TAROT. Quatre modes, identifiés de M0 à M3, ont été définis selon une catégorie d'activité discriminante relative à la prise de décision issue du modèle de Parasuraman. Le premier mode (M0) est un mode de téléopération : le robot est ici considéré comme un vecteur pour la mission, l'interprétation des données et la prise de décision est allouée à l'opérateur humain. Dans le deuxième mode (M1), l'opérateur définit les comportements à utiliser par le robot. Dans les modes M2 et M3, le robot est capable de proposer ces comportements. Dans le mode M2, une requête est adressée à l'opérateur qui dispose d'un temps de réponse (acceptation ou refus) avant exécution automatique de la proposition. Dans le mode M3, le comportement est activé automatiquement et l'opérateur humain en est informé.

Les aspects sémantiques de la définition, compétences, capacités et prescriptions, sont définis pour un agent. Les catégories d'activité permettent de définir les interactions entre les agents et les informations propres à chaque catégorie d'activité. Ces interactions permettent de mettre en œuvre un planificateur et un processus de prise de décision prenant en compte l'autonomie de chaque agent. La planification et la prise de décision sont les activités émergentes au niveau du système global qui résultent des interactions entre les agents. L'introduction de tels comportements au sein du système contribue à l'aspect organisationnel de la résilience du système Homme-machine. Le Tableau 15 présente l'ensemble des réponses apportées par la contribution relativement à la notion de résilience d'un système Homme-machine.

Le planificateur élabore des alternatives afin de répondre à l'occurrence d'un événement indésirable ou d'anticiper celle-ci. Ces alternatives sont ordonnées en fonction des critères de résilience définis dans le premier chapitre et détaillés dans ce dernier chapitre : l'efficacité, l'adaptabilité, le fonctionnement aux limites et les interactions. Une méthode d'analyse hiérarchique est appliquée sur les comparaisons des critères entre eux et sur les comparaisons des différentes alternatives. Le classement obtenu permet de sélectionner l'alternative correspondant aux préférences accordées aux différents critères de résilience (efficacité, adaptabilité, fonctionnement aux limites, interactions).

Système coopératif Homme-robot résilient	
Caractéristiques	
Contribution à l'anticipation d'événements indésirables	Replanification continue lors de l'apparition de préconditions non remplies à la poursuite du plan
Contribution au contrôle des situations imprévues	Approche proactive, réactive et interactive de la gestion des perturbations Evaluation de l'anticipation, de la réaction et de la récupération de l'occurrence de perturbations [Zieba <i>et al.</i> 2007a]
Contribution à la récupération d'événements indésirables	Récupération par élaboration de solutions grâce à l'interaction entre les agents humains et techniques Formalisation des conditions d'application des formes augmentative, intégrative et confrontative
Contribution à l'adaptation à des situations imprévues	Modification du mode de fonctionnement du système et de la répartition des tâches entre les agents humains et techniques Sélection d'une forme de coopération Homme-robot appropriée à la situation Résilience locale et résilience globale Adaptation locale : <ul style="list-style-type: none"> • modification de l'autonomie des agents selon les aspects sémantiques de l'autonomie : compétences, capacités et prescriptions Adaptation globale : <ul style="list-style-type: none"> • modification du mode d'autonomie du système global

Tableau 15. Résumé des apports de la contribution.

Les niveaux d'activité d'un agent ont été étendus au niveau du système afin de prendre en compte la coopération entre les agents. La similarité entre la conception des agents et l'activité globale du système contribue à la cohésion de celui-ci et favorise l'ajout de nouvelles fonctionnalités autonomes afin d'accroître son adaptabilité. Le modèle de contrôle coopératif a pour but d'améliorer la résilience du système Homme-robot face à différents types de situations par des principes d'autonomie ajustable. L'ajustement peut être réalisé au niveau d'un agent selon les aspects sémantiques de la définition de l'autonomie et au niveau du système global selon l'un des quatre modes définis dans le cadre du projet TAROT. Le résultat des alternatives retenues face à ces situations permet de déterminer les critères contribuant au maintien sous contrôle du système Homme-machine. L'ensemble des situations possibles ne pouvant être défini de façon théorique, une campagne expérimentale va permettre d'évaluer la résilience du système coopératif Homme-robot au travers de situations représentatives simulées dans un micro-monde. Cette campagne expérimentale fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 4 : ETUDE EXPERIMENTALE DU CONTROLE COOPERATIF HOMME-ROBOT

Le chapitre précédent a présenté la contribution apportée par ces travaux de thèse. Ceux-ci proposent une approche de la résilience basée sur l'apport de l'autonomie ajustable et de la coopération Homme-machine. Un aspect de la résilience concerne la gestion de l'occurrence de perturbations, internes ou externes. Afin de disposer d'un ensemble de perturbations représentatives et de scénarios pouvant être rejoués en contrôlant tous les paramètres, une plate-forme expérimentale a été développée sous la forme d'un micro-monde.

Ce chapitre présente l'étude expérimentale du mode de contrôle coopératif Homme-robot menée afin de valider le formalisme développé dans le chapitre précédent. Cette campagne a pour but d'évaluer la résilience du système Homme-machine face à différentes perturbations pouvant survenir lors du déroulement d'une mission scénarisée. La résilience est évaluée par les critères et les indicateurs présentés dans les chapitres précédents. Ceux-ci permettent d'évaluer les solutions mises en œuvre et de déterminer les indicateurs les plus pertinents contribuant à la résilience.

La plate-forme expérimentale fait l'objet des deux premières parties de ce chapitre. Le protocole expérimental est présenté dans une troisième partie. La dernière partie de ce chapitre est consacrée aux résultats expérimentaux.

1 Présentation de la plate-forme expérimentale

1.1 Définition du procédé simulé

La plate-forme expérimentale simule le déplacement d'un robot mobile terrestre dans un environnement naturel en trois dimensions. Différents environnements ont été créés et présentent différents types d'obstacles naturels (arbres, haies).

Le robot simulé dans le micro-monde présente les caractéristiques de la plate-forme cible du projet TAROT, notamment en ce qui concerne l'intégration de comportements sensorimoteurs (suivi d'amer, de lisière et évitement d'obstacles). Différents capteurs sont utilisés dans le micro-monde : caméra, nappe laser. Le système peut être utilisé dans l'un des quatre modes définis dans le projet TAROT et intègre le modèle proposé pour l'autonomie et le contrôle coopératif Homme-robot.

L'opérateur humain est en charge de la supervision de missions scénarisées de déplacement auxquelles s'ajoute une tâche d'observation affectée à l'opérateur uniquement. Cette tâche consiste à détecter et identifier des objets présents dans l'environnement.

Dans le cadre de missions en environnement naturel, des perturbations peuvent influencer sur le déroulement de la mission. Ces perturbations sont de différents types (défaillances techniques, erreurs humaines, perturbations dues à l'environnement...) et nécessitent des réponses adaptées en termes de résilience.

1.2 Evaluation de la résilience

La résilience a été définie par Wreathall [2006] comme la capacité d'une organisation (d'un système) à maintenir ou à retrouver rapidement un état stable, de façon à assurer la continuité du fonctionnement pendant et après une défaillance majeure ou en présence de perturbations continues significatives. Dans le cadre de ces évaluations, il est nécessaire d'appliquer cette définition au contexte d'application. Le maintien ou le retour à un état stable consiste à accomplir les objectifs fixés en respectant les contraintes données par le fichier de mission. La poursuite du fonctionnement pendant et après une défaillance majeure est traduite par la réaction et la récupération face à l'occurrence de situations indésirables dues à des facteurs externes ou internes. Enfin, la gestion de perturbations continues significatives consiste à anticiper l'occurrence et/ou à limiter la propagation des conséquences de l'occurrence des perturbations.

La résilience en tant que méthode de conception d'un système est évaluée par les moyens mis en œuvre pour gérer l'occurrence de situations indésirables, à savoir les appels à une replanification sur des préconditions non remplies pour l'action suivante ou pour la globalité du plan restant, les ajustements d'autonomie d'un agent ou du mode d'autonomie du système.

L'évaluation des solutions mises en œuvre est réalisée au moyen des critères définis, à savoir l'efficacité, l'adaptabilité, le fonctionnement aux limites et les interactions. Chacun de ces critères est composé de plusieurs indicateurs objectifs et subjectifs.

1.3 Définition des critères et des indicateurs mis en place

Dans l'approche proposée dans ces travaux, on considère une décomposition du problème selon une hiérarchie formée de deux niveaux : le premier niveau est défini par les quatre critères de résilience (efficacité, adaptabilité, fonctionnement aux limites et interactions) et le second par les indicateurs objectifs définissant chacun de ces quatre critères. Des indicateurs subjectifs complètent l'évaluation de chaque critère.

On considère dans cette campagne expérimentale que les comparaisons entre critères et indicateurs objectifs sont fixées, c'est-à-dire que la contribution de chaque indicateur objectif à la valeur du critère de résilience reste identique pour tous les sujets. Les indicateurs objectifs et subjectifs sont détaillés dans cette section.

Le Tableau 16 renseigne les indicateurs relatifs au critère d'efficacité. Ces indicateurs concernent essentiellement les performances du système Homme-robot relativement aux objectifs de la mission. Les indicateurs pris en compte sont donc le temps de réalisation de la mission et la distance parcourue. L'évaluation subjective de l'efficacité est donnée par la perception de l'opérateur humain sur les performances du système et sur l'effort requis en termes de ressources cognitives (difficulté ressentie pour réaliser conjointement les tâches de mobilité et d'observation).

Mesure objective	Justification	Calcul de la mesure	Type d'efficacité
Temps de réalisation de la mission	Tâches de la mission peuvent être soumises à des contraintes temporelles ou de performance devant être respectées	<i>Temps de réalisation ($T_{Fin} - T_{Début}$)</i>	Efficacité liée aux objectifs de la mission
Distance parcourue		<i>Distance parcourue pour réaliser la mission</i>	
Performance de la tâche d'observation		<i>Nombre d'objets détectés</i>	Efficacité liée à la tâche de l'opérateur humain
Mesure subjective	Justification	Evaluation subjective	Type d'efficacité
Perception des performances	Correspondance entre la perception de l'opérateur humain et la situation réelle	<i>Echelle subjective de 1 à 10</i>	Efficacité liée aux objectifs de la mission
Perception de l'effort requis	Ressources cognitives impliquées dans la réalisation des objectifs	<i>Echelle subjective de 1 à 10</i>	Efficacité liée aux ressources de l'opérateur humain

Tableau 16. Indicateurs relatifs à l'efficacité du système Homme-machine.

Le Tableau 17 renseigne les indicateurs relatifs au critère d'adaptabilité. L'adaptabilité est évaluée objectivement par le nombre de plans d'actions différents mis en place afin de gérer l'occurrence d'une perturbation. Ces plans d'actions sont par exemple l'utilisation des comportements sensorimoteurs, de la téléopération, de la navigation à l'estime... De façon subjective, l'évaluation porte sur la perception par l'opérateur humain de la capacité du système à éviter des erreurs en proposant des solutions appropriées au contexte.

Mesure objective	Justification	Calcul de la mesure	Type d'adaptabilité
Nombre de types de tâches ou de plans d'actions différents pour gérer l'occurrence de perturbations	Renseigne sur les compétences du système.	<i>Nombre de types de tâches ou de plans d'actions différents</i>	Diversité du système
Mesure subjective	Justification	Calcul de la mesure	Type d'adaptabilité
Contribution du système à l'évitement d'erreurs par la proposition de solutions	Proposition de solutions appropriées au contexte	<i>Echelle subjective de 1 à 10</i>	Diversité du système

Tableau 17. Indicateurs relatifs à l'adaptabilité du système Homme-machine.

Le Tableau 18 renseigne les indicateurs relatifs au critère de fonctionnement aux limites. L'évaluation objective a pour but d'évaluer l'importance des phases d'instabilité du système qui correspondent aux conséquences de l'occurrence d'une perturbation. L'indicateur objectif utilisé est donc le temps de récupération de la perturbation, calculé depuis l'occurrence de la perturbation jusqu'à la reprise du plan de mission initial. L'évaluation subjective concerne la perception de l'opérateur humain sur la répartition accordée aux tâches à accomplir, c'est-à-dire les tâches de mobilité et d'observation.

Mesure objective	Justification	Calcul de la mesure	Type de limite
Temps de résolution d'une perturbation	Une perturbation entraîne une phase d'instabilité pour le système dont le temps doit être minimisé	$t_{Résolution} - t_{Occurrence}$	Capacité de récupération du système
Mesure subjective	Justification	Calcul de la mesure	Type de limite
Perception de la répartition entre les tâches à accomplir (mobilité et observation)	Perception du seuil maximal de charge de travail acceptable pour gérer différentes tâches	Echelle subjective de 1 à 10	Limite de fonctionnement correct du système en termes de charge de travail

Tableau 18. Indicateurs relatifs au fonctionnement aux limites du système Homme-machine.

Le Tableau 19 renseigne les indicateurs relatifs au critère d'interactions au sein du système Homme-machine. L'évaluation objective liée à ce critère concerne le temps de réponse de l'opérateur humain suite à une sollicitation du robot. L'évaluation subjective porte sur la perception par l'opérateur humain de l'importance accordée à la supervision des tâches effectuées par le système (surveillance de l'interface Homme-machine, recherche des informations...).

Mesure objective	Justification	Calcul de la mesure	Type d'interaction
Temps de réponse à une sollicitation du robot	Evaluation de l'attention de l'opérateur humain	$t_{Action} - t_{Sollicitation}$	Attention de l'opérateur humain et perception des informations
Mesure subjective	Justification	Calcul de la mesure	Type d'interaction
Compréhension des plans d'actions proposés par le système dans le contrôle coopératif	Perception de la correction des informations présentée à l'opérateur humain	Echelle subjective de 1 à 10	Représentation des informations nécessaires à l'opérateur
Perception de l'importance accordée à la supervision du système	Perception du niveau d'interaction nécessaire avec le système	Echelle subjective de 1 à 10	Attention de l'opérateur humain

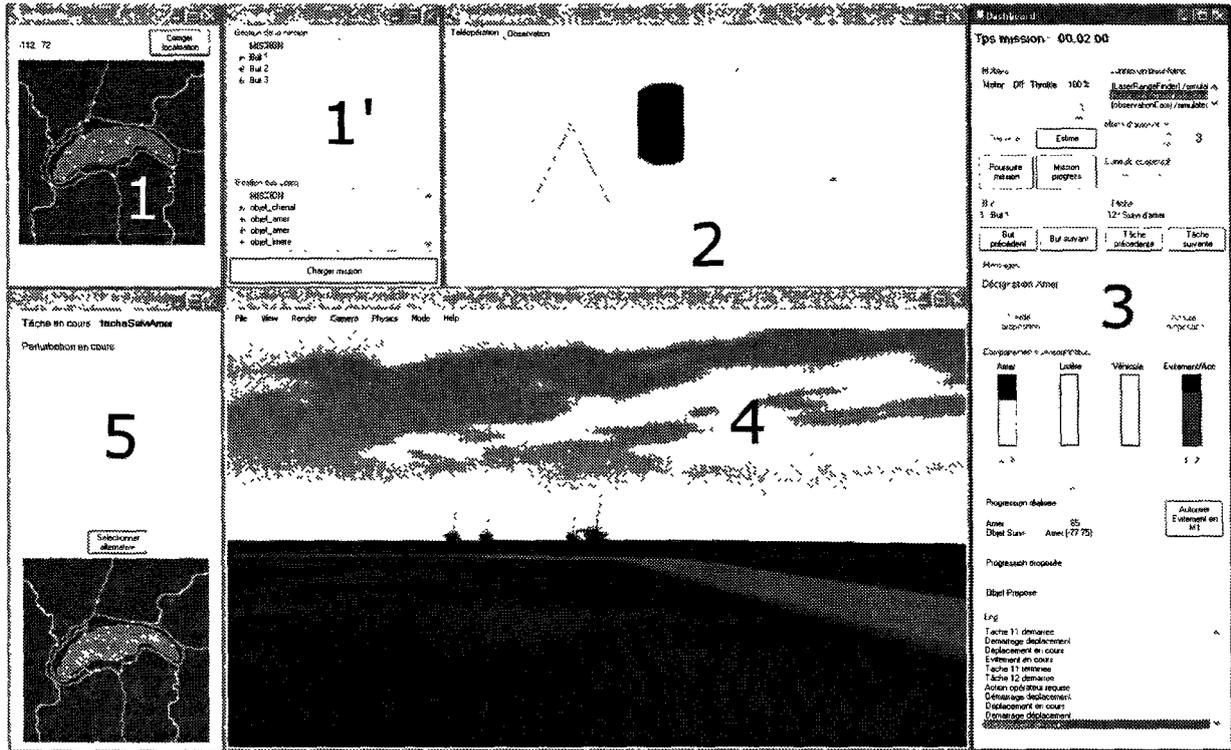
Tableau 19. Indicateurs relatifs aux interactions au sein du système Homme-machine.

2 Réalisation de la plate-forme expérimentale

Le micro-monde a été développé sous Microsoft Visual Studio 2005 en utilisant le langage C#. L'application exploite également la plate-forme de développement Microsoft Robotics Studio. Cet environnement de développement fournit un moteur de simulation 3D et un moteur physique permettant de créer des modèles physiques de robots mobiles avec lesquels il est possible d'interagir.

L'interface Homme-machine permet à l'opérateur humain de superviser le déroulement de la mission selon différents modes d'autonomie et est composée de différents éléments (Figure 39).

Le suivi de la mission est assuré par une vue cartographique (1) et par une retranscription du fichier de mission sous forme d'une liste déroulante des buts et tâches à réaliser (1'). La vue cartographique affiche la position du robot et permet à l'opérateur humain d'indiquer des objets de l'environnement utilisables par les comportements sensorimoteurs ou des points de passage supplémentaires.



- 1 : Vue cartographique
- 1' : Suivi de mission
- 2 : Vue des capteurs
- 3 : Interface de commande principale
- 4 : Représentation 3D de l'environnement
- 5 : Interface du contrôle coopératif

Figure 39. Interface Homme-machine.

La vue capteurs (2) reproduit une vue de l'environnement à partir des données de la nappe laser. Elle est liée aux comportements sensorimoteurs de suivi d'amer, de suivi de lisière et d'évitement d'obstacles. Cette fenêtre comporte également un onglet permettant d'accéder à l'interface de contrôle de la caméra d'observation (Figure 40). Cette caméra peut être commandée indépendamment de la caméra principale afin de réaliser la tâche d'observation affectée à l'opérateur humain. L'opérateur doit indiquer les caisses repérées sur la carte de l'environnement.

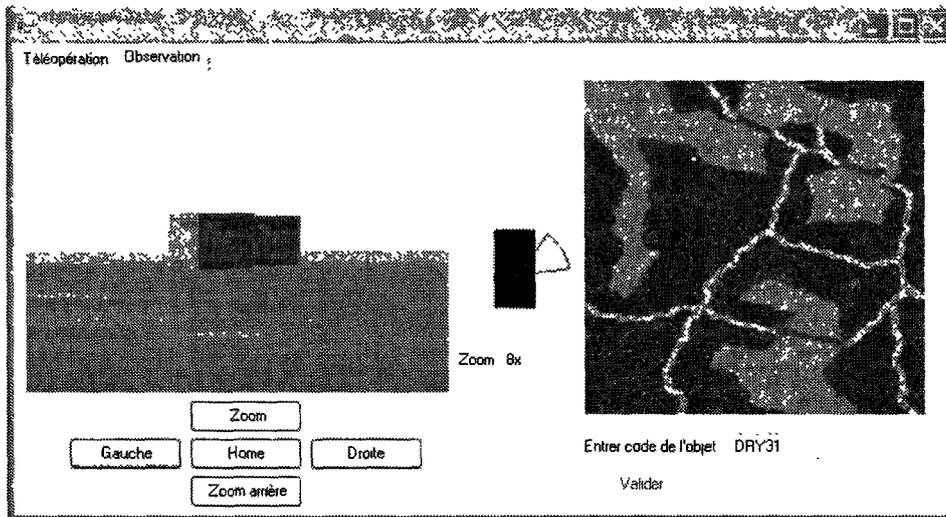


Figure 40. Interface pour la tâche d'observation.

La fenêtre d'interface de commande (3) permet à l'opérateur humain de transmettre les ordres au robot et de répondre à ses requêtes. Cette fenêtre affiche également des informations comme le mode d'autonomie, les indices de confiance et le mode de fonctionnement des comportements sensorimoteurs (arrêt, passif, actif). L'opérateur humain gère également les requêtes du robot via cette fenêtre.

La vue 3D (4) affiche les objets suivis par les comportements sensorimoteurs en mode actif (le comportement est alors en charge de la mobilité du robot) ainsi que les objets les plus pertinents détectés par les comportements fonctionnant en mode passif (le comportement évalue son indice de confiance en arrière-plan sans influencer sur la mobilité du robot). L'opérateur humain peut indiquer sur cette vue un objet à suivre (amer ou lisière) lorsque le système est en mode M1 ou à intégrer dans la base de connaissances du robot lorsque le système est en mode M2 ou M3.

La vue détaillant le fonctionnement du contrôle coopératif (5) décrit les alternatives proposées par le système et la ou les formes de coopération associées aux alternatives. Les alternatives peuvent être sélectionnées par l'opérateur humain ou réalisées automatiquement par le système en fonction du mode d'autonomie courant.

3 Réalisation de l'expérimentation

3.1 Formation initiale

Un support pédagogique est fourni au sujet afin de présenter le contexte des expérimentations, le micro-monde et les missions qui composeront les expérimentations. Les missions sont basées sur un fichier de mission qui fait apparaître l'enchaînement des buts à réaliser (Figure 41).

```

<MISSION>
<titre>Mission exemple</titre>
<ident>M_Exemple</ident>
<BUT>
  <titre>But 1</titre>
  <ident>1</ident>
  <TACHES>
    <tache_suivi_amer>
      <titre>Suivi d'amer</titre>
      <ident>11</ident>
    </tache_suivi_amer>
  </TACHES>
</BUT>
<BUT>
  <titre>But 2</titre>
  <ident>2</ident>
  <TACHES>
    <tache_suivi_amer>
      <titre>Suivi d'amer</titre>
      <ident>21</ident>
    </tache_suivi_amer>
    <tache_suivi_lisiere>
      <titre>Suivi de lisiere</titre>
      <ident>22</ident>
    </tache_suivi_lisiere>
  </TACHES>
</BUT>
</MISSION>

```

Figure 41. Exemple simplifié de fichier de mission.

Les buts peuvent éventuellement être décomposés en tâches. A chaque tâche correspond un comportement sensorimoteur pouvant être affecté à un agent en charge de la réalisation de la tâche. Ce fichier de mission sert de référence à l'élaboration des alternatives permettant la réparation d'une partie du plan lors de l'occurrence d'un événement imprévu.

Les fonctionnalités de l'interface sont détaillées dans le support pédagogique fourni au sujet ainsi que les caractéristiques des modes d'autonomie. Une partie est également consacrée à la présentation du contrôle coopératif Homme-robot au travers d'exemples concrets de mise en œuvre des formes de coopération.

3.2 La phase d'entraînement

Cette phase permet au sujet de se familiariser avec le micro-monde. Le scénario de la mission d'entraînement utilise les quatre modes d'autonomie du projet TAROT et les différents comportements sensorimoteurs. La mission est composée d'un enchaînement simple de buts dans un environnement peu encombré afin de limiter les situations indésirables. Une perturbation est intégrée au scénario pour laquelle le sujet est prévenu. Ce premier scénario est différent des scénarios utilisés dans les phases suivantes de l'expérimentation. Le scénario de la mission d'entraînement est effectué avec et sans le contrôle coopératif.

Le scénario d'entraînement peut éventuellement être répété afin de s'assurer que le sujet maîtrise l'outil. Cette phase d'entraînement constitue également un support pédagogique complémentaire de la formation initiale. L'expérimentateur peut en effet rappeler les consignes, les caractéristiques de fonctionnement des modes d'autonomie et les principales fonctionnalités de l'interface.

3.3 La phase d'expérimentation

3.3.1 Objectifs des expérimentations

Dans la phase d'expérimentation, deux missions sont proposées au sujet. Celles-ci se déroulent selon un scénario faisant intervenir différentes perturbations. Pour ces deux missions, deux passations sont effectuées : une première basée sur les modes d'autonomie du projet TAROT et la seconde en utilisant le mode de contrôle coopératif proposé. Pour chaque mission, une transcription du fichier mission du type de celui de la Figure 41 est fournie au sujet sous la forme d'une carte de l'environnement sur laquelle figurent les buts et les tâches à accomplir. La tâche de déplacement est soumise à une contrainte temporelle de 8min. La tâche d'observation est soumise à une contrainte de 3 objets minimum à détecter.

Les passations ont pour but d'évaluer le gain apporté par le mode de contrôle coopératif par rapport aux modes d'autonomie du projet TAROT, principalement dans le cadre de la gestion des perturbations. Les perturbations intégrées à la simulation se focalisent alors sur les menaces régulières et irrégulières et sont consignées dans le Tableau 20.

Description de la perturbation	Type de menace associée	Justification	Réponses possibles du système	Interprétation en termes de résilience
Dégradation du fonctionnement d'un comportement sensorimoteur	Menace régulière	Perturbation commune pour laquelle des adaptations sont prévues en fonction du contexte	Changement du comportement sensorimoteur Ajustement des paramètres du comportement sensorimoteur	Aptitude du système à gérer une perturbation continue
Panne de communication	Menace régulière	Existence de procédures pour gérer les pannes de communication	Retour à un point où la communication est possible Modification du mode d'autonomie pour terminer la tâche en cours	Aptitude du système à gérer la modification de l'état du système
Erreurs de données d'un capteur	Menace régulière	Redondance des données et des capteurs permet d'utiliser d'autres alternatives pour corriger les erreurs	Changement d'algorithme ou de comportement sensorimoteur Désactivation du capteur défaillant	Aptitude du système à gérer une perturbation continue et à s'auto-évaluer
Mauvais objet suivi par le robot / Impossibilité de sélectionner l'objet prévu	Menace irrégulière	Nécessite une intervention de l'opérateur humain. La réponse à adopter dépend du contexte et des conséquences de l'erreur.	Demande d'assistance à l'opérateur humain Appel à une fonction de relocalisation	Aptitude du système à évaluer constamment les objectifs à atteindre et les préconditions de la suite du plan
Panne totale d'un comportement sensorimoteur	Menace irrégulière	Perturbation avec une probabilité faible perturbant fortement le fonctionnement du robot	Changement du comportement sensorimoteur	Aptitude à s'adapter à une modification de l'état du système et des ressources disponibles et à se réorganiser
Panne d'un capteur	Menace irrégulière	Redondance matérielle des capteurs permet de disposer d'alternatives	Changement du comportement sensorimoteur associé au capteur	Aptitude du système à gérer une modification des ressources disponibles

Tableau 20. Liste des perturbations possibles dans la simulation.

3.3.2 Passations en modes d'autonomie TAROT

Les passations effectuées selon les modes d'autonomie du projet TAROT correspondent à l'implémentation des modes décrits à la section 1.4 du chapitre 3. Les réponses aux perturbations sont gérées par l'opérateur humain sur la base des indices de confiance des comportements sensorimoteurs disponibles.

Le mode 0 reste un mode de téléopération dans lequel l'opérateur humain est en charge de la mobilité du robot. Le mode M1 est défini par un enchaînement des buts et des tâches soumis à la validation de l'opérateur humain. Dans le cas de l'occurrence d'une situation indésirable, une requête bloquante est émise à destination de l'opérateur humain. Dans le mode M2, l'enchaînement des buts et tâches est automatique. La résolution d'une situation indésirable par ajustement du comportement sensorimoteur ou du mode d'autonomie est automatique après une requête à l'opérateur humain restée sans réponse. Dans le mode M3, l'enchaînement des buts et tâches et la résolution des situations indésirables sont effectués de façon automatique.

Les modes M1 à M3 sans contrôle coopératif se distinguent donc par une absence de replanification et de prise de décision telles qu'elles sont définies dans le chapitre 3. Les modifications de la mission sont alors à la charge de l'opérateur humain uniquement.

3.3.3 Passations en contrôle coopératif

Lors des passations effectuées selon le mode de contrôle coopératif, les réponses aux perturbations sont gérées par les modules de planification et de prise de décision. Des alternatives sont proposées à l'opérateur pour la résolution des perturbations comprises dans les scénarios des missions. Les réponses fournies par le contrôle coopératif dans ces passations sont simulées en fonction d'une matrice de prise de décision prédéfinie. Ces solutions sont fixées de façon à disposer de données semblables et de scénarios répétables sur l'ensemble des sujets.

La sélection des alternatives suit les mêmes règles que les transitions de buts et de tâches dans les modes d'autonomie TAROT. Les modes M1 à M3 peuvent être utilisés en intégrant les caractéristiques du mode de contrôle coopératif. L'opérateur humain est pris en compte comme un agent au même niveau que les comportements sensorimoteurs dans les processus de prise de décision et de replanification. Dans le mode M1, les alternatives élaborées par l'algorithme de replanification sont affichées à l'opérateur humain mais aucune prise de décision n'est effectuée, c'est l'opérateur humain qui sélectionne l'alternative à mettre en œuvre. Dans le mode M2, un nombre restreint d'alternatives est affiché et l'une d'entre elles est automatiquement sélectionnée en l'absence de réponse de l'opérateur humain. Dans le mode M3, un nombre restreint d'alternatives est affiché et l'une d'entre elles automatiquement sélectionnée et l'opérateur humain en est informé. Dans les modes M2 et M3, l'alternative sélectionnée est celle qui obtient le score le plus élevé par l'application de la méthode AHP (cf. section 6 du chapitre 3).

3.3.4 Questionnaires

Chaque passation est suivie d'un questionnaire proposé au sujet afin d'évaluer l'acceptation du mode de contrôle coopératif. Les questionnaires permettent d'évaluer de façon subjective la performance de l'opérateur et la différence constatée entre les deux approches : modes du projet TAROT et contrôle coopératif.

A la fin de la phase d'expérimentation, un autre questionnaire est proposé au sujet. Celui-ci doit indiquer ses préférences quant aux critères de résilience : efficacité, adaptabilité, fonctionnement aux limites et interactions. Ces préférences relatives aux critères sont établies en suivant la méthodologie de la méthode AHP (cf. section 6.2 du chapitre 3). Des questions posées au sujet permettent d'établir les comparaisons binaires pour tous les couples de critères de résilience. L'exploitation des résultats de ces comparaisons permet de vérifier la conformité des solutions sélectionnées par les opérateurs avec leur perception de la résilience du système. Les préférences de l'ensemble des opérateurs ont ensuite pour but de déterminer quels sont les critères considérés comme prioritaires dans l'élaboration d'une solution.

4 Résultats expérimentaux

L'analyse des résultats a pour but de montrer la contribution du contrôle coopératif dans la résilience du système Homme-robot. Les quatre critères de résilience sont évalués sur les deux passations par les indicateurs objectifs et subjectifs définis pour chacun de ces critères. Enfin, les classements des critères de résilience par les opérateurs cherchent à confirmer ces résultats objectifs et subjectifs.

15 sujets ont participé à cette campagne expérimentale. Les sujets étaient des étudiants de l'Université de Valenciennes (UVHC) de Licence 3 ou Master 1 en Automatique et Informatique. Aucun des sujets n'était familier du domaine d'application.

4.1 Evaluation du critère d'efficacité

4.1.1 Indicateur de temps de mission

La Figure 42 illustre, pour les deux missions proposées aux opérateurs, la comparaison des temps de mission selon les deux types de passations effectuées.

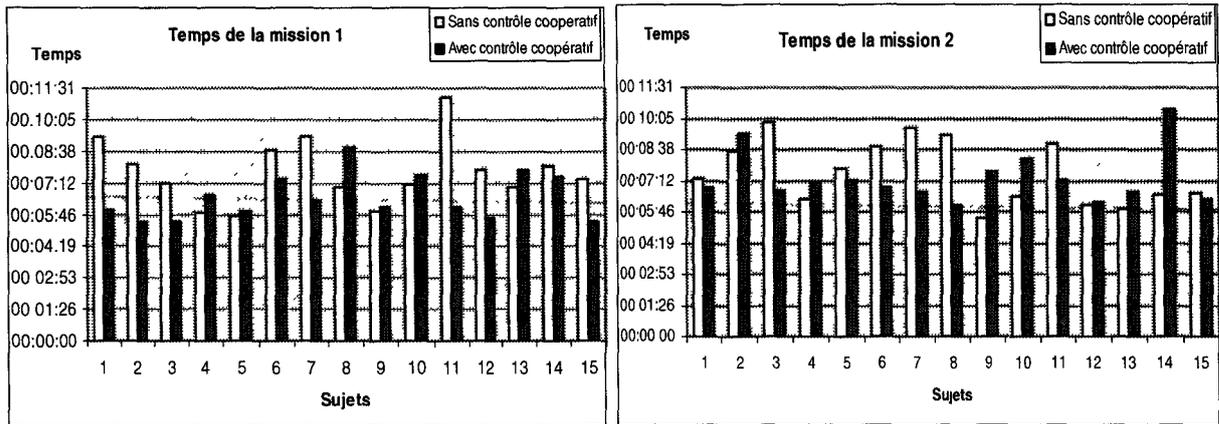


Figure 42. Comparaison des temps des deux missions avec et sans contrôle coopératif.

Sur l'ensemble des sujets, le contrôle coopératif donne en moyenne un temps de parcours moins élevé associé à un écart-type plus faible, et ce pour les deux missions (Tableau 21). On constate cependant des temps de missions plus élevés dans les passations effectuées avec le contrôle coopératif. Pour la mission 1, 6 opérateurs ont mis plus de temps en utilisant le contrôle coopératif et 7 opérateurs pour la mission 2. L'indicateur du temps de mission n'est pas le plus prioritaire pour l'évaluation des alternatives du contrôle coopératif.

	Mission 1		Mission 2	
	Sans contrôle coopératif	Avec contrôle coopératif	Sans contrôle coopératif	Avec contrôle coopératif
Moyenne	00:07:41	00:06:32	00:07:35	00:07:20
Ecart-type	00:01:28	00:01:02	00:01:29	00:01:13

Tableau 21. Moyennes et écarts-types pour les deux missions avec et sans contrôle coopératif.

La Figure 43 montre la proportion d'amélioration et de dégradation par le contrôle coopératif du temps de mission sur les deux missions : 60 % des sujets améliorent le temps de mission dans la première mission et 53 % dans la seconde mission.

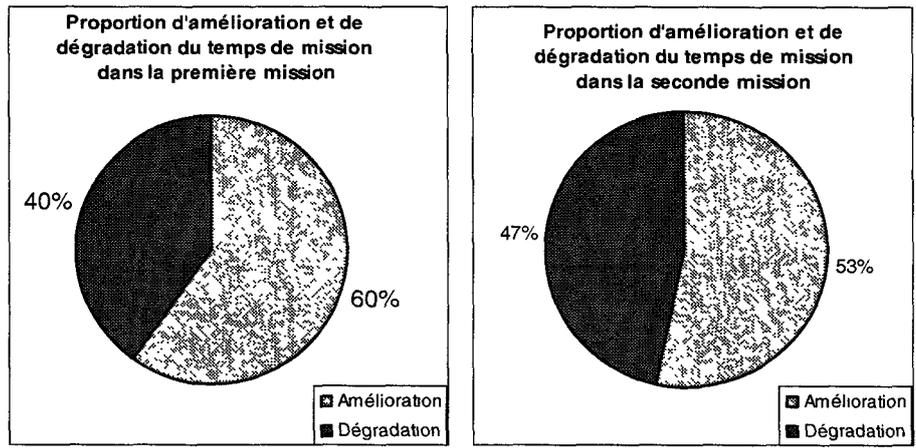


Figure 43. Proportion d'amélioration et de dégradation du temps de mission par le contrôle coopératif.

Un second indicateur lié au temps de mission permet de mettre en avant l'apport du contrôle coopératif dans la gestion des contraintes liées à la réalisation de la mission.

4.1.2 Indicateur de respect de contrainte temporelle

Le contrôle coopératif permet de diminuer le nombre de missions où la contrainte de temps fixé à 8 minutes n'est pas respectée. On constate en effet 11 dépassements de contrainte temporelle sans contrôle coopératif et 4 dépassements avec contrôle coopératif. Parmi les 11 dépassements sans contrôle coopératif, 10 ont été corrigés par le contrôle coopératif.

3 dépassements de contrainte temporelle sont constatés avec le contrôle coopératif alors que ces dépassements n'avaient pas eu lieu sans le contrôle coopératif. Ces dépassements peuvent s'expliquer par la mise en œuvre de la phase de téléopération ou par un temps de réponse excessif à une sollicitation du robot.

4.1.3 Indicateur de distance parcourue

L'indicateur de distance parcourue est également considéré comme non prioritaire par rapport aux contraintes temporelles des missions.

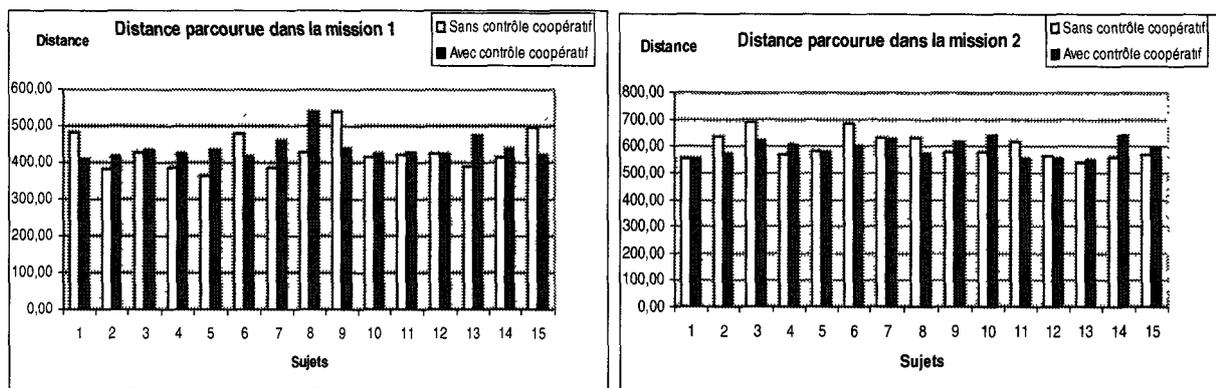


Figure 44. Comparaison des distances parcourues pour les deux missions avec et sans contrôle coopératif.

En effet, le contrôle coopératif est susceptible de proposer des itinéraires plus longs (Figure 44) pour 11 des 15 sujets dans la première mission et 7 sujets dans la seconde mission. 73% des sujets augmentent la distance parcourue dans la première mission et 47% dans la seconde

mission (Figure 45). Ces itinéraires restent cependant sous le seuil de la contrainte temporelle fixée comme montré précédemment.

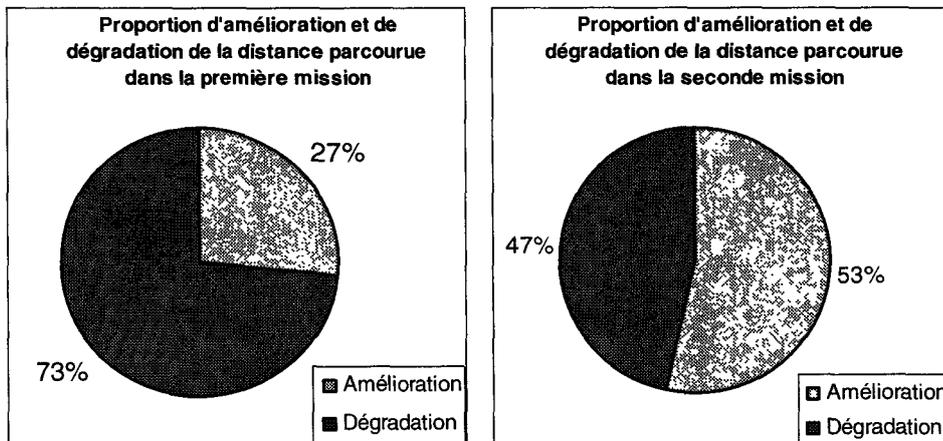


Figure 45. Proportion d'amélioration et de dégradation de la distance parcourue par le contrôle coopératif.

Le Tableau 22 détaille les moyennes et écarts-types des distances parcourues. On constate des écarts-types très faibles pour les deux types de missions (avec et sans contrôle coopératif). De plus, les écarts-types sont similaires pour les missions 1 et 2. L'indicateur de distance parcourue apparaît alors comme peu discriminant par rapport aux indicateurs concernant le temps de parcours.

	Mission 1		Mission 2	
	Sans contrôle coopératif	Avec contrôle coopératif	Sans contrôle coopératif	Avec contrôle coopératif
Moyenne	429,21	440,32	597,41	591,38
Ecart-type	49,22	31,84	47,62	32,64

Tableau 22. Moyennes et écarts-types des distances parcourues pour les deux missions avec et sans contrôle coopératif.

4.1.4 Efficacité de la tâche d'observation

Le critère d'efficacité appliqué à la tâche d'observation montre que les résultats ne sont pas significativement différents en termes de nombre d'objets détectés (Tableau 23).

	Mission 1		Mission 2	
	Sans contrôle coopératif	Avec contrôle coopératif	Sans contrôle coopératif	Avec contrôle coopératif
Moyenne	6	5	8	8
Ecart-type	2,37	2,55	3,25	3,22

Tableau 23. Moyennes et écarts-types du nombre d'objets détectés dans les deux missions.

Une contrainte minimale de trois objets à détecter a été fixée pour cette tâche d'observation. Cette contrainte n'est pas respectée par deux sujets uniquement. De plus, pour l'un d'entre eux, cette contrainte n'est pas respectée sur une seule des passations. Pour le second sujet, aucune tâche d'observation n'a été réalisée sur l'ensemble des passations. Lors du débriefing, le sujet a indiqué avoir oublié les consignes relatives à la tâche d'observation.

L'évaluation de l'efficacité est ensuite complétée par des évaluations subjectives concernant les performances du système. L'évaluation subjective des performances est ensuite complétée par l'effort ressenti par les opérateurs pour accomplir la mission.

4.1.5 Evaluation subjective de la perception de l'efficacité

L'évaluation subjective de l'efficacité via les questionnaires est évaluée par des questions portant sur la perception par l'opérateur humain des performances du système et sur l'effort requis pour accomplir la mission (Figure 46). L'évaluation subjective des performances porte sur les indicateurs objectifs définis pour la tâche de mobilité (temps de mission, distance parcourue, respect de contrainte temporelle).

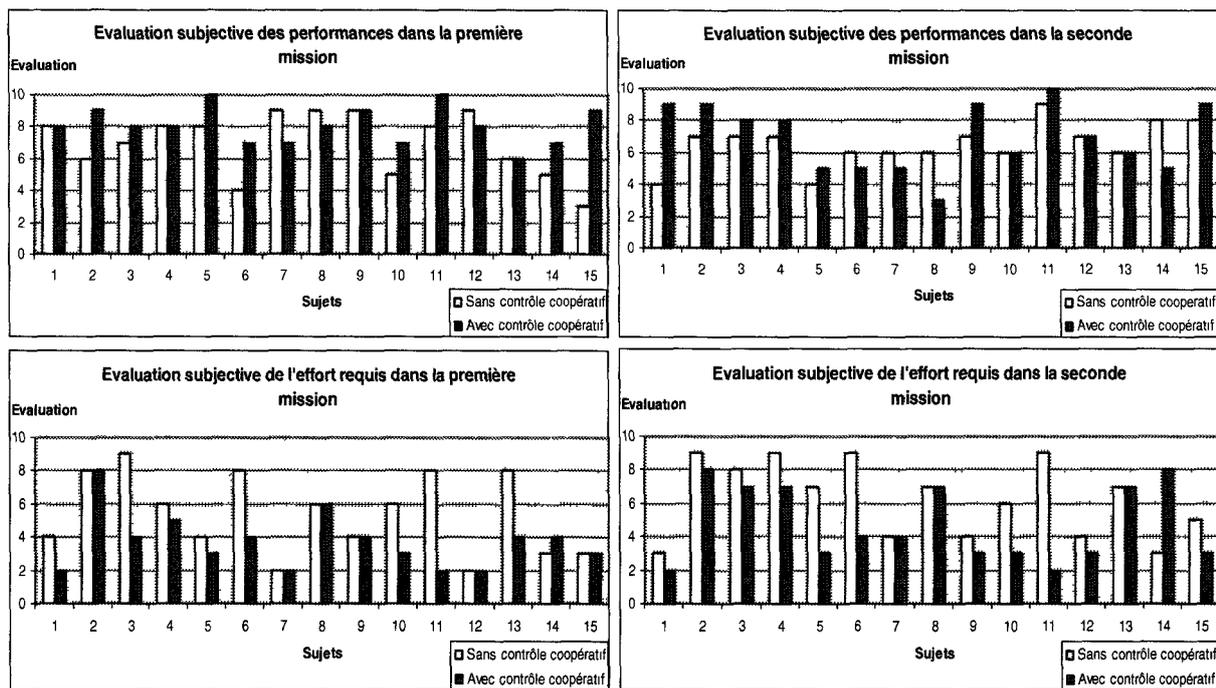


Figure 46. Evaluation subjective de l'efficacité sur l'ensemble des passations.

Les réponses des opérateurs ne permettent pas de mettre en évidence des différences entre les deux passations sur le niveau de performance du système (Figure 47). Pour les deux missions, 53% des sujets estiment que les performances sont améliorées par le contrôle coopératif.

L'effort requis est perçu comme étant moins important avec le contrôle coopératif notamment dans la gestion des perturbations. 53% des sujets estiment que l'effort requis est moins important dans la première mission et 73% dans la seconde mission.

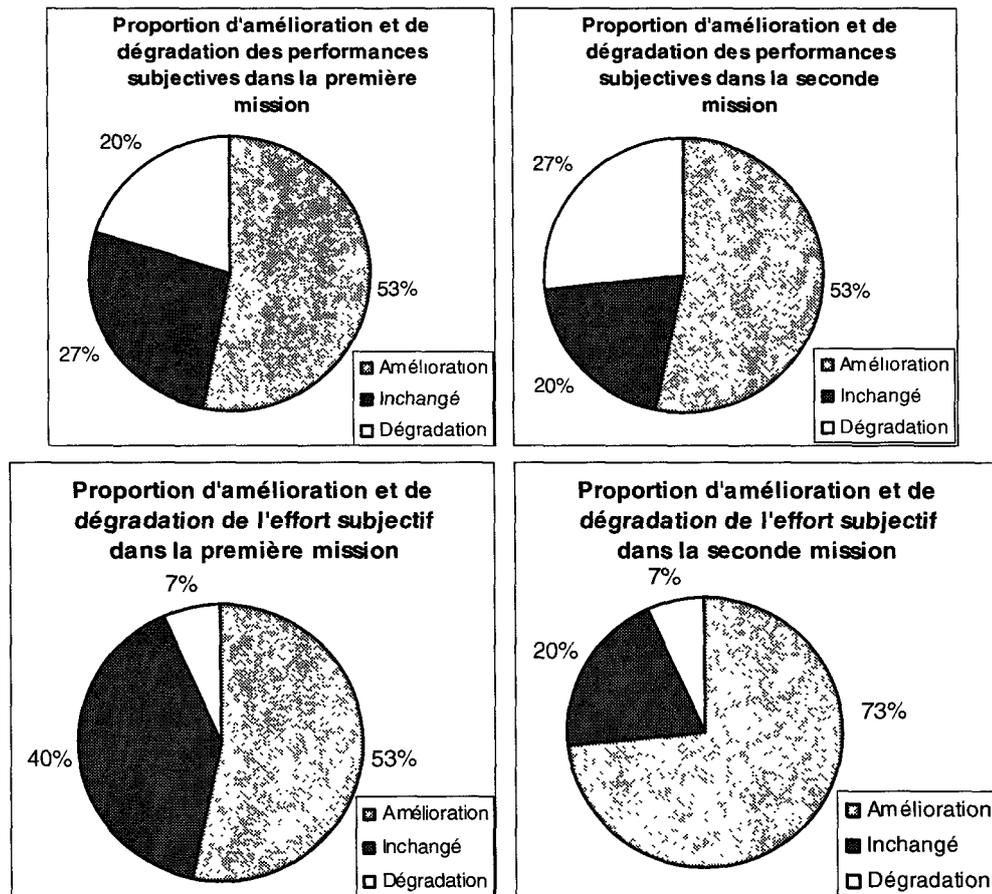


Figure 47. Proportion d'amélioration et de dégradation de l'évaluation subjective de l'efficacité sur l'ensemble des passations.

L'évaluation subjective des performances confirme les résultats objectifs qui ne montrent pas de différences significatives sur le temps de mission ou la distance parcourue. Cette évaluation apporte cependant une précision sur l'effort requis pour réaliser la mission. Le contrôle coopératif permet d'améliorer cette perception de l'effort et de considérer que des ressources ont été libérées lors de la réalisation de la mission avec le contrôle coopératif.

Les trois indicateurs (temps de mission, respect de contrainte temporelle, distance parcourue) liés au critère d'efficacité pour la tâche de mobilité montrent l'intérêt de décomposer les critères de résilience en indicateurs objectifs. Cette décomposition hiérarchique permet de multiplier les alternatives de réalisation possibles et de gérer plus efficacement les perturbations. Cette gestion des perturbations est alors susceptible d'être améliorée par le contrôle coopératif. Cette hypothèse est étudiée au travers des autres critères de résilience.

4.2 Evaluation du critère d'adaptabilité

4.2.1 Evaluation objective de l'adaptabilité

Le critère d'adaptabilité concerne le nombre de plans d'actions différents mis en œuvre afin de gérer l'occurrence des perturbations. L'évaluation peut être complétée par la pertinence des ces plans d'actions en termes de réalisation des objectifs par exemple (respect de la contrainte temporelle fixée). On s'intéresse dans le cadre du contrôle coopératif à la possibilité pour l'opérateur de sélectionner une autre alternative.

Le Tableau 24 détaille les solutions mises en œuvre dans les passations effectuées avec le contrôle coopératif. On omet dans ce tableau les sujets pour lesquels aucun changement d'alternative n'a été constaté. On constate que 7 sujets appliquent une solution différente de celle proposée par le contrôle coopératif dans la première mission. Le sujet 10 reprend en téléopération le robot à la fin de la procédure de récupération afin de corriger une imprécision de localisation. Le même comportement est adopté par ce sujet dans la seconde mission. Dans cette seconde mission, 4 autres sujets refusent la solution proposée.

Scénario de la mission	Mission 1 avec contrôle coopératif			Mission 2 avec contrôle coopératif
	Perturbation 1	Perturbation 2	Perturbation 3	Perturbation 1
Sujet 3	-	-	Désignation manuelle	-
Sujet 4	-	-	-	Téléopération
Sujet 6	-	-	Interruption de l'alternative: Désignation manuelle	Téléopération
Sujet 7	-	-	Désignation manuelle	Téléopération puis désignation manuelle
Sujet 8	-	-	Téléopération puis désignation manuelle	-
Sujet 10	-	Téléopération en fin de récupération	-	Reprise en main en fin de récupération
Sujet 13	-	Téléopération	Téléopération puis désignation manuelle	-
Sujet 14	Téléopération	-	-	Interruption de l'alternative en cours : Désignation manuelle puis téléopération

- : plan d'actions proposé par le contrôle coopératif accepté par l'opérateur.

Tableau 24. Solutions mises en oeuvre dans les passations avec contrôle coopératif.

Sur les 13 solutions mises en œuvre en contrôle coopératif, 1 solution entraîne un dépassement de la contrainte temporelle pour le sujet 8 dans la première mission et 2 solutions pour les sujets 10 et 14 dans la seconde mission. 6 solutions conduisent à une amélioration du temps de mission. Pour les 7 autres solutions, le temps de mission reste inférieur à 8min. L'adaptabilité du système, en termes de flexibilité, permet d'atteindre les objectifs dans 77% des cas.

4.2.2 Evaluation subjective de la perception de l'adaptabilité

L'adaptabilité peut également être évaluée de façon subjective. L'adaptabilité est traduite dans les questionnaires par le fait de contribuer à l'évitement d'erreurs par la proposition de solutions appropriées au contexte (Figure 48). Cette contribution prend en compte le nombre et le type des solutions proposées.

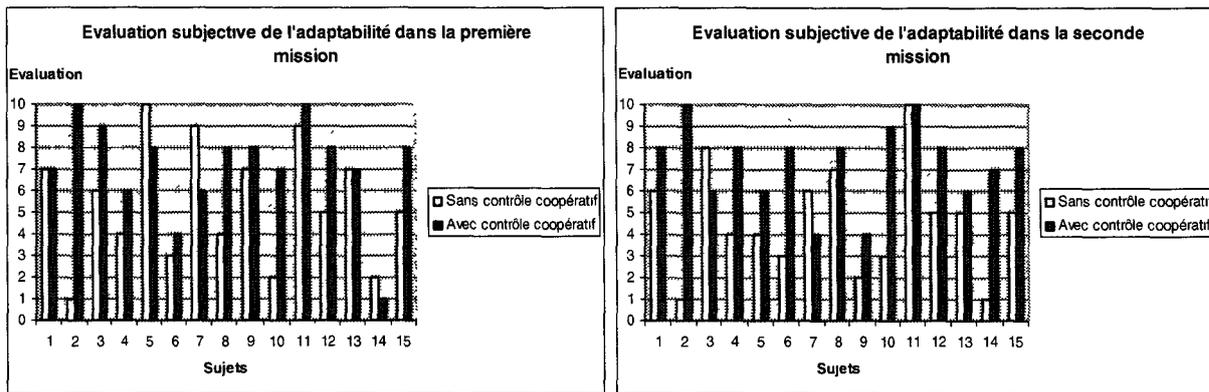


Figure 48. Comparaison de l'évaluation subjective de l'adaptabilité.

67% des sujets estiment que le contrôle coopératif augmente l'adaptabilité dans la première mission. Dans la seconde mission, 80% des sujets estiment que ce mode de contrôle permet également d'augmenter l'adaptabilité (Figure 49).

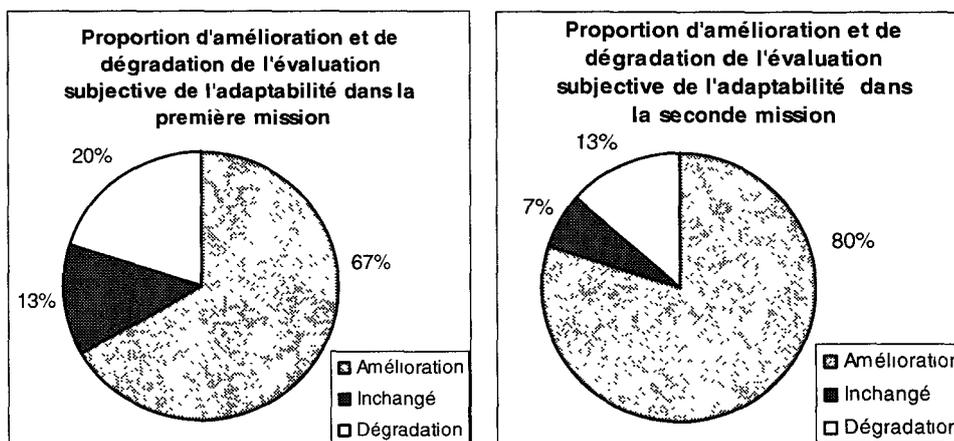


Figure 49. Proportion d'amélioration et de dégradation de l'évaluation subjective de l'adaptabilité.

La sélection d'autres alternatives de réalisation d'une tâche doit contribuer aux objectifs en respectant les contraintes fixées. Cet aspect est approfondi par l'évaluation du fonctionnement aux limites.

4.3 Evaluation du critère de fonctionnement aux limites

4.3.1 Evaluation du temps de résolution des perturbations

Le critère de fonctionnement aux limites est évalué de façon objective par le temps de récupération d'une perturbation. Ce temps est calculé depuis l'apparition de la défaillance jusqu'à la fin de la procédure de récupération mise en œuvre par l'opérateur humain ou par le système dans le cadre du contrôle coopératif.

	Mission 1 sans contrôle coopératif			Mission 1 avec contrôle coopératif		
	Perturbation 1 (sélection d'objet impossible)	Perturbation 2 (panne d'un capteur)	Perturbation 3 (panne d'un capteur)	Perturbation 1	Perturbation 2	Perturbation 3
Sujet 1	00:00:50	00:03:00	00:01:14	00:01:19	00:00:59	00:00:42
Sujet 2	00:01:16	00:01:40	00:00:54	00:00:25	00:00:52	00:00:52
Sujet 3	00:01:52	00:01:16	00:01:24	00:01:45	00:01:01	00:01:02
Sujet 4	00:00:50	00:01:07	00:00:50	00:01:21	00:00:56	00:00:58
Sujet 5	00:00:52	00:00:56	00:01:02	00:00:34	00:00:57	00:00:58
Sujet 6	00:02:45	00:00:34	00:00:47	00:01:36	00:00:59	00:01:04
Sujet 7	00:03:01	00:02:05	00:00:56	00:00:36	00:00:55	00:01:26
Sujet 8	00:00:49	00:00:52	00:02:18	00:02:44	00:00:59	00:01:49
Sujet 9	00:00:43	00:00:26	00:02:17	00:00:26	00:00:58	00:00:57
Sujet 10	00:01:00	00:01:37	00:01:02	00:02:15	00:01:05	00:00:43
Sujet 11	00:04:57	00:02:26	00:01:57	00:01:06	00:00:59	00:00:57
Sujet 12	00:02:17	00:01:02	00:01:03	00:00:59	00:00:55	00:00:58
Sujet 13	00:00:45	00:02:14	00:01:51	00:00:53	00:02:04	00:01:45
Sujet 14	00:01:19	00:01:22	00:01:36	00:01:50	00:00:55	00:01:12
Sujet 15	00:01:00	00:02:14	00:01:26	00:00:51	00:01:01	00:00:46

Tableau 25. Temps de résolution des perturbations dans la première mission.

Le Tableau 25 détaille les temps de résolution des perturbations présentes dans la première mission. Les résultats montrent une amélioration significative du temps de résolution des perturbations pour cette première mission. Les temps de résolution plus élevés avec le contrôle coopératif correspondent notamment pour la perturbation 1 à une mauvaise perception de l'opérateur de l'assistance demandée par le système.

Le Tableau 26 détaille les moyennes et les écarts-types des temps de résolution pour les trois perturbations présentes dans la première mission. On constate des temps de résolution plus faibles en moyenne avec le contrôle coopératif associés à des écarts-types plus faibles.

	Mission 1					
	Sans contrôle coopératif			Avec contrôle coopératif		
	Perturbation 1	Perturbation 2	Perturbation 3	Perturbation 1	Perturbation 2	Perturbation 3
Moyenne	00:01:37	00:01:31	00:01:22	00:01:15	00:01:02	00:01:05
Ecart-type	00:01:11	00:00:45	00:00:31	00:00:41	00:00:17	00:00:20

Tableau 26. Moyennes et écarts-types des temps de résolution des perturbations dans la première mission.

La mission 2 met en œuvre une seule perturbation pour laquelle une procédure de récupération plus complexe est proposée par le module de planification. Les alternatives proposées replanifient une partie de la mission en supprimant une étape qui ne peut plus être atteinte. Le Tableau 27 détaille le temps de résolution de la perturbation dans la seconde mission en distinguant les deux passations : sans et avec contrôle coopératif.

	Mission 2 sans contrôle coopératif	Mission 2 avec contrôle coopératif
Sujet 1	00:02:26	00:01:51
Sujet 2	00:03:11	00:01:38
Sujet 3	00:01:24	00:01:54
Sujet 4	00:01:48	00:01:48
Sujet 5	00:02:32	00:01:46
Sujet 6	00:01:51	00:02:27
Sujet 7	00:04:02	00:01:29
Sujet 8	00:01:53	00:01:45
Sujet 9	00:00:54	00:01:58
Sujet 10	00:02:08	00:01:39
Sujet 11	00:02:07	00:01:33
Sujet 12	00:01:13	00:01:46
Sujet 13	00:00:53	00:01:42
Sujet 14	00:01:36	00:03:11
Sujet 15	00:01:16	00:01:30

Tableau 27. Temps de résolution de la perturbation dans la seconde mission.

La solution proposée par le contrôle coopératif est rejetée par quatre opérateurs qui mettent alors en œuvre une autre alternative (arrêt de l'alternative en cours au bout d'un certain temps, désignation manuelle ou passage en téléopération). Pour deux de ces opérateurs, le temps de résolution en contrôle coopératif est plus élevé. Le Tableau 28 détaille les moyennes et écarts-types des temps de résolution de cette perturbation. En écartant les deux sujets évoqués précédemment, le temps de résolution moyen est amélioré et passe à 1min43s de même que l'écart-type qui passe à 9s pour le contrôle coopératif contre un temps moyen de 1min59s et un écart-type de 55s sans le contrôle coopératif.

	Mission 2	
	Sans contrôle coopératif	Avec contrôle coopératif
	Perturbation 1	Perturbation 1
Moyenne	00:01:57	00:01:52
Ecart-type	00:00:51	00:00:26

Tableau 28. Moyennes et écarts-types des temps de résolution de la perturbation dans la seconde mission.

La proportion d'amélioration du temps de résolution de l'ensemble des perturbations est de 71% pour la première mission. Le temps de résolution de la perturbation dans la seconde mission est amélioré par le contrôle coopératif pour 53% des sujets (Figure 50).

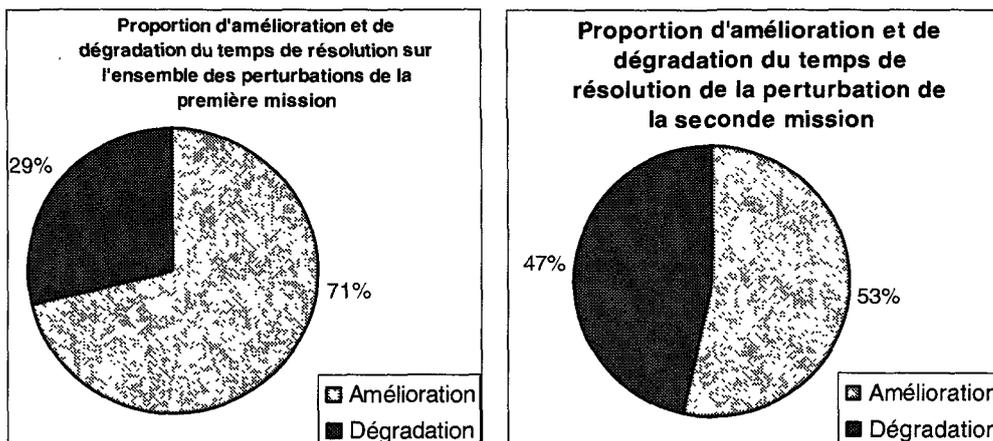


Figure 50. Proportion d'amélioration et de dégradation du temps de résolution des perturbations par le contrôle coopératif.

Les solutions proposées initialement par le contrôle coopératif permettent donc d'optimiser la résolution des perturbations en minimisant le temps de résolution. Ces solutions comprennent des plans d'actions faisant intervenir l'opérateur humain pour la désignation d'un amer dans un environnement encombré par exemple. Ce temps de résolution correspond à une phase d'instabilité pour le système vis-à-vis des objectifs prescrits dans le fichier de mission. Cette illustration correspond aux concepts introduits dans le chapitre 1 sur la différence entre stabilité, robustesse et résilience. Les points d'équilibre atteints par le système correspondent en effet aux tâches replanifiées par le système et qui permettent d'assurer la continuité de la mission.

4.3.3 Evaluation subjective de la perception du fonctionnement aux limites

L'évaluation subjective s'attache à décrire le fonctionnement aux limites en évaluant la perception de l'opérateur humain concernant sa répartition entre supervision de la tâche de mobilité et réalisation de la tâche d'observation. Le but est de déterminer dans quelle mesure le contrôle coopératif favorise la répartition des tâches entre l'opérateur humain et le robot. La Figure 51 montre la variation de l'importance accordée aux tâches de mobilité et d'observation par le contrôle coopératif. 72% des sujets consacrent plus d'attention à la tâche d'observation avec le contrôle coopératif dans la première mission. 57% des sujets consacrent plus d'attention dans la seconde mission.

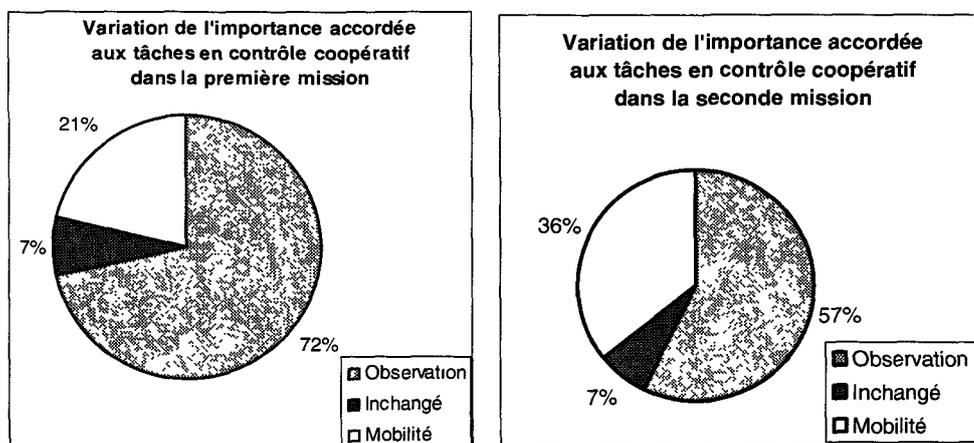


Figure 51. Variation de l'importance accordée aux tâches par le contrôle coopératif.

L'amélioration du temps de réalisation des perturbations augmente les ressources disponibles en termes d'attention de l'opérateur humain. Le contrôle coopératif permet de répartir les tâches de façon à favoriser celles pour lesquelles l'opérateur humain est indispensable, c'est-à-dire la tâche d'observation dans ces expérimentations.

4.4 Evaluation du critère d'interactions

4.4.1 Evaluation du temps de réaction à une sollicitation du robot

Le temps de réaction est comparé sur une perturbation de la première mission dans laquelle la solution proposée par le contrôle coopératif fait intervenir l'opérateur humain. On évalue le gain apporté par le contrôle coopératif en proposant une analyse de la situation susceptible d'aider l'opérateur humain à comprendre l'arrêt du robot. La Figure 52 illustre la comparaison des temps de réaction de l'opérateur humain suite à une sollicitation du robot. Le temps de réaction moyen est de 1min05s sans contrôle coopératif et de 36s avec le contrôle coopératif avec des écarts-types respectifs de 48s et 28s.

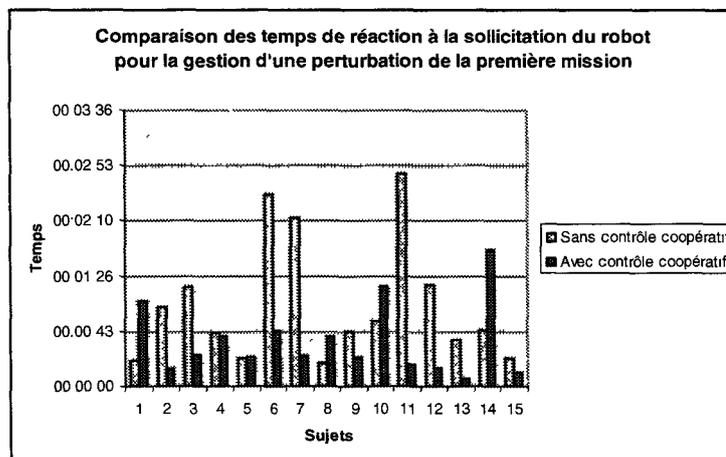


Figure 52. Comparaison des temps de réaction à la sollicitation du robot.

La Figure 53 illustre la proportion d'amélioration et de dégradation du temps de réaction de l'opérateur humain suite à une sollicitation du robot pour la gestion d'une perturbation.

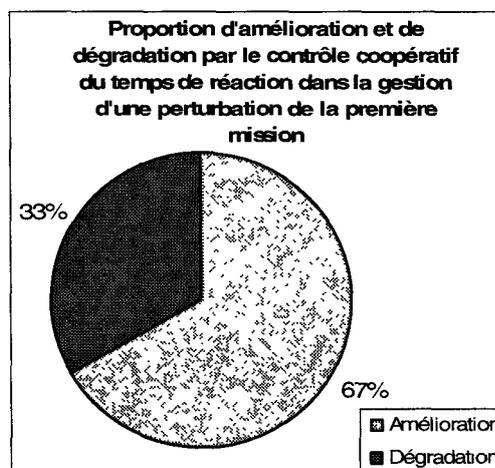


Figure 53. Proportion d'amélioration et de dégradation du temps de réaction dans la gestion d'une perturbation.

4.4.2 Evaluation subjective du critère d'interactions

Le critère d'interactions est évalué de façon subjective par la facilité d'utilisation de l'interface. L'étude ne s'attache pas ici à une étude de l'ergonomie de l'interface mais à la facilité de l'opérateur à percevoir les informations et à l'utilité de celles-ci dans les différentes phases de la mission (mobilité et observation).

L'importance accordée aux interactions est donc évaluée via les questionnaires subjectifs en se focalisant sur la surveillance des actions effectuées par le robot et sur la compréhension des solutions proposées par le contrôle coopératif.

La Figure 54 met en évidence que 33% des sujets sont plus impliqués dans la surveillance des tâches effectuées par le système et 27% dans la seconde mission.

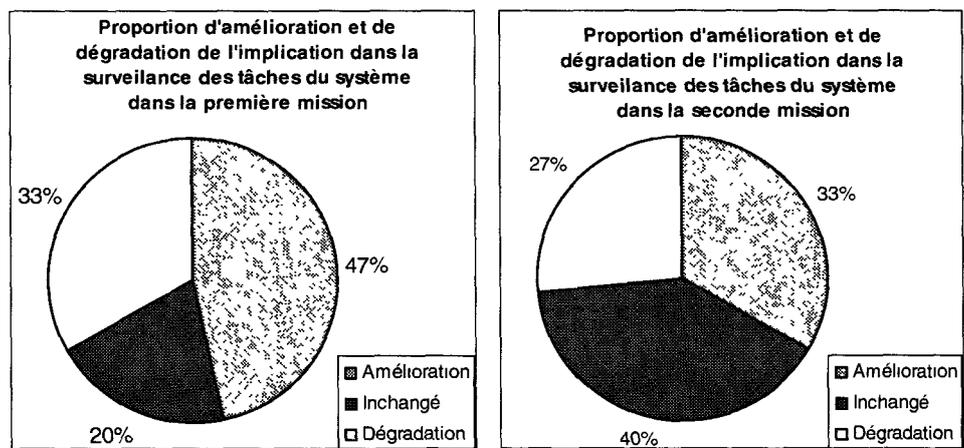


Figure 54. Proportion d'amélioration et de dégradation de l'implication dans la surveillance des tâches effectuées par le système.

Le Tableau 29 met en évidence l'évaluation fortement positive de la compréhension des solutions proposées par le système. Le détail des solutions proposées par le contrôle coopératif est utile aux sujets afin de comprendre les actions effectuées par le système lors d'une procédure de récupération.

	Mission 1	Mission 2
Moyenne	9	8
Ecart-type	1	2,22

Tableau 29. Moyennes et écarts-types de la compréhension des solutions proposées par le contrôle coopératif.

4.4.3 Pertinence des informations dans la gestion des perturbations

La pertinence des informations est prise en compte dans la gestion de deux perturbations particulières pour lesquelles aucun message d'erreur n'est affiché à l'opérateur humain. La première perturbation consiste à suivre un amer incorrect situé dans une direction légèrement différente de l'amer initialement prévu. Cette tâche est effectuée dans le mode d'autonomie M3, c'est-à-dire sans intervention de l'opérateur humain. Sur l'ensemble des passations, c'est-à-dire 30 missions (2 missions par sujet), seuls 3 sujets ont corrigé la trajectoire en redésignant le bon objet. 90% des sujets n'ont donc pas perçu le fonctionnement incohérent du robot et sont donc exposés à une situation potentiellement indésirable pour le système.

L'importance des informations liées à la mobilité est confirmée par les réactions des opérateurs humains face à la seconde perturbation qui nous intéresse ici.

Cette perturbation consiste à afficher une erreur sur la localisation du robot pendant une phase de téléopération. Dans ce cas de figure, tous les sujets ont détecté la perturbation du fait de l'utilisation de la vue cartographique lors des phases de téléopération. Cette perturbation a cependant entraîné des erreurs de localisation des objets, la vue cartographique étant utilisée pour la détection des objets.

La différence entre les deux perturbations montre l'importance des informations à apporter à l'opérateur en fonction des modes d'autonomie utilisés. Pour le mode M0 (mode de téléopération), les informations de mobilité sont essentielles et utilisées par les opérateurs (position, vitesse, orientation...). Pour les modes d'autonomie supérieurs, ces informations ne sont pas utilisées, ce qui explique la différence de traitement des perturbations.

4.5 Classement des critères de résilience

Les questionnaires proposés aux sujets à la fin de la phase d'expérimentation ont pour but d'évaluer l'importance accordée par les opérateurs aux critères de résilience. A partir de l'importance accordée à chaque critère, un classement est établi. Ce classement peut ensuite être utilisé par le module de prise de décision selon la méthode AHP (cf. chapitre 3) afin de classer les alternatives établies par le module de planification.

Même si les sujets ont peu d'expérience avec le contexte opérationnel et le concept de résilience, des tendances prometteuses se dégagent de l'analyse des classements proposés par les opérateurs. Les critères de résilience proposés dans le premier chapitre semblent donc correspondre au contexte applicatif présenté.

9 classements différents sont obtenus pour l'ensemble des sujets sur 24 classements possibles. Ces classements font ressortir l'importance des critères de fonctionnement aux limites et d'interactions. En effet, 9 sujets (60%) classent ces deux critères aux deux premières places.

La gestion des perturbations est alors considérée comme le critère principal dans l'évaluation du fonctionnement résilient d'un système. En effet, le critère de fonctionnement aux limites est classé en première position par 10 des 15 sujets. Les cinq autres sujets placent ce critère en seconde position. Le Tableau 30 présente les classements obtenus et le nombre d'occurrences de chaque classement.

Classements des critères	Nombre d'occurrences du classement
1. Fonctionnement aux limites 2. Interactions 3. Adaptabilité 4. Efficacité	4
1. Fonctionnement aux limites 2. Adaptabilité 3. Interactions 4. Efficacité	1
1. Adaptabilité 2. Fonctionnement aux limites 3. Interactions 4. Efficacité	1
1. Fonctionnement aux limites 2. Interactions 3. Efficacité 4. Adaptabilité	2
1. Efficacité 2. Fonctionnement aux limites 3. Interactions 4. Adaptabilité	1
1. Fonctionnement aux limites 2. Adaptabilité 3. Efficacité 4. Interactions	2
1. Interactions 2. Fonctionnement aux limites 3. Adaptabilité 4. Efficacité	1
1. Fonctionnement aux limites 2. Efficacité 3. Adaptabilité 4. Interactions	1
1. Interactions 2. Fonctionnement aux limites 3. Efficacité 4. Adaptabilité	2

Tableau 30. Classements de critères obtenus par les sujets et nombre d'occurrences de ces classements.

4.6 Discussion

L'expérimentation montre l'influence du contrôle coopératif sur les critères de résilience définis afin de gérer le fonctionnement du système. Des différences de priorité sont constatées entre ces critères. La nécessité d'une décomposition hiérarchique se vérifie, notamment avec l'efficacité où les indicateurs constitutifs de l'efficacité montrent des proportions d'amélioration différentes. Les évaluations objectives sur les critères de résilience sont confirmées par les évaluations subjectives via les questionnaires. Les résultats objectifs, notamment pour l'efficacité et le fonctionnement aux limites, sont également confirmés par le classement donné par les opérateurs. En effet, les différences peu significatives en termes de performances sont illustrées par un classement en dernière position du critère d'efficacité. L'amélioration du temps de résolution des perturbations sur l'ensemble des passations est confirmé par le classement en première position du critère de fonctionnement aux limites.

La faible priorité accordée à l'efficacité confirme la définition retenue pour la résilience globale du système (cf. section 5.2 du chapitre 1). Cette résilience globale est illustrée par

l'acceptation d'une dégradation des performances du système afin de récupérer de l'occurrence d'une situation indésirable.

Les interactions sont également considérées comme importantes par l'ensemble des opérateurs. Deux perturbations particulières ont montré la nécessité de transmettre à l'opérateur des informations précises sur les actions effectuées par le robot. Ces informations doivent de plus être contextualisées en fonction du mode d'autonomie courant, de la nature de la tâche en cours et des éventuelles perturbations qui peuvent être détectées par le système.

Néanmoins, l'expérimentation présente des limites. D'une part, la simulation ne permet pas de placer les sujets dans un contexte réel. Cela peut conduire à des comportements plus risqués puisque le robot mobile n'est pas réellement mis en danger. D'autre part, le temps d'expérimentation est limité et ne permet de mettre en œuvre des scénarios plus complexes. Les propositions du chapitre 3 sont cependant validées en termes d'apport du contrôle coopératif face à la résolution des perturbations et de représentation de la résilience par les quatre critères proposés.

5 Conclusion

Cette expérimentation a permis d'analyser et de mesurer la contribution du contrôle coopératif à la résilience du système Homme-robot. En s'appuyant sur les modules de planification et de prise de décision multicritère et en prenant en compte des évaluations objectives et subjectives, les propositions du chapitre 3 en termes de formalisme ont pu être appliquées. De plus, la faisabilité du contrôle coopératif Homme-robot a été démontrée par des résultats objectifs améliorant la gestion des perturbations. Enfin, les indicateurs de résilience proposés dans le premier chapitre ont montré leur pertinence par la capacité des opérateurs à élaborer des classements de critères cohérents avec les résultats objectifs et leur évaluation subjective des expérimentations.

Les évaluations objectives montrent l'apport du contrôle coopératif dans la gestion des perturbations avec une réduction significative du temps de résolution des situations indésirables. L'accent a été mis sur la validation du modèle proposé au chapitre 3 et sur la réaction et la récupération de l'occurrence d'une situation indésirable. Cet aspect de la résilience a été validé et confirmé par les évaluations subjectives et le classement des critères de résilience pour le processus de prise de décision. Les évaluations subjectives ont pour but d'analyser l'acceptation par l'opérateur humain du modèle proposé et d'évaluer sa perception de la résilience du système.

La méthode AHP permet de modéliser l'appréciation des critères de résilience du système par les opérateurs humains et de proposer des alternatives conformes aux attentes des opérateurs humains. Les critères qui ont servi à la caractérisation du fonctionnement d'un système résilient (cf. chapitre 1) et la méthode de prise de décision AHP sont donc validés au travers de ce protocole expérimental. En effet, les évaluations subjectives via les questionnaires confirment les évaluations objectives et ces évaluations subjectives sont elles-mêmes confirmées par les classements des critères de résilience proposés par les opérateurs.

Enfin, la majorité des solutions proposées par le module de planification sont acceptées par les opérateurs et conformes à leurs attentes. La replanification locale d'une partie de la mission contribue à la résilience du système en minimisant le temps d'indisponibilité de

l'opérateur pour une tâche secondaire, c'est-à-dire la tâche d'observation dans le cadre de ces expérimentations.

Les perturbations étudiées dans le cadre de cette campagne expérimentale se sont focalisées sur les menaces régulières et irrégulières. Les événements sans précédent sont décrits dans la littérature comme des événements inconcevables d'une gravité extrême pour le système et les utilisateurs modifiant de façon radicale le fonctionnement du système et le comportement des agents. L'occurrence d'événements sans précédent se traduit généralement par un échec des modules de prise de décision et de planification (pas de solution trouvée, solution incohérente...). Ce type d'événements dans le cadre d'un système mono-opérateur mono-robot n'apparaît pas pertinent pour les validations envisagées. En effet, le modèle ne prend pas en compte l'apprentissage et l'augmentation des compétences des agents du système. L'alternative envisagée est alors un retour au mode d'autonomie 0 du projet TAROT voire au mode 1 dans lequel l'opérateur humain décide des actions à réaliser. L'intérêt de la validation porte ici sur la validation et l'acceptation de plans d'actions élaborés en coopération avec le système automatisé selon une approche dans laquelle la gestion des perturbations est réalisée de façon partagée entre les agents techniques et humains. L'apprentissage des plans d'actions constitue l'un des axes des perspectives de recherche.

CHAPITRE 5 : PERSPECTIVES

Les expérimentations ont montré un besoin de représenter les informations nécessaires à l'opérateur humain en prenant en compte le contexte (nature de la tâche en cours) et le type d'événement indésirable rencontré. L'exploitation du concept d'affordance offre un moyen de représentation susceptible de contribuer à la résilience du système Homme-robot. Les affordances font l'objet du premier axe des perspectives de recherche présentées dans ce chapitre.

Afin de pouvoir éviter l'occurrence de situations indésirables, la définition d'un plan d'action doit prendre en compte l'éventualité de son échec. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à l'amélioration de l'aspect proactif de la résilience par l'anticipation des événements indésirables et par l'apprentissage des solutions mises en oeuvre.

La dimension organisationnelle de la résilience peut être étudiée au travers des interactions existant entre opérateurs humains et robots mobiles. Cette dimension a été prise en compte au travers du contrôle coopératif Homme-robot par la mise en oeuvre des formes de coopération Homme-machine. Les réflexions concernant la dimension organisationnelle de la résilience et la thématique de systèmes de systèmes sont développées dans la dernière partie de ce chapitre de perspectives.

1 Les affordances comme support du contrôle coopératif

1.1 Définitions des affordances

Le concept d'affordance a été proposé par Gibson [1986] pour décrire la relation entre l'animal et son environnement. Les affordances sont définies comme les opportunités d'action offertes par l'environnement à l'animal, ces actions pouvant être bénéfiques ou non. Les affordances sont caractérisées par une perception directe, sans interprétation, c'est-à-dire sans activité cognitive.

Une affordance est une propriété émergente dans le sens où les constituants du système agent-environnement ne possèdent pas cette propriété. L'affordance est donc une propriété que l'on retrouve uniquement au niveau du système. Les affordances forment alors une base commune de représentation de l'information et de communication et peuvent donc être exploitées dans l'élaboration d'alternatives de fonctionnement. Cette activité, liée à la récupération de l'occurrence d'un événement imprévu, est un processus collectif, consécutif à l'interactivité existant entre les agents d'un système. Les définitions formelles qui sont proposées permettent d'opérationnaliser le concept initial d'affordance proposé par Gibson.

Plusieurs auteurs ont travaillé sur la formalisation du concept d'affordance [Turvey 1992 ; Stoffregen 2003 ; Chemero 2003 ; Sahin *et al.* 2006]. Turvey [1992] définit une affordance comme une propriété de l'environnement susceptible d'être actualisée si et seulement s'il existe une complémentarité avec l'agent. Stoffregen [2003] propose une révision de cette première définition en considérant une affordance comme une propriété émergente du système agent-environnement. L'auteur renforce ainsi la nécessité d'une complémentarité

entre l'agent et l'environnement. L'actualisation de l'affordance, c'est-à-dire la réalisation de l'action affordée résulte alors de la complémentarité entre l'intention de l'agent et l'opportunité de l'action offerte par l'environnement. Stoffregen [2003] propose ainsi la définition formelle suivante :

Soit le système $W_{pq} = (X_p, Z_q)$. Soit p une propriété de X et q une propriété de Z . La relation entre p et q définit une propriété h de niveau plus général relative au système agent-environnement. h est une affordance de W_{pq} si et seulement si :

1. $W_{pq} = (X_p, Z_q)$ possède la propriété h .
2. Ni Z ni X ne possède h .

Chemero [2003] propose une révision des approches proposées par Turvey et Stoffregen. Cette approche considère les affordances comme liées au système agent-environnement plutôt qu'à l'environnement seul comme cela est le cas pour la proposition de Turvey [1992]. En cela, Chemero [2003] adopte le même point de vue que l'approche de Stoffregen [2003] et définit les affordances comme des relations entre les capacités des organismes et les caractéristiques de l'environnement, suivant cette structure :

Afforde- ϕ (caractéristique, capacité) où ϕ représente le comportement affordé.

On retrouve ici une approche ne considérant que les caractéristiques utiles d'un objet de l'environnement plutôt que l'objet lui-même. La définition de Chemero complète l'approche de Stoffregen [2003] en incluant le comportement associé à l'affordance. L'introduction du comportement dans la définition formelle des affordances permet l'élaboration d'un ensemble d'affordances associé à un objet de l'environnement. L'utilisation des affordances contribue alors à l'adaptabilité du système – l'un des critères de résilience – en permettant d'obtenir un ensemble de solutions possibles dans un contexte donné en se basant uniquement sur des propriétés caractéristiques et complémentaires de l'environnement et du système Homme-machine.

L'utilisation du concept d'affordance s'est heurtée à deux difficultés majeures [Steedman 2002]. La première est liée à l'idée de perception directe qui est un postulat de départ de l'approche de Gibson. Dans la perception directe, les informations pertinentes parviennent directement et sans interprétation dans le champ visuel de l'individu. Cette approche est contraignante pour le développement d'un formalisme exploitant les affordances. En effet, l'idée de perception directe se heurte à la culture de l'individu et à son intention.

L'intention de l'agent doit être prise en compte dans la distinction entre l'existence d'une affordance, sa perception et son actualisation. On peut considérer qu'une affordance existe indépendamment de l'intention de l'agent. La perception d'une affordance particulière parmi l'ensemble des affordances existantes dépend de l'intention de l'agent. L'actualisation de l'affordance quant à elle correspond à la réalisation de l'action considérée comme la plus susceptible de concourir à la réalisation du but de l'agent. Ces différentes étapes d'existence, de perception et d'actualisation montrent les limites du concept initial de Gibson relativement à la nature de l'affordance et la nécessité de formaliser ce concept. Ce manque de formalisme initial a conduit à la deuxième difficulté.

Cette difficulté concerne la distinction à établir entre actions, événements et affordances. Les définitions formelles définissent les affordances comme des propriétés ou des relations. Cependant, les applications présentées, dans le domaine de la robotique, traduisent ces propriétés comme des actions simples réalisables par le robot [Stoytchev 2005]. Une

affordance doit être considérée comme une relation émergente qui résulte de la complémentarité entre les capacités d'un agent et les caractéristiques d'une entité de l'environnement.

1.2 Application des définitions formelles

Dans les environnements virtuels, le concept d'affordance peut être rapproché des notions de focus et de nimbus définis par Benford et Fahlén [1993]. Ces notions permettent de modéliser les interactions entre agents dans des environnements virtuels. Le focus correspond à la région de l'espace dans laquelle l'agent est capable de percevoir des informations et le nimbus à la zone d'influence d'un objet de l'environnement, c'est-à-dire la région de l'espace dans laquelle les caractéristiques de l'objet sont perceptibles et accessibles à d'autres agents. La conjonction de ces deux zones permet l'interaction entre l'agent et l'objet via la perception par l'agent des propriétés de l'objet (Figure 55).

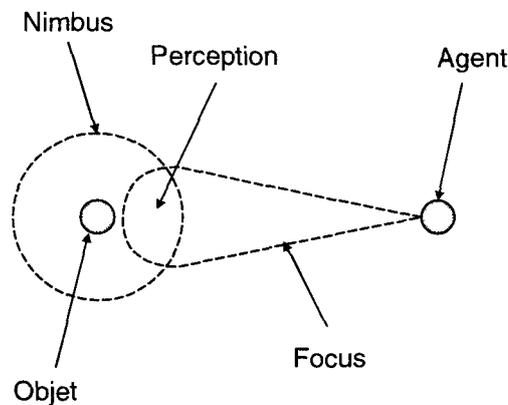


Figure 55. Focus et nimbus (d'après [Benford et Fahlén 1993]).

Les affordances sont principalement de nature visuelle mais d'autres sens peuvent être exploités dans des environnements virtuels pour représenter des affordances auditives ou olfactives par exemple. En effet, l'association de stimuli à des événements ou des objets particuliers peut être assimilée à des affordances qui permettent de compléter la conscience de la situation des opérateurs et d'améliorer leur perception de l'environnement [Tijou *et al.* 2007].

Le concept d'affordance peut être appliqué au domaine de la robotique mobile en introduisant trois perspectives différentes (Figure 56) [Sahin *et al.* 2006].

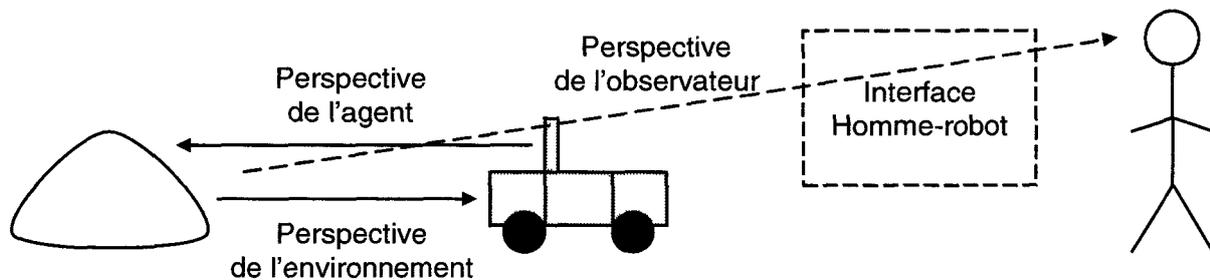


Figure 56. Perspectives pour la définition d'affordances

La première considère les affordances du point de vue de l'agent, une affordance est alors présentée comme une relation liant l'effet d'un comportement de l'agent exercé sur un objet de l'environnement :

(*effet* , (*objet* , *comportement*)).

La seconde perspective est relative à l'objet même et l'affordance met alors en avant l'effet d'un comportement exercé par un agent.

(*effet* , (*agent* , *comportement*)).

Cette perspective est peu vraisemblable dans la réalité car elle prête à un objet de l'environnement sinon une intention, tout au moins la perception directe de ses propres propriétés. Cette perspective peut cependant être intéressante dans le cadre d'environnements virtuels pour faciliter la représentation d'entités et la communication de propriétés entre objets (au sens informatique du terme). Dans un contexte plus réel, cette perspective pourrait à terme être associée à des objets tels que d'autres robots ou des capteurs fixes fournissant des informations aux agents présents dans l'environnement.

La troisième perspective introduit la notion d'un observateur extérieur. La relation définissant une affordance dans ce cas est la suivante :

(*effet* , (*agent* , (*objet* , *comportement*))).

Zaff [1995] introduit la notion de perception des affordances pour un autre individu, qui permet de compléter la troisième perspective. Cette perception est à rapprocher du cadre de la coopération Homme-robot, l'observateur extérieur représentant ici l'opérateur humain supervisant le robot. La perception des affordances du robot est alors perçue par le biais de l'interface Homme-robot qui peut donner à l'opérateur humain la possibilité d'interagir avec les informations présentées [Goodrich et Olsen 2003]. Les affordances peuvent fournir un support de représentation dans le cadre de la coopération Homme-machine pour l'assistance à des personnes handicapées. Nait-Chabane *et al.* [2009] s'intéressent au problème du déplacement d'un robot équipé d'un bras robotisé pour la saisie d'objets. Ce problème de saisie est abordé par Stoytchev [2005]. L'apprentissage des actions par les affordances détectées en fonction du contexte est susceptible de contribuer à l'amélioration de la tâche de saisie.

Cette classification selon trois perspectives différentes (agent, environnement, observateur extérieur) s'applique aux affordances perçues par le robot et l'opérateur humain. Certaines affordances, dans un contexte dynamique, peuvent cependant ne pas être perçues ou se révéler inexacts, ce qui est le cas des affordances fausses et des affordances cachées.

Gaver [1991] définit trois types d'affordances : affordances perceptibles, affordances fausses et affordances cachées (Tableau 31). Les affordances perceptibles sont des affordances existantes pour lesquelles de l'information perceptuelle existe. Une affordance cachée est une affordance existante pour laquelle aucune information n'est disponible. Une telle affordance doit être inférée à partir d'autres informations. Une affordance fausse est définie par le fait qu'une information suggère une affordance non existante sur laquelle l'agent essaiera d'agir par erreur. Les affordances fausses et cachées sont susceptibles de mener à des actions erronées.

Affordance	NON	OUI
Information perceptuelle	Affordance fausse	Affordance perceptible
OUI	Affordance fausse	Affordance perceptible
NON	Rejet correct	Affordance cachée

Tableau 31. Distinction des types d'affordances selon la perception de l'information [Gaver 1991].

1.3 Exploitation des affordances dans la réalisation d'un but

On s'attache à décrire dans cette section dans quelle mesure les affordances peuvent contribuer aux critères de résilience qui ont été validés dans le chapitre précédent.

La réalisation d'un but pour un agent inclut l'identification des affordances perceptibles, fausses et cachées. Ce processus contribue à l'aspect proactif du système Homme-machine en permettant l'anticipation de situations préjudiciables par l'intégration des affordances dans l'algorithme de planification.

Les affordances sont intégrées à un niveau réactif de l'activité d'un agent (skill-based), c'est-à-dire à un cycle perception-action, tout en étant guidées par le but en cours de réalisation. L'identification et l'actualisation de l'affordance sont alors liées à une prise en compte de plus en plus importante de l'intention. Une affordance est identifiée par l'agent lorsqu'elle est potentiellement utile pour la réalisation du but, elle correspond à une recherche dans l'environnement d'objets présentant les caractéristiques nécessaires à la réalisation du but courant. L'actualisation de l'affordance correspond à la réalisation de l'action associée à l'affordance.

L'algorithme de planification défini dans le chapitre 3 détermine une séquence d'actions permettant de réaliser une tâche donnée. Un plan d'actions élaboré par le planificateur peut alors être considéré comme une suite d'états dans lesquels des affordances sont perceptibles, fausses ou cachées. Les prédicats $precond(a)$ et $effets(a)$ où a est une action permettent de définir les affordances fausses et cachées et de proche en proche d'évaluer les plans les plus résilients, en termes d'anticipation de situations indésirables.

Ces prédicats sont utilisables pour représenter les affordances cachées et fausses. Si on se réfère au formalisme retenu pour définir une affordance, à savoir $(effet, (agent, (objet, comportement)))$, on peut associer le prédicat $effets(a)$ à l'effet résultant de l'actualisation d'une affordance qui se traduit par l'exécution d'une action a et le prédicat $precond(a)$ à l'existence d'un couple associant un agent à l'application d'un comportement sur un objet.

Plusieurs cas sont possibles pour les affordances cachées. Il peut y avoir par exemple une absence d'information perceptuelle uniquement pour l'un des agents alors qu'une affordance est existante, c'est-à-dire une affordance cachée pour cet agent et une affordance perceptible pour le ou les autres agents. De plus, l'affordance cachée peut se traduire de deux façons différentes pour un agent donné : soit l'agent perçoit l'objet mais ne parvient pas à en dégager des propriétés caractéristiques permettant la reconnaissance d'une affordance, soit l'agent ne perçoit pas du tout l'objet. Ces cas correspondent à l'absence de préconditions requises pour la perception d'une affordance. Les effets de l'actualisation de l'affordance sont cependant

conformes. On peut alors décrire de façon générale une affordance cachée en utilisant les prédicats $precond(a)$ et $effets(a)$ où a est une action associée à l'affordance :

$$affCachée(a) \leftrightarrow effets(a) \wedge \neg precond(a).$$

Deux types d'affordances fausses peuvent être identifiés pour le robot. Gaver [1991] considère une affordance fausse comme une situation dans laquelle l'information perçue suggère une affordance inexistante sur laquelle l'agent essaie d'agir. L'erreur peut alors se situer à deux niveaux : soit lors de la perception de l'information et une reconnaissance incorrecte de l'objet, soit lors de la détermination de l'action correspondante et du comportement à adopter. Les affordances fausses peuvent alors être traduites par le prédicat suivant où a est une action que l'agent tente de réaliser :

$$affFausse(a) \leftrightarrow \neg effets(a) \vee \neg precond(a).$$

Les affordances contribuent également à la réalisation d'un but en fournissant un moyen de représentation des données issues des comportements sensorimoteurs. Les affordances sont définies en fonction des propriétés des objets susceptibles de fournir des opportunités d'actions plutôt qu'en fonction d'une description complète des objets eux-mêmes. Un support commun de représentation des informations entre l'opérateur humain et le robot contribue alors aux interactions présentes au sein du système en réduisant par exemple le temps de traitement de cette information. Les expérimentations ont montré que le contrôle coopératif permet de réduire le temps de réaction suite à une sollicitation. L'intégration des affordances perceptibles dans la résolution d'une perturbation permettrait d'améliorer la conscience de la situation des opérateurs humains.

Les premières perspectives ont montré que des liens peuvent être établis entre résilience et affordances. Ces liens peuvent être synthétisés sous la forme d'un indicateur qui permet d'évaluer la contribution des affordances à l'évaluation de la résilience du système. Les affordances peuvent contribuer à évaluer l'efficacité du système en se basant par exemple sur la métrique suivante [Zieba *et al.* 2007a]:

$$AR = \frac{PA + HA + FA}{TA}$$

Avec PA = nombre d'affordances perceptibles actualisées correctement,

HA = nombre d'affordances cachées correctement détectées,

FA = nombre d'affordances fausses détectées,

TA = nombre total d'affordances détectées.

Cet indicateur permet d'évaluer la résilience en termes d'anticipation et d'évitement de situations dangereuses. Cet indicateur peut alors être intégré au critère d'efficacité. En effet, les affordances fausses et affordances cachées sont susceptibles de mener à des situations dangereuses pour le système. Cet indicateur est borné entre 0 et 1. Un indicateur proche de 0 révèle une incapacité du système à détecter et à actualiser les affordances. La résilience du système face à des événements imprévus en termes d'anticipation et d'évitement est alors faible. Un indicateur proche de 1 montre au contraire une capacité du système à faire face à des événements connus en actualisant des affordances perceptibles mais également à des événements inattendus (menaces régulières ou irrégulières) en détectant et en évitant les affordances fausses et cachées.

Le détail de l'indicateur proposé permet pour un plan d'action donné de déterminer la probabilité pour le système d'être confronté à des situations indésirables dues à des

affordances cachées, fausses ou incorrectement actualisées. La capitalisation des solutions proposées contribue alors à la composante proactive de la résilience du système en prévenant les risques liés à l'actualisation de ces affordances. Les réflexions concernant l'amélioration de la proactivité du système sont approfondies dans la suite de ce chapitre.

2 Amélioration de la proactivité par l'apprentissage de la mise en œuvre et des conséquences des solutions proposées

La notion de résilience se distingue principalement des notions de stabilité et de robustesse par la composante proactive de l'activité du système ou de l'organisation. Cette composante proactive se traduit par une surveillance constante de l'état du système et par l'aptitude à anticiper, voire à éviter l'occurrence de situations indésirables. L'algorithme de planification proposé dans le chapitre 3 cherche à établir un plan d'action en prenant en compte l'autonomie des agents du système. L'autonomie des agents en termes de capacités dépend en partie de l'environnement et de la situation. La conscience de la situation et de l'interaction entre les agents contribue à la résilience du système Homme-machine en permettant l'anticipation et la réaction face à l'occurrence de situations indésirables.

La composante proactive de la résilience peut alors être améliorée dès la planification afin d'anticiper les cas possibles menant à l'occurrence de situations indésirables. Pour cela, on intègre à l'algorithme une donnée renseignant sur le risque associé au plan en cours de construction. Cette donnée, qualifiée de certitude du plan d'action, évalue les conséquences des suites d'actions en fonction de la situation et de l'état des différents agents. Elle peut alors exploiter en partie les affordances cachées et fausses telles qu'elles ont été définies dans la section précédente de ce chapitre.

Le modèle proposé au chapitre 3 peut alors être complété en intégrant l'évaluation de la certitude des plans d'actions. Cette évaluation est réalisée en prenant en compte la capitalisation du déroulement des buts en termes de bénéfice, de coût et de déficit potentiel (Figure 57).

deux alternatives indépendantes. L'alternative de référence Alt_{init} est le plan initialement suivi par le système Homme-robot et fourni par le fichier de mission. L'évaluation de l'alternative de référence correspond aux effets attendus de la suite d'actions décrites dans le fichier de mission et selon les formes de coopération préalablement définies.

Ces conséquences sont évaluées en termes de bénéfice (B), de coût (C) et de déficit potentiel (D) [Polet *et al.* 2002] :

si $CS(Alt_{select})_i - CS(Alt_{init})_i > 0$

$$B(Alt_{select})_i = CS(Alt_{select})_i - CS(Alt_{init})_i$$

$$C(Alt_{select})_i = 0$$

sinon

$$C(Alt_{select})_i = CS(Alt_{init})_i - CS(Alt_{select})_i$$

$$B(Alt_{select})_i = 0$$

si $CF(Alt_{select})_i - CF(Alt_{init})_i > 0$

$$D(Alt_{select})_i = CF(Alt_{select})_i - CF(Alt_{init})_i$$

sinon

$$D(Alt_{select})_i = 0$$

avec CS : conséquences du succès de l'alternative

CF : conséquences de l'échec de l'alternative

Une alternative bien classée par le processus d'analyse hiérarchique mais présentant un risque élevé peut être écartée au profit d'une alternative moins bien classée mais présentant des déficits plus faibles. Cette sélection dépend cependant du profil sélectionné pour la réalisation d'un but, c'est-à-dire des préférences accordées aux critères de résilience dans le module de prise de décision. Plusieurs heuristiques sont également utilisables pour le choix final de l'alternative : maximisation du bénéfice uniquement, maximisation du bénéfice sur un critère particulier, maximisation du bénéfice et minimisation du coût simultanées, comportement sécuritaire (privilégier les déficits les plus faibles).

2.2 Certitude du plan d'action

L'aspect proactif de la résilience au niveau de la planification est intégré par la certitude associée aux alternatives. La fonction de certitude contribue à l'aspect anticipatif de la résilience en déterminant les alternatives qui sont susceptibles d'échouer. Cet indicateur peut être estimé en appliquant le modèle BCD [Polet 2002] à la totalité du plan d'action et qui correspond à l'ensemble des situations potentiellement dangereuses pour le système.

L'introduction de la certitude dans l'évaluation des alternatives permet d'anticiper voire d'éviter l'occurrence d'accidents. La certitude est issue de la capitalisation des tâches composant le plan. Cette fonction est calculée en temps réel lors des différentes étapes de la planification. Certaines actions sont alors susceptibles de contribuer à l'amélioration de la fonction de certitude. Ces actions peuvent être des interventions de l'opérateur humain sur la tâche de mobilité du robot, une correction de la localisation du robot. En effet, dans le cas des

erreurs de localisation, un plan d'action peut être sujet à une faible certitude lorsque plusieurs tâches successives ne font pas appel à une tâche de relocalisation.

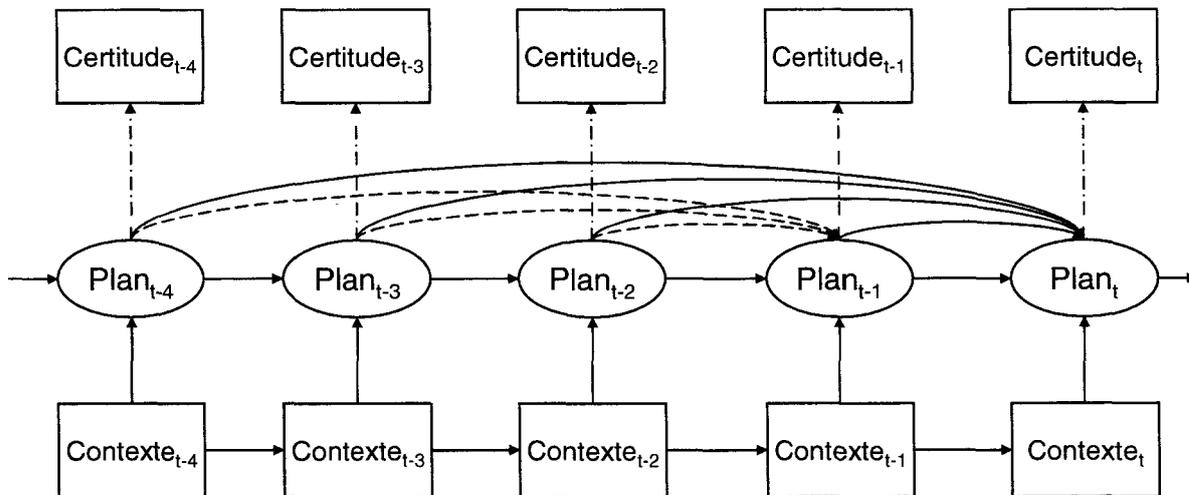


Figure 58. Structure de la fonction de certitude.

La mise en œuvre de cette fonction de certitude peut s'appuyer sur différents outils comme les chaînes de Markov ou les réseaux bayésiens. La Figure 58 illustre la structure du réseau soutenant la fonction de certitude. Le plan prend en compte l'ensemble des étapes passées. Chaque étape du plan est élaborée en fonction du contexte courant. Le contexte est déterminé en fonction de l'étape précédente uniquement. La fonction de certitude s'apparente ainsi à l'élaboration d'une chaîne de Markov évaluant les étapes du plan en cours de construction. L'ordre du processus de Markov correspond alors au nombre d'étapes du plan en cours de construction. Les variables d'état quant à elles dépendent de la suite d'actions composant le plan en cours de construction. L'ordre associé aux variables d'état augmente donc en fonction des tâches primitives composant le plan d'action. Ce nombre augmente continuellement afin de garder une approximation correcte de la fonction de certitude.

2.3 Evaluation de la résilience des solutions mises en œuvre

Une transition de mode d'autonomie ou de comportement sensorimoteur est considérée comme une phase d'instabilité pour le système Homme-robot. La résilience du système Homme-robot est alors fonction de la minimisation de ce temps de transition. Ce temps de transition dépend de la représentation des informations échangées entre l'opérateur humain et le système technique. Ces informations peuvent être de différentes natures et de différents niveaux d'interprétation [Milot 1999]. Le temps de transition peut être décomposé selon les trois étapes identifiées par Amalberti [2006], à savoir la détection d'une défaillance, la recherche d'une solution et la récupération par la transition entre deux modes :

$$T_{Total} = T_{Detection} + T_{Recherche} + T_{Transition} .$$

Le temps de détection correspond au laps de temps entre l'apparition de l'événement imprévu et la détection par le système d'une nécessité de transition. Le temps de recherche correspond au temps d'élaboration d'une solution appropriée au contexte. Le temps de transition correspond au temps de transition effective entre les deux modes de fonctionnement.

Un dernier indicateur peut être proposé afin d'évaluer le dernier aspect de la résilience, c'est-à-dire la capacité du système à récupérer d'une situation problématique. Cet indicateur, nommé récupérabilité, est formulé sous la forme d'un ratio [Zieba *et al.* 2007a] :

$$PR = \frac{RE_{HR} + RE_{HH} + RE_{RR} + RE_{RH}}{E_H + E_R}$$

Avec E_H = nombre d'erreurs commises par l'opérateur humain,

E_R = nombre d'erreurs commises par le robot,

RE_{HR} = nombre d'erreurs commises par l'opérateur humain et récupérées par le robot,

RE_{HH} = nombre d'erreurs commises et récupérées par l'opérateur humain,

RE_{RR} = nombre d'erreurs commises et récupérées par le robot,

RE_{RH} = nombre d'erreurs commises par le robot et récupérées par l'opérateur humain.

La récupérabilité est bornée entre 0 et 1 et exprime la résilience en termes de capacité de récupération du système. Si $PR = 0$, aucune erreur n'est récupérée, la résilience du système Homme-robot en termes de récupération est alors minimale. Si $PR = 1$, toutes les erreurs sont récupérées et la résilience du système en termes de récupération des erreurs est alors maximale.

La fonction de certitude et la résilience peuvent être évaluées pour chacune des alternatives élaborées par l'algorithme de planification. Ces alternatives peuvent mettre en œuvre une forme de coopération particulière voire combiner plusieurs formes de coopération sur la totalité du plan d'action. Chacune de ces formes est susceptible de contribuer aux performances du système global.

2.4 Capitalisation de la mise en œuvre des formes de coopération Homme-machine

L'apprentissage consiste également à étudier l'évolution de l'autonomie du système en fonction des formes de coopération. Un événement sans précédent est généralement associé à un ensemble de compétences vide pour la gestion de cet événement. La coopération est alors un moyen de générer les compétences nécessaires à la résolution de celui-ci au travers des trois formes précédemment définies (cf. section 5.2 du chapitre 2).

2.4.1 Apprentissage et coopération augmentative

La coopération augmentative mène à une communication directe entre les agents en ce qui concerne les ressources critiques et les conflits sur les ressources partagées. Les conflits sur les ressources sont alors gérés par des interactions directes entre les agents, ce qui permet par capitalisation des échanges de décentraliser l'approche du contrôleur de mission.

2.4.2 Apprentissage et coopération intégrative

La coopération intégrative a principalement pour but l'augmentation des compétences des agents. L'application d'une forme de coopération intégrative mène à une convergence des ensembles de compétences des agents lorsque la capitalisation est mise en œuvre. Dans le cas où les agents ne peuvent compléter leurs ensembles de compétences du fait d'une impossibilité matérielle, la capitalisation consiste à intégrer dans une procédure de résolution d'un agent l'intervention d'un ou de plusieurs autres agents. Dans ce cas, le module de planification peut être substitué par une génération de plan partagé.

2.4.3 Apprentissage et coopération confrontative

Le résultat de cette forme de coopération est l'ajout d'une nouvelle procédure de résolution dans les ensembles de compétences des agents impliqués dans la coopération. L'ajustement des prescriptions peut alors être décidé par l'agent superviseur, i.e. le contrôleur de mission ou l'opérateur humain en fonction du mode d'autonomie, afin de mettre en œuvre la nouvelle procédure. Selon la nature de la tâche réalisée et les capacités d'apprentissage du système, les compétences et les capacités du système peuvent être augmentées. Les formes de coopération intégrative et augmentative seront alors principalement conditionnées par les prescriptions des agents.

La coopération confrontative peut également mener à combiner les formes intégrative et augmentative en comparant sur une sous-tâche l'implication d'un seul agent et l'implication des deux agents.

L'apprentissage au travers du mode M2 défini dans le cadre du projet TAROT peut être appliqué au contrôle coopératif. Les échanges (acceptation, refus d'une solution et justification) permettent à l'opérateur d'apprendre le fonctionnement du robot et pour le robot d'identifier les décisions de l'opérateur en prenant en compte le contexte associé au refus de la suggestion proposée. La capitalisation de ces échanges mène à la constitution de plans conformes aux expériences passées.

L'apprentissage par les formes de coopération a pour but de décentraliser le système. La décentralisation du système, c'est-à-dire la suppression du contrôleur de mission mène à des interactions directes entre les agents du système. Un système décentralisé est l'une des propriétés constitutives d'un système de systèmes. L'intégration de l'apprentissage et l'amélioration de la proactivité du système permettent d'étendre l'approche proposée aux systèmes de systèmes. Les réflexions concernant cette extension constituent la troisième partie de ce chapitre de perspectives.

3 Vers une application de l'approche proposée aux systèmes de systèmes

Dans le cadre d'un système Homme-machine composé d'un opérateur humain et d'un robot mobile autonome, les agents peuvent avoir des objectifs différents et complémentaires. Les expérimentations ont montré le besoin d'envisager la coopération Homme-machine à un niveau global en prenant en compte les contraintes relatives aux différentes tâches (mobilité et observation dans le cadre des expérimentations). Dans les perspectives des travaux menés par la DGA dans le cadre de la Bulle Opérationnelle Aéroterrestre (BOA), des groupes d'opérateurs humains et de drones seront amenés à interagir et auront chacun des objectifs spécifiques. Cette section s'attache à décrire dans quelle mesure les systèmes de systèmes peuvent prolonger le formalisme mis en place pour un système Homme-machine.

3.1 Définition des systèmes de systèmes

Avant d'explorer les perspectives ouvertes par l'application de l'approche proposée dans ce mémoire aux systèmes de systèmes, il convient de définir les termes « système » et « système de systèmes ». Pour cela, nous nous référons aux définitions proposées par Luzeaux [2008] :

- Un système est un ensemble intégré d'éléments – personnels, produits, processus -, connectés et reliés entre eux, en vue de satisfaire un ou plusieurs objectifs définis.

- Un système de systèmes est un assemblage de systèmes pouvant potentiellement être acquis et/ou utilisés indépendamment, pour lequel le concepteur, l'acquéreur et/ou l'utilisateur cherchent à maximiser la performance de la chaîne de valeur globale, à un instant donné et pour un ensemble d'assemblages envisageables.

Une synthèse des différentes définitions existantes dans la littérature est par ailleurs proposée par Luzeaux [2008]. Cette synthèse fait apparaître la diversité des domaines dans lesquels le terme « systèmes de systèmes » est employé : défense, systèmes de santé, économie, systèmes de production, réseaux de transports interconnectés... Des caractéristiques communes doivent cependant être dégagées de ces différents domaines afin de proposer une utilisation rigoureuse de ce concept.

Les problématiques d'un système Homme-machine composé d'un opérateur et d'un robot mobile peuvent être étendus à l'échelle d'un système de systèmes en considérant plusieurs groupes d'opérateurs et de drones (aériens, terrestres...) coopérant ensemble afin de réaliser un ensemble d'objectifs différents et complémentaires.

Maier [1996] identifie cinq caractéristiques que doivent posséder les systèmes de systèmes :

- Indépendance opérationnelle des éléments : chaque élément du système de systèmes pris séparément reste fonctionnel.
- Indépendance managériale des éléments : chaque élément est acquis et intégré séparément et possède un cycle de vie propre.
- Développement évolutif : les fonctions et les buts sont modifiés en fonction de l'expérience.
- Comportement émergent : le ou les comportements émergents caractéristiques ne sont pas des propriétés des constituants du système mais uniquement du système global.
- Distribution géographique : les constituants du système de systèmes interagissent par échange d'informations sur une large échelle.

Une première approche triviale du concept de système de systèmes consiste à utiliser la définition d'un système et à juxtaposer des éléments correspondant à cette définition. Cependant, un système de systèmes autorise des comportements émergents, c'est-à-dire des comportements non observables au niveau des constituants pris séparément. De plus, toute suppression d'un constituant du système de systèmes entraîne une disparition du ou des comportements émergents.

L'émergence apparaît être une notion indissociable du concept de système de systèmes. Cette section va s'attacher à mettre en parallèle les notions d'émergence et de résilience afin de les intégrer au concept de systèmes de systèmes.

3.2 Emergence et résilience dans les systèmes de systèmes

L'émergence au sein d'un système est présente lorsque des comportements émergents cohérents au niveau global (niveau macroscopique) sont issus dynamiquement des interactions présentes au niveau local (niveau microscopique). De tels comportements présentent un caractère de nouveauté par rapport aux constituants du système [De Wolf et Holvoet 2005]. Les caractéristiques d'un système émergent sont les suivantes :

- Effet « micro-macro » : les propriétés, comportements ou structures au niveau macroscopique (global) sont issues des interactions présentes au niveau microscopique (local).

- Comportement nouveau : les constituants au niveau local du système ne possèdent pas de représentation explicite du comportement global et de l'objectif du système.
- Cohérence : les constituants ont une représentation distincte mais convergente de leur activité.
- Constituants interactifs : les constituants du système doivent interagir, la juxtaposition des constituants n'est pas suffisante.
- Dynamique : les comportements ou structures évoluent au cours du temps.
- Contrôle décentralisé : aucun constituant unique du système ne contrôle directement le niveau global.
- Lien bi-directionnel : les constituants du système participent à l'élaboration d'un comportement émergent et ce comportement émergent peut à son tour influencer les constituants du système.
- Robustesse et flexibilité : la perte ou le remplacement d'un constituant du système ne provoque pas la perte du comportement émergent.

Le concept d'émergence présente ici des similarités avec la résilience telle qu'elle peut être définie au travers des propriétés décrites dans la section 5.3 du chapitre 1. La cohérence et le lien bi-directionnel sont ainsi similaires aux caractéristiques de cohésion et d'interactions croisées entre les niveaux du système [Fiksel 2003 ; Hollnagel et Woods 2006]. La robustesse et la flexibilité traduisent le comportement résilient du système dans les limites de fonctionnement, à savoir que la perte d'un constituant du système global entraînera une diminution graduelle des performances et non une perte totale du comportement émergent.

La résilience appliquée à un système de systèmes peut alors être interprétée comme la capacité à retrouver ou à maintenir le ou les comportements émergents caractéristiques du système de systèmes malgré l'occurrence d'une défaillance majeure – pouvant se traduire par la perte d'un constituant du système – ou en présence d'une perturbation continue. Dans le cadre du modèle de contrôle coopératif proposé dans ces travaux, ces comportements émergents sont la définition d'un plan d'action, la sélection d'une alternative et la réalisation du but prenant en compte l'autonomie de l'ensemble des agents du système.

Le maintien du niveau de performance et du comportement émergent est alors le fait d'une réorganisation du système global. Celle-ci est caractéristique de l'autonomie du système quant à la possibilité de s'adapter à des circonstances en prenant l'initiative de décider et d'agir seul [De Wolf *et al.* 2004 ; cf. section 1 du chapitre 2 pour une discussion sur l'autonomie]. Cette réorganisation est cependant absente des caractéristiques d'un système émergent présentées ci-dessus. La notion d'autonomie des constituants est également peu mise en avant.

Un second concept complémentaire à l'émergence est alors nécessaire : l'auto-organisation, qui est définie comme un processus dynamique et adaptatif par lequel les systèmes acquièrent et maintiennent leur structure sans contrôle extérieur [De Wolf et Holvoet 2005]. L'auto-organisation répond à plusieurs caractéristiques :

- Organisation croissante des constituants : les constituants acquièrent une structure spatiale, temporelle et fonctionnelle afin de remplir une fonction spécifique.
- Autonomie : absence de contrôle extérieur.
- Adaptabilité ou la robustesse face aux changements : le système doit être capable de générer une variété de comportements en exploitant l'expérience passée du système par exemple.
- Processus dynamique : le système doit être dynamique et capable de réagir à des changements.

De Wolf et Holvoet [2005] ont montré que l'auto-organisation et l'émergence sont deux concepts proches pouvant être combinés. De la même façon, émergence et résilience sont deux concepts dont la combinaison peut s'avérer profitable dans la conception de systèmes de systèmes.

La gestion des défaillances avant, pendant et après leur occurrence est une caractéristique fondamentale de la résilience telle qu'elle est envisagée dans ce mémoire. Bien que les caractéristiques d'un système capable d'auto-organisation soient les pré-requis d'un système résilient, la gestion proactive des défaillances reste absente de la définition de l'émergence et de l'auto-organisation. [Zolesio 2008] insiste sur la notion de proactivité dans la gestion des risques au sein de systèmes de systèmes en s'intéressant à l'apparition de signaux dits faibles dont la conjonction est susceptible d'entraîner l'occurrence d'un événement redouté. Cette vision de la résilience dans les systèmes de systèmes est à rapprocher du modèle FRAM (Functional Resonance Analysis Method) proposé par Hollnagel [2004].

L'intégration de la résilience dans les systèmes de systèmes se doit de prendre en compte l'émergence et l'auto-organisation et permet de compléter la conception des systèmes de systèmes en intégrant la gestion des défaillances.

3.3 Extension de l'approche proposée aux systèmes de systèmes

La section précédente a montré les perspectives de l'approche en termes de capitalisation des solutions proposées et d'apprentissage. La capitalisation des interactions présentes dans les différentes formes de coopération et de leurs conséquences permet à terme une décentralisation du système. Le but de cette capitalisation est alors de supprimer le contrôleur de mission et de recourir à une coopération d'égal à égal (peer-to-peer) entre les agents.

Les systèmes de systèmes résultent de la décision conjointe d'un certain nombre d'acteurs de coopérer en rassemblant des systèmes unitaires que les uns et les autres détiennent en propre [Micouin 2008]. La coopération des différents acteurs se fait en vue d'un bénéfice global supérieur aux bénéfices locaux (i.e. des acteurs) éventuels et malgré les coûts possibles. Les systèmes de systèmes sont également appelés systèmes coopératifs.

Le système tel qu'il est décrit dans l'approche proposée est un système qui reste centralisé autour du contrôleur de mission. L'approche proposée diffère cependant des approches classiques dans lesquels l'opérateur humain est le seul agent superviseur, en charge du niveau d'activité stratégique. Les perspectives d'extension de l'approche à un système de systèmes passent par la décentralisation du système et une interaction directe entre les agents, cette interaction étant matérialisée par la mise en œuvre des formes de coopération (cf. section 5.2 du chapitre 2). La Figure 59 illustre le principe d'une architecture décentralisée pour le système Homme-robot où les interactions sont directes entre les agents, c'est-à-dire sans un agent superviseur de type contrôleur de mission. Un tel système peut impliquer plusieurs opérateurs humains interagissant avec plusieurs drones.

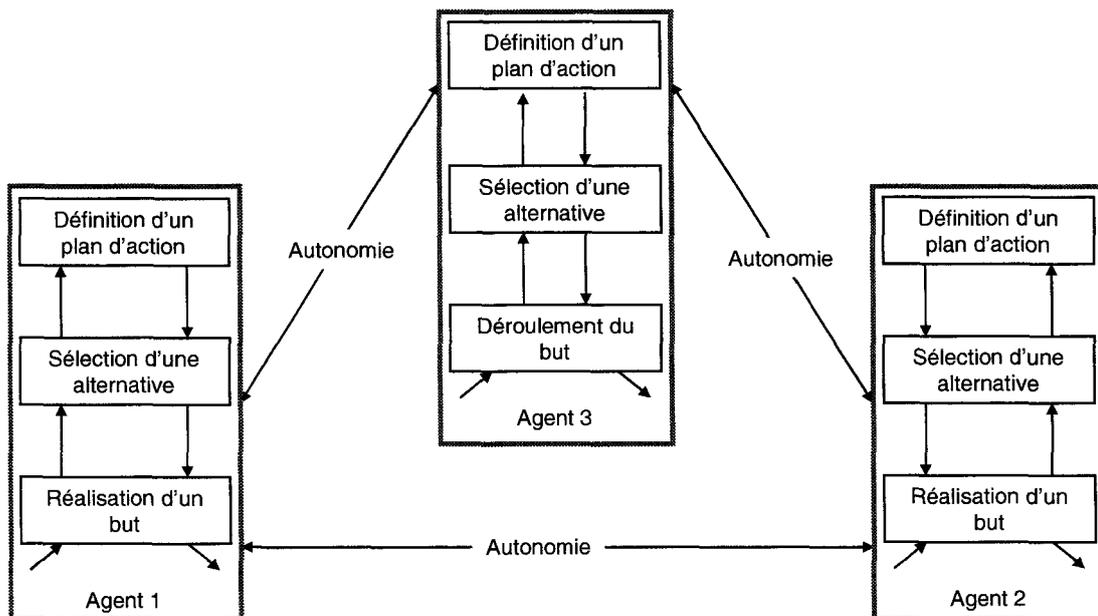


Figure 59. Architecture décentralisée du système Homme-robot.

Les systèmes unitaires composant le système de systèmes peuvent avoir des objectifs distincts. L'extension aux systèmes de systèmes permet de prendre en compte des tâches plus générales que les tâches de mobilité considérées dans le projet TAROT. L'opérateur humain peut en effet être affecté à une tâche de reconnaissance ou de surveillance ne pouvant pas être déléguée totalement au système automatisé. La décentralisation des niveaux d'activité au sein du système de systèmes est alors un moyen de favoriser l'échange des contraintes sur des tâches associées à des objectifs différents et de mettre en place un contrôle mutuel entre les agents du système.

4 Conclusion

Nos travaux offrent de nombreuses perspectives. Elles concernent dans un premier temps l'amélioration de la représentation des informations partagées entre l'opérateur humain et le système automatisé. Cette représentation commune doit minimiser le temps d'interprétation de la situation courante. Dans le contexte de l'amélioration de la résilience, les informations partagées doivent contribuer à l'amélioration de la conscience de la situation lors de l'occurrence d'un événement indésirable. Les opportunités d'actions contribuant à la résolution de la perturbation sont alors modélisées en utilisant le concept d'affordance. La distinction des affordances fausses et des affordances cachées contribue à l'évitement de situations indésirables par l'identification des préconditions nécessaires aux opportunités d'actions.

Dans le cadre de la résilience, l'anticipation des situations indésirables peut également être améliorée par la capitalisation de la mise en œuvre des solutions coopératives. Ces solutions, basées sur les trois formes de coopération Homme-machine, sont analysées selon le modèle Bénéfice – Coût – Déficit potentiel afin d'associer à chaque plan d'action une fonction de certitude. Cette fonction permet d'écarter des plans exposant le système à des risques de nature à compromettre la réalisation des objectifs.

L'extension de l'approche proposée est envisageable au niveau des systèmes de systèmes. De tels systèmes tendent à être hétérogènes et à mettre en relation plusieurs opérateurs humains et

plusieurs robots autonomes de natures différentes (drones terrestres et aériens). Le modèle d'autonomie proposé trouve alors son intérêt en termes de compétences d'un agent donné. Le partage des informations dans un tel système devient alors primordial en distinguant les opportunités d'actions conformes à chaque agent.

L'approche proposée envisage la décentralisation du système afin de se conformer à la littérature existante dans les systèmes de systèmes. On caractérise alors la résilience au sein d'un système de systèmes comme le maintien, malgré l'occurrence de situations indésirables, d'un comportement global émergent résultant de la complémentarité des agents constituants.

Chaque agent est soumis à des contraintes qui lui sont propres. Les contraintes envisagées au niveau d'un système de systèmes sont alors localisées au niveau stratégique de l'architecture de contrôle. Dans la perspective de la décentralisation du système, la question peut se poser quant à l'acceptation de contraintes émises par les agents techniques et imposées à l'opérateur humain.

L'ensemble de nos perspectives s'attache donc à montrer que la résilience peut être améliorée du point de vue de l'anticipation des situations indésirables en se fondant sur l'approche proposée dans ce mémoire. Les affordances représentent un support de représentation de l'information susceptible de contribuer aux critères de résilience proposés dans ce mémoire. Le modèle proposé est également étendu à un système de systèmes afin de montrer la pertinence de la prise en compte des aspects organisationnels dans un système hétérogène.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude de la résilience d'un système coopératif Homme-robot. L'objectif de nos travaux était de proposer un modèle de contrôle coopératif contribuant à la résilience du système Homme-machine par une gestion de l'autonomie ajustable. Nous avons soulevé les limites des définitions de l'autonomie ajustable et du contrôle coopératif et le manque d'intégration de ces deux concepts. Un formalisme a été proposé afin de prendre en compte les ajustements d'autonomie de l'ensemble des agents du système Homme-machine et l'influence de la coopération sur l'autonomie de ces agents. La contribution à la résilience du système est évaluée par quatre critères (efficacité, adaptabilité, fonctionnement aux limites, interactions) décomposables hiérarchiquement en indicateurs objectifs. Ce modèle de contrôle coopératif a ensuite été validé par une étude expérimentale.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les apports possibles des recherches dans les systèmes Homme-machine au domaine de la robotique mobile terrestre. Les architectures de contrôle hybrides en robotique permettent de faire le lien avec les modèles de l'activité de l'opérateur humain. La notion de contrôle est primordiale dans les systèmes Homme-machine et est liée à l'analyse des risques (risques techniques ou risques d'erreur humaine). La résilience s'attache à une analyse des risques proactive de façon à maintenir un fonctionnement correct malgré l'occurrence de situations indésirables. Quatre critères ont été proposés afin d'évaluer la résilience d'un système : efficacité, adaptabilité, fonctionnement aux limites, interactions. Ces critères sont à la fois des principes de conception d'un système résilient et des indicateurs objectifs permettant d'évaluer le fonctionnement du système.

Le second chapitre concernait les moyens de contrôle de la résilience. L'autonomie ajustable et la coopération Homme-machine sont les deux moyens identifiés dans le cadre de ces travaux. Nous avons envisagé l'autonomie d'un agent selon deux aspects : les aspects sémantiques (compétences, capacités et prescriptions) et les niveaux d'activité (réalisation d'une tâche, sélection d'une alternative, définition d'un plan d'actions). Les ajustements d'autonomie, envisagés au niveau d'un agent et au niveau du système global, conduisent à une modification de la répartition des tâches entre les agents, principalement humains et techniques. La coopération Homme-machine est illustrée par le contrôle coopératif Homme-robot. Nous avons soulevé le manque de cohésion entre les principes d'autonomie ajustable et de contrôle coopératif qui semblent indissociables dans le cadre de l'amélioration de la résilience du système.

La formalisation de l'approche proposée pour l'autonomie fait l'objet du troisième chapitre. Les aspects sémantiques de l'autonomie servent de base à l'élaboration des algorithmes décrivant les niveaux d'activité de l'agent. Nous avons proposé des algorithmes de prise de décision et de planification basés sur des méthodes hiérarchiques. Les plans d'actions définis mettent en place une coopération Homme-machine entre l'opérateur humain et le robot et ajustent l'autonomie de ces agents en fonction des ressources disponibles. Ces ajustements d'autonomie conditionnent ensuite la réalisation de la suite du plan et la coopération entre les agents. Cette coopération est mise en œuvre au travers de trois formes de coopération pour lesquelles les préconditions en termes d'autonomie ont été définies. Ces préconditions sont exprimées en fonction des aspects sémantiques des agents concernés.

Le quatrième chapitre a présenté notre étude expérimentale du contrôle coopératif Homme-robot qui avait pour objectif de valider notre modèle. Nous avons développé une plate-forme expérimentale sous la forme d'un micro-monde simulant le déplacement d'un robot terrestre autonome dans un environnement naturel. L'opérateur avait pour objectif de superviser la mission de déplacement réalisée de façon autonome par le robot et d'effectuer simultanément une tâche d'observation. Les résultats de cette campagne expérimentale valident les propositions du chapitre 3. Des différences significatives sont constatées pour les passations effectuées avec le contrôle coopératif, notamment en termes de récupération de situations indésirables. De plus, les critères de résilience et leur décomposition hiérarchique sont correctement perçus et évalués par les opérateurs humains.

Suite à nos travaux, nous proposons des perspectives de recherche visant premièrement à améliorer l'adaptabilité et la cohésion du système par une représentation commune des opportunités d'actions. Celles-ci sont traduites par la notion d'affordance qui permet de représenter les situations potentiellement indésirables pour le système. Un second axe des perspectives s'intéresse au renforcement de l'aspect proactif de la résilience par la capitalisation des solutions coopératives mises en œuvre. Celle-ci permet de définir une fonction de certitude, basée sur le modèle Bénéfice – Coût – Déficit potentiel afin de détecter au plus tôt la probabilité de l'échec d'un plan d'actions. Enfin, nous avons proposé d'appliquer nos travaux aux systèmes de systèmes. Notre approche, fondée sur la résilience organisationnelle et l'émergence, permet d'exploiter les compétences des agents du système global afin de coopérer sur des objectifs distincts mais complémentaires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Albus 2002] Albus J. S., "4D/RCS A reference Model Architecture for Intelligent Unmanned Ground Vehicles". Proceedings of the SPIE 16th Annual International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls, Orlando, FL, April 1-5, 2002.
- [Amalberti 1996] Amalberti R., "La conduite des systèmes à risque", collection Le Travail Humain, Presses Universitaires de France, 1996.
- [Amalberti 2006] Amalberti R., "Optimum system safety and optimum system resilience: agonistic or antagonistic concepts?". In E. Hollnagel, D.D. Woods and N. Leveson (Eds). Resilience Engineering: Concepts and precepts, Ashgate, 2006.
- [Anders *et al.* 2006] Anders S., Woods D. D., Wear R. L. et Perry S. J. "Limits on adaptation: Modeling Resilience and Brittleness in Hospital Emergency Departments". Proceeding of the 2nd Symposium on Resilience Engineering, Juan-les-Pins, France, 8-10 Novembre 2006.
- [Bainbridge 1983] Bainbridge L., "Ironies of automation". Automatica, Vol. 19, N°6, pp. 775-779, 1983.
- [Benford et Fahlén 1993] Benford S., Fahlén L., "A Spatial Model of Interaction in Large Virtual Environments". Third European Conference on Computer Supported Cooperative Work (ECSCW'93), Milan, September, 1993.
- [Bongard *et al.* 2006] Bongard J., Zykov V., Lipson H., "Resilient machines through continuous self-modeling". Science, Vol. 314, pp. 1118-1121, november 17th, 2006.
- [Bourhis *et al.* 2001] Bourhis G., Horn O., Habert O., Pruski A., "Autonomous vehicle for people with motor disabilities. IEEE Robotics and Automation magazine, Special Issue on "Reinventing the wheelchair", Vol. 7, n° 1, pp. 20-28, 2001.
- [Boyd 1996] Boyd J.R. "The Essence of Winning and Losing", Personal communication, 1996. Retrieved from the internet on October 2008.
- [Bradshaw *et al.* 2004] Bradshaw J. M., Feltovitch P. J., Jung H., Kulkarni S., Taysom W., Uszok A., "Dimensions of adjustable autonomy and mixed-initiatives interaction". M. Nickles, M. Rovatsos, and G. Weiss (Eds.): AUTONOMY 2003, LNAI 2969, pp. 17-39, 2004© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004.
- [Castelfranchi et Falcone 1998] Castelfranchi C. et Falcone R., "Towards a theory of delegation for agent-based systems". In Robotics and Autonomous Systems, Vol. 24, N° 3, pp. 141-157, Septembre 1998.
- [Carabelea *et al.* 2003] Carabelea C., Boissier O., Florea A., "Autonomie dans les systèmes multi-agents", Actes des JFSMA 2003, Hammamet, Tunisie, pp.191-204, 2003.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Clough 2002] Clough B.T. "Metrics, Schmetrics! How The Heck Do You Determine A UAV's Autonomy Anyway?" In Proceeding of the Performance Metrics for Intelligent System Workshop, 2002.
- [Chemero 2003] Chemero A., "An outline of a theory of affordances", *Ecological Psychology*, Vol. 15, N° 2 , pp. 181 – 195, Avril 2003.
- [Connell 1992] Connell J. H., "SSS : A Hybrid Architecture Applied to Robot Navigation". Proceedings of the 1992 IEEE Conference on Robotics and Automation (ICRA-92), pp.2719-2724, 1992.
- [Cyrulnik 2000] Cyrulnik B., "Un meilleur malheur". Odile Jacob, Paris, 2000.
- [Dalgalarondo 2003] Dalgalarondo A., "A propos de l'autonomie des robots". Rapport intermédiaire CTA/02 350 108 /RIEX / 807, 2003.
- [Dearden et Harrison 1995] Dearden, A.M. and M.D. Harrison, "Formalising human error resistance and human error tolerance". In Proceedings of the Fifth International Conference on Human-Machine Interaction and Artificial Intelligence in Aerospace, EURISCO, 1995.
- [Demazeau 1995] Demazeau Y., "From interactions to collective behaviour in agent-based systems", In Proceedings of the 1st European Conference on Cognitive Science, saint-Malo, France, pp. 117-132, 1995.
- [Dorais *et al.* 1999] Dorais G. A., Bonasso R. P., Kortenkamp D., Pell B., Schreckenghost D., "Adjustable autonomy for human-centered autonomous systems on Mars". Proceedings of the 6th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), Workshop on Adjustable Autonomy Systems, 1999.
- [Drury *et al.* 2003] Drury J. L., Scholtz J., Yanco H. A., "Awareness in human robot interactions". Proceedings of the IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, Washington DC, October, 2003.
- [Endsley 1996] Endsley M. R., "Automation and situation awareness" in (Eds.) R. Parasuraman and M. Mouloua, *Automation and human performance: theory and applications*, pp. 163-181, Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum, 1996.
- [Erol *et al.* 1994] Erol K., Hendler J., Nau D. Semantics for hierarchical task-network planning. Technical Report TR-94-31, UMIACS, 1994.
- [Falcone et Castelfranchi 2001] Falcone R., Castelfranchi C., "The human in the loop of a delegated agent: the theory of adjustable social autonomy" in *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, Vol. 31, N° 5, September, 2001.
- [Fiksel 2003] Fiksel J.: Designing resilient, sustainable systems. *Environmental Science and Technology*, Vol. 37, N° 23, 2003.
- [Firby 1989] Firby R. J., "Adaptive execution in complex dynamic worlds". Thèse de doctorat, Université de Yale, 1989.
- [Fong *et al.* 1999] Fong T., Thorpe C., Baur C., "Collaborative control: a robot-centric model for vehicle teleoperation". Proceedings of the AAAI Spring Symposium on Agents with Adjustable Autonomy, Stanford CA, USA, AAAI Technical Report SS-99-06.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Fong *et al.* 2004] Fong T., Kaber D., Lewis M., Scholtz J., Schultz A. and Steinfeld A, "Common metrics for human-robot interaction". *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, 2004.
- [Gat 1992] Gat E., "Integrating planning and reacting in a heterogeneous asynchronous architecture for controlling real-world mobile robots". *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*, 1992.
- [Gaver 1991] Gaver W. W., "Technology affordances". *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human factors in computing systems: Reaching through technology*, New Orleans, Louisiana, United States, pp. 79 – 84, 1991.
- [Gibson 1986] Gibson J. J. *The ecological approach to visual perception*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 1986. Originally published in 1979.
- [Girodet 1976] Girodet J., "Dictionnaire de la langue française", Editions Bordas, Paris, 1976.
- [Goldberg et Chen 2001] Goldberg K., Chen B., "Collaborative control of robot motion – Robustness to error". *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Robots and Systems*, October 2001, Maui, HI.
- [Goodrich *et al.* 2001] Goodrich M.A., Olsen D.R. Jr., Crandall J.W., Palmer T.J., "Experiments in Adjustable Autonomy". *Proceedings of IJCAI Workshop Autonomy, Delegation and Control: Interacting with Intelligent Agents*, 2001.
- [Goodrich et Olsen 2003] Goodrich M.A., Olsen D.R., "Seven principles of efficient human robot interaction", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 4, pp. 3942- 3948, 2003.
- [Hale et Heijer 2006a] Hale A. et Heijer T., "Defining resilience". In E. Hollnagel, D.D. Woods, N. Leveson (Eds.) "Resilience Engineering: Concepts and Precepts", Ashgate, 2006.
- [Hale et Heijer 2006b] Hale A. et Heijer T., "Is resilience really necessary? The case of railways". In E. Hollnagel, D.D. Woods, N. Leveson (Eds.) "Resilience Engineering: Concepts and Precepts", Ashgate, 2006.
- [Hoc 1996] Hoc J.-M., "Supervision et contrôle de processus – La cognition en situation dynamique". *Presses Universitaires de Grenoble*, 1996.
- [Hoc 2001] Hoc J.-M., "Towards a cognitive approach to Human-machine cooperation in dynamic situations". *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 54, pp. 509-540, 2001.
- [Hoc 2005] Hoc J.-M., "Cooperation Between Human Cognition and Technology in Dynamic Situations". In Sternberg R.J. et Preiss D. (Eds.), *Intelligence and technology : the impact of tools on the nature and development of human abilities*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, pp.135-157, 2005.
- [Hoc et Debernard 2002] Hoc J.-M. et Debernard S., "Respective Demands of Task and Function Allocation on Human-Machine Cooperation Design : a Psychological Approach". In *Connection Science*, Vol. 14, N°4, pp. 283-295, 2002.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Holling 1973] Holling C.S., "Resilience and stability of ecological systems". Annual Review of Ecology and Systematics, Vol. 4, pp. 1-23, 1973.
- [Holling 1996] Holling C.S., "Engineering resilience versus ecological resilience". In PC. Schulze (Ed.) Engineering within ecological constraints, National academy Press, Washington, DC, pp. 31-43, 1996.
- [Hollnagel 1993] Hollnagel E. "Human Reliability Analysis : Context and Control". London. Academic Press Inc, 1993.
- [Hollnagel 1999] Hollnagel E., "Accidents and barriers". 7th European Conference on Cognitive Science Approaches to Process Control, pp. 175-180, Villeneuve d'Ascq, France.
- [Hollnagel 2002] Hollnagel E., "Cognition as control: a pragmatic approach to the modelling of joint cognitive Systems". Invited contribution to a special Issue of IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics (non publié), 2002.
- [Hollnagel 2004] Hollnagel E., "Barriers and Accident Prevention". Aldershot, UK: Ashgate, 2004.
- [Hollnagel 2006] Hollnagel E., "Achieving system safety by resilience engineering". 1st Institution of Engineering and Technology International Conference on System Safety, June, 2006.
- [Hollnagel et Woods 1999] Hollnagel E., Woods D.D., Cognitive systems engineering: New wine in new bottles, International Journal of Human-Computer Studies, Vol. 51, N° 2, pp. 339-356(18), August 1999.
- [Hollnagel et Woods 2005] Hollnagel E. et Woods D.D. "Joint Cognitive Systems: Foundations of Cognitive Systems Engineering". CRC Press / Taylor & Francis, 2005.
- [Hollnagel et Woods 2006] Hollnagel E. et Woods D.D., "Epilogue: Resilience engineering precepts". In E. Hollnagel, D.D. Woods, N. Leveson (Eds.) "Resilience Engineering: Concepts and Precepts". Ashgate, 2006.
- [Hoppenot et Colle 2002] Hoppenot P., Colle E., "Mobile robot command by man-machine co-operation - Application to disabled and elderly people assistance". Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 34, n°3, pp. 235-252, 2002.
- [Huang *et al.* 2004] Huang H., Messina E., Wade R., English R., Novak B., Albus J., "Autonomy measures for robots". Proceedings of IMECE: International Mechanical Engineering Congress, November 13-19, 2004.
- [Inagaki 2003] Inagaki T., "Adaptive Automation: Sharing and Trading of Control" in E. Hollnagel (Ed.), *Handbook of Cognitive Task Design*. (pp. 147-169), Lawrence Erlbaum Associates. Mahwah, NJ, 2003.
- [Inagaki *et al.* 1998] Inagaki T., Moray N. et Itoh M., "Trust self-confidence and authority in human-machine systems". In *Proceedings of IFAC Human-Machine Systems*, pp. 431-436, 1998.
- [Jen 2003] Jen E., "Stable or robust? What's the difference?". Complexity, Vol. 8, N° 3, pp.12-18, 2003.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Jennings *et al.* 1998] Jennings N.R., Sycara K., Wooldridge M. "A roadmap of agent research and development". *Autonomous Agents and multi-agent systems*, Vol. 1, pp.7-38, 1998.
- [Kamsickas et Ward 2003] Kamsickas G. M., Ward J. N., "Developing UGVs for the FCS program". *Proceedings of the SPIE AeroSense, Unmanned Ground Vehicle Technology*, Orlando, FL, USA, April 2003.
- [Konak et Bartolacci 2007] Konak A. et Bartolacci M.R., "Designing survivable resilient networks : a stochastic hybrid genetic algorithm approach". *Omega* (35), pp. 645 - 658, 2007.
- [Kortenkamp *et al.* 1997] Kortenkamp D., Bonasso R. P., Ryan D., Schreckenghost D., "Traded control with autonomous robots as mixed initiative interaction". *Proceedings of the 14th National Conference on Artificial Intelligence*, Rhode Island, USA, July 1997.
- [Kortenkamp *et al.* 1998] Kortenkamp D., Schreckenghost D., Bonasso R. P. "Three NASA Application Domains for Integrated Planning, Scheduling and Execution". *IEEE Symposium on Intelligence in Automation and Robotics*, 1998.
- [Laprie *et al.* 1995] Ouvrage collectif, sous la direction de Laprie J.-C., *Guide de la sûreté de fonctionnement*, Editions Cépaduès, 1995.
- [Lemoine 1998] Lemoine M.-P., "Coopération Hommes-machines dans les procédés complexes : modèles techniques et cognitifs pour le contrôle du trafic aérien". Thèse de doctorat de l'université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 1998.
- [Luczak *et al.* 2003] Luczak H., Mühlfelder M., Schmidt L., "Group Task Analysis and Design of Computer-Supported Cooperative Work" in E. Hollnagel (Ed.), *Handbook of Cognitive Task Design*. (pp. 147-169), Lawrence Erlbaum Associates. Mahwah, NJ, 2003.
- [Ludwig *et al.* 1997] Ludwig D., Walker B., Holling C.S., "Sustainability, stability and resilience. *Conservation Ecology*, Vol. 1, n°1, Art.7, 1997.
- [Lundberg et Johansson 2006] Lundberg J. et Johansson B., "Resilience, stability and requisite interpretation in accident investigations". In E. Hollnagel et E. Rigaud (Eds.), *Proceedings of the Second Resilience Engineering Symposium*, Antibes Juan-les-Pins, France, 8-10 novembre, 2006.
- [Lundberg et Johansson 2007] Lundberg J. et Johansson B., "Pragmatic Resilience". In *Proceedings of the Resilience Engineering Workshop*, 25-27 June, Vadstena, Sweden, 2007.
- [Luo et Yang 2002] Luo M.Y et Yang C.S. "Enabling fault resilience for web services", *Computer Communications*, Vol. 25, pp. 198-209, 2002.
- [Luzeaux 2008] Luzeaux D. « Systèmes de systèmes : du concept à la réalisation effective ». D. Luzeaux, J.-R. Ruault (sous la direction de), *Systèmes de systèmes : concepts et illustrations pratiques*. Lavoisier, Paris, 2008.
- [Martin 2005] Martin S. "La résilience dans les modèles de systèmes écologiques et sociaux". Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 17 juin 2005.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [McDonald 2006] McDonald N., "Organisational Resilience and Industrial Risk". In E. Hollnagel, D.D. Woods, N. Leveson (Eds.) *Resilience Engineering concepts and Precepts* (pp.155-180), Ashgate, 2006.
- [McGovern 1990] McGovern D.E., "Experience and results in teleoperation of land vehicles". In *Pictorial communication in virtual and real environments* (2nd edition), pp.182-195, Taylor & Francis Inc., 1993.
- [Michon 1985] Michon J.A. "A critical view of driver behaviour modes: what do we know, what should we do? In Evans L. & Schwing R.C. (Eds.) *Human Behaviour and Traffic Safety*. Plenum Press, New York, 1985.
- [Micouin 2008] Micouin P., « Emergence et complexité des systèmes de systèmes ». D. Luzeaux, J.-R. Ruault (sous la direction de), *Systèmes de systèmes : concepts et illustrations pratiques*. Lavoisier, Paris, 2008.
- [Millot 1988] Millot P., "Supervision des procédés automatisés et ergonomie". Hermès, Paris, 1988.
- [Millot 1998] Millot P., "Concepts and limits for Human-Machine cooperation". In IEEE SMC - CESA'98 "Computational Engineering in Systems Applications", Hammamet, April 1-4, Tunisia, 1998.
- [Millot 1999] Millot P., "Systèmes Homme-Machine et Automatique". Conférence plénière invitée aux Journées Doctorales de l'Automatique JDA'99, Nancy - France, pp. 1-24, janvier 1999.
- [Mondada *et al.* 2005] Mondada F., Gambardella L.M., Floreano D., Nolfi S., Deneubourg J.-L., Dorigo M. "The cooperation of Swarm-Bots". *IEEE Robotics and Automation Magazine*, pp.21-28, June 2005.
- [Morel 2007] Morel G., « Sécurité et résilience dans les activités peu sûres : exemple de la pêche maritime ». Thèse de doctorat de l'Université de Bretagne Sud, 10 novembre 2007.
- [Morfopoulos *et al.* 2004] Morfopoulos A., Mc Henry M., Mathies L., "Reduction of user interaction by autonomy". *PerMIS'04 - Performance Metrics for Intelligent Systems*, Gaithersburg, MD, 2004.
- [Nait-Chabane *et al.* 2009] Nait-Chabane K., Delarue S., Hoppenot P. et Colle E., "Strategy of Approach for Seizure of An Assistive Mobile Manipulator" – *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 57, pp 222-235, 2009.
- [Nau *et al.* 2003] Nau D. S., Au T. C., Ilghami O., Kuter U., Murdock J. W., Wu D., Yaman F. *SHOP2: An HTN Planning System*, Volume 20, pp. 379-404, 2003.
- [Norman 1990] Norman, D.A., "The "problem" of automation: Inappropriate feedback and interaction, not "over-automation"". In D.E. Broadbent, A. Baddeley & J. T. Reason (Eds.), *Human factors in hazardous situations* (pp. 585-593). Oxford: Oxford University Press, 1990.
- [Olsen et Goodrich 2003] Olsen D. R., Goodrich M. A., "Metrics for evaluating Human-Robot interactions". *PerMIS'03 - Performance Metrics for Intelligent Systems*, September 16-18, Gaithersburg, MD, 2003.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Orwin et Wardle 2004] Orwin K.H., Wardle D.A., "New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances". *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 36, pp. 1907-1912, 2004.
- [Pacaux-Lemoine et Debernard 2002] Pacaux-Lemoine M.-P., Debernard S. "Common work space for human-machine cooperation in air traffic control". *Control Engineering Practice*, Vol. 10, N° 5, pp. 571-576(6), May 2002.
- [Paletta *et al.* 2007] Paletta L., Fritz G., Kintzler F., Irran J., Dorffner G. Perception and Developmental Learning of Affordances in Autonomous Robots. In *Proceedings of the 30th Annual German Conference on Advances in Artificial Intelligence*, September 10-13, Osnabrück, Germany. In J. Hertzberg, M. Beetz, and R. Englert, (Eds.) *Lecture Notes In Artificial Intelligence*, Vol. 4667, pp. 235-250, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [Parasuraman *et al.* 2000] Parasuraman R., Sheridan T. B., Wickens C. D., "A model for types and levels of human interaction with automation". *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part A : Systems and Humans*, Vol. 30, N° 3, May 2000.
- [Pariès 2006] Pariès J., "Complexity, Emergence, Resilience...". In E. Hollnagel, D.D. Woods, N. Leveson (Eds.) "Resilience Engineering: Concepts and Precepts", Ashgate, 2006.
- [Pérez-España et Arreguín-Sánchez 2001] Pérez-España H. et Arreguín-Sánchez, "An inverse relationship between stability and maturity in models of aquatic ecosystems". *Ecological modelling*, Vol. 45, pp. 189-196, 2001.
- [Perzanowski *et al.* 2002] Perzanowski D., Schultz A., Adams W., Bugajska M., Abramson M., MacMahon M., Atrash A., Coblenz M. "Excuse me, Where's the Registration Desk?" : Report on Integrating Systems for the Robot Challenge AAAI 2002. In *Proceedings of the AAAI Fall Symposium on Human-Robot Interaction*, pp. 63–72, November 2002.
- [Polet 2002] Polet P., "Modélisation des franchissements de barrières pour l'analyse des risques des systèmes Homme-machine". Mémoire de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, France, décembre, 2002.
- [Polet *et al.* 2001] Polet P., Vanderhaegen F., Millot P., Wieringa P. (2001). "Barriers and risk analysis". *8th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis Design and Evaluation of Human Machine Systems*, Kassel, Allemagne, pp. 321-326, septembre 2001.
- [Polet *et al.* 2002] Polet P., Vanderhaegen F., Wieringa P. "Theory of safety related violation of system barriers". *Cognition, Technology and Work*, Vol. 4, n° 3, pp. 171-179, 2002.
- [Polet *et al.* 2004] Polet P., Vanderhaegen F., Millot P., "Analysis of intentional human deviated behaviour: an experimental study". *Proceedings of the IEEE SMC international conference*, The Hague, The Netherlands, octobre, 2004.
- [Proud *et al.* 2003] Proud R. W., Hart J. J., Mrozinski R. B., "Methods for determining the level of autonomy to design into a human spaceflight vehicle: A function specific approach". *PerMIS'03 - Performance Metrics for Intelligent Systems*, September 16-18, Gaithersburg, MD, 2003.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Rasmussen 1983] Rasmussen J. "Skills, rules, and knowledge: Signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-13(3): pp. 257-266, 1983.
- [Reason 1990] Reason J., "Human error". Cambridge University Press, New York, 1990.
- [Rosenblatt 1997] Rosenblatt J. "DAMN: A Distributed Architecture for Mobile Navigation (*Ph.D. dissertation*)", Carnegie Mellon University Robotics Institute Technical Report CMU-RI-TR-97-01, Pittsburgh, PA, 1997.
- [Ruault 2008] Ruault J.-R., "La place de l'humain dans le contexte des systèmes de systèmes". D. Luzeaux, J.-R. Ruault (sous la direction de), *Systèmes de systèmes : concepts et illustrations pratiques*. Lavoisier, Paris, 2008.
- [Saaty 2000] Saaty T.L., "Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process". RWS Publications, 4922 Ellsworth Avenue, Pittsburgh, PA 15413, 2000.
- [Saaty 2008] Saaty T.L., "Decision making with the analytic hierarchy process". *International Journal of Services Sciences*, Vol. 1, N°. 1, pp. 83-98, 2008.
- [Sahin *et al.* 2006] Sahin E., Cakmak M., Dogar M. R., Ugur E. and Uçoluk G. (2006): To afford or not to afford: A new formalization of affordances towards affordance-based robot control. Technical Report: Middle East Technical University, Ankara, METU-CENG-TR-2006-02.
- [Sarter *et al.* 1997] Sarter N.B., Woods D.D., Billings C.E., "Automation surprises". In Salvendy G. (Ed.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics - 2nd Edition*, Wiley, 1997.
- [Schmidt 1991] Schmidt K., "Cooperative Work : A Conceptual Framework" in Rasmussen J., Brehmer B. and Leplat J. (Eds), *Distributed Decision Making : Cognitive Models for Cooperative Work*, (pp 75-110), John Wiley & Sons Ltd, 1991.
- [Scholtz 2003] Scholtz J., "Theory and evaluation of human robot interaction". *Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2003.
- [Sellner *et al.* 2006] Sellner B. P., Hiatt L. M., Simmons R., Singh S., "Attaining situational awareness for sliding autonomy". *Proceedings of HRI'06*, March 2-4, Salt Lake City, Utah, USA, 2006.
- [Sheridan 1992] Sheridan T. B., "Telerobotics, Automation and Human Supervisory Control". MIT Press, Cambridge, MA, 1992.
- [Sheridan 1999] Sheridan T.B., "Human supervisory control". In *Handbook of systems engineering and management*, pp. 591-628, John Wiley & Sons, 1999.
- [Sheridan 2000] Sheridan T. B., "Function allocation: algorithm, alchemy or apostasy". *International Journal of Human-Computer Studies*, N°52, pp. 203-216, 2000.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Simmons 1994] Simmons R. G., "Structured control for autonomous robots". IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.10, N° 1, February 1994.
- [Sperandio 1988] Sperandio J.-C., Ergonomie du travail mental, Editions Masson, Paris, 1988.
- [Steedman 2002] Steedman M., "Plans, affordances and combinatory grammar". In Linguistics and Philosophy, Vol. 25, N° 5-6, pp. 723-753, 2002.
- [Steels 1995] Steels L., "When are robots intelligent autonomous agents ?" in Robotics and Autonomous Systems, Volume 15, Number 1, pp. 3-9, July, 1995.
- [Stoffregen 2003] Stoffregen T.A., "Affordances as properties of the animal environment system". Ecological Psychology, 15(2), pp. 115-134, 2003.
- [Stoytchev 2005] Stoytchev A., "Behavior-Grounded Representation of Tool Affordances". In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3060 – 3065, 2005.
- [Sundström et Hollnagel 2006] Sundström G. et Hollnagel E., "Learning how to create resilience in business systems". In E. Hollnagel, D.D. Woods, N. Leveson (Eds.) "Resilience Engineering: Concepts and Precepts", Ashgate, 2006.
- [Tijou *et al.* 2007] Tijou A., Richard P., Ferrier J.-L., "Effect of olfaction on memory and the sense of presence in virtual environments". 10th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, Seoul, Korea, 4-6 septembre, 2007.
- [TOSA/RMU – 2007, 063] TOSA/RMU – 2007, 063. Rapport de contrat de recherche du projet TAROT, "Rapport d'étude sur les modes de contrôle du système robotisé", THALES Optronique SA, Guyancourt, F., Avril 2007.
- [TOSA/RMU – 2007, 158] TOSA/RMU – 2007, 158. Rapport de contrat de recherche du projet TAROT, « TAROT: Validation des modes d'autonomie ajustable par la méthode du Magicien d'Oz », THALES Optronique SA, Guyancourt, F., juillet 2007.
- [Turvey 1992] Turvey M. "Affordances and Prospective Control : An outline of the ontology". In Ecological Psychology, Vol. 4, pp. 173-187, 1992.
- [Valancogne et Nicolet 2002] Valancogne J., Nicolet J.-L., "Defence-in-depth : a new systematic and global approach in socio-technical system design to better guarantee the timelessness safety in operation". In proceedings of λμ 13 / Esrel, Lyon, France, pp.298-305, 2002.
- [Vanderhaegen 1993] Vanderhaegen F., "Coopération homme-machine multiniveau entre une équipe d'opérateurs humains et des outils d'assistance – Application au contrôle du trafic aérien". Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 21 décembre 1993.
- [Vanderhaegen 1999] Vanderhaegen F., "Cooperative system organisation and task allocation: illustration of task allocation in air traffic control". Le Travail Humain, tome 62, N°3, pp.197-222, 1999.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Vanderhaegen 2003] Vanderhaegen F., "Analyse et contrôle de l'erreur humaine". Hermès, Paris, France, 2003.
- [Vanderhaegen *et al.* 2009] Vanderhaegen F., Polet P., Zieba S. "A reinforced iterative formalism to learn from human errors and uncertainty". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 22, Issues 4-5, Juin 2009, pp. 654-659, ISSN 0952-1976.
- [Villemeur 1988] Villemeur A., *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*, Collection de la direction des études et recherches d'EDF, Eyrolles, 1988.
- [Volpe 2001] Volpe R., Nesnas I., Estlin T., Mutz D., Petras R., Das H. in *Proceedings of the 2001 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, Montana, March, 2001.
- [Wang *et al.* 2001] Wang Y., Doherty J.F., Van Dyck R.E., "A rotation, scaling and translation resilient image watermarking algorithm using circular Gaussian filters". *Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*, Baltimore, MD, June, 2001.
- [Werner 1992] Werner E.E., "The children of Kauai: Resiliency and recovery in adolescence and adulthood". *Journal of Adolescent Health*, Vol. 13, N° 4, pp. 262-268, 1992.
- [Westrum 2006] Westrum R., "A typology of resilience situations". In E. Hollnagel, D.D. Woods, N. Leveson (Eds.) "Resilience Engineering: Concepts and Precepts", Ashgate, 2006.
- [Woods 2006] Woods D.D., "Essential characteristics of resilience". In E. Hollnagel, D.D. Woods, N. Leveson (Eds.) "Resilience Engineering: Concepts and Precepts", Ashgate, 2006.
- [Woods et Hollnagel 2006] Woods D.D. et Hollnagel E., "Prologue: Resilience engineering concepts". In E. Hollnagel, D.D. Woods, N. Leveson (Eds.) "Resilience Engineering: Concepts and Precepts", Ashgate, 2006.
- [Wreathall 2006] Wreathall J., "Properties of resilient organizations: an initial view". In E. Hollnagel, D.D. Woods, N. Leveson (Eds.) "Resilience Engineering: Concepts and Precepts", Ashgate, 2006.
- [Zaff 1995] Zaff B., "Designing with Affordances in Mind". In Flack J., Hancock P., Caird J., Vicente K. (Eds.) *Global Perspectives on the Ecology of Human-Machine Systems (volume 1)*, pp. 121-156, Hillsdale, New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates, 1995.
- [Zeigler 1990] Zeigler B.P. "High autonomy systems: concepts and models." *AI, Simulation, and Planning in High Autonomy Systems*, Proceedings, 26-27 March, 1990.
- [Zieba *et al.* 2007a] Zieba S., Polet P., Jouglet D., Vanderhaegen F. "Resilience and affordances: Perspectives for human-robot cooperation?". 26th European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control, Lyngby, Danemark, juin 2007.
- [Zieba *et al.* 2007b] Zieba S., Polet P., Jouglet D., Vanderhaegen F. "Vers un contrôle coopératif homme-robot pour une autonomie ajustable". 2èmes Journées Doctorales MACS, Reims, France, juillet 2007.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Zieba *et al.* 2007c] Zieba S., Polet P., Jouglet D., Vanderhaegen F. "Towards a human-robot collaborative control for an adjustable autonomy". 10th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis Design and Evaluation of Human Machine Systems, Seoul, Corée, septembre 2007.
- [Zieba *et al.* 2008] Zieba S., Polet P., Vanderhaegen F., Enjalbert S. "Autonomie ajustable et résilience pour une coopération Homme-Robot". Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Bucarest, Roumanie, septembre 2008.
- [Zieba *et al.* 2009] Zieba S., Polet P., Vanderhaegen F., Debernard S. "Resilience of a human-robot system using adjustable autonomy and Human-robot collaborative control". International Journal of Adaptive and Innovative Systems, Vol. 1, N° 1, 2009.
- [Zolesio 2008] Zolesio J.-L., "Protection des infrastructures critiques". D. Luzeaux, J.-R. Ruault (sous la direction de), Systèmes de systèmes : concepts et illustrations pratiques. Lavoisier, Paris, 2008.

Résumé

Les travaux de cette thèse portent sur la définition d'un mode d'interaction Homme-machine plaçant l'opérateur humain et le robot au même niveau décisionnel et sa contribution à la résilience du système par une gestion de l'autonomie ajustable. La résilience est la propriété d'un système à retrouver ou à maintenir un état stable permettant la continuité du fonctionnement du système malgré la présence de perturbations. Une définition de l'autonomie est proposée, qui distingue les aspects sémantiques (compétences, capacités et prescriptions) pour trois niveaux d'activité (réalisation d'une tâche, sélection d'une alternative de réalisation, définition d'un plan d'action). Le formalisme associé à cette définition permet de modéliser les conditions d'application des formes de coopération Homme-machine (augmentative, intégrative et confrontative). Les travaux se focalisent ensuite sur la modélisation des niveaux d'activité par la mise en œuvre d'algorithmes de prise de décision et de planification basés sur des méthodes hiérarchiques. Celles-ci permettent la décomposition des tâches à réaliser et l'affectation des agents aux sous-tâches selon les critères de résilience suivants : efficacité, adaptabilité, fonctionnement aux limites, interactions. Le modèle de contrôle coopératif proposé est évalué par un protocole expérimental mené sur un micro-monde qui a été développé à cet effet. L'analyse des résultats consiste à évaluer la résilience des solutions proposées pour la gestion des perturbations et leur acceptation par l'opérateur humain. Le modèle proposé est validé de même que les critères de résilience qui sont correctement perçus et évalués par les opérateurs.

Mots clés : coopération Homme-machine, résilience, autonomie ajustable, contrôle coopératif

Abstract

These research works concern the definition of a mode of human-machine interaction placing the human operator and the robot at the same decisional level and its contribution to the resilience of the system by the management of the adjustable autonomy. Resilience is the property of a system to recover or maintain a stable state continuous operation of the system despite the occurrence of disturbances. A definition of autonomy is proposed, which distinguishes semantic aspects (skills, capacities and prescriptions) for three levels of activity (achievement of a task, selection of an alternative, definition of an action plan). The formalism associated with this definition allows modelling the conditions for applying the forms of human-machine cooperation (augmentative, integrative and debative). Work then focus on the modelling of activity levels through the implementation of algorithms of decision making and planning methods based on hierarchical methods. These allow the decomposition of tasks and assigning agents to subtasks according to the criteria of resilience following: efficiency, adaptability, border-line functioning, interactions. The proposed model of cooperative control is assessed by an experimental protocol carried out on a micro-world that has been developed for this purpose. The analysis of results leads to an assessment of the resilience of the proposed solutions for the management of disruptions and their acceptance by the human operator. The proposed model is validated as well as the criteria for resilience that are properly perceived and assessed by the operators.

Keywords : human-machine cooperation, resilience, adjustable autonomy, cooperative control

