HAL open science

Autonomie ajustable et résilience pour une coopération Homme – Robot

Stéphane Zieba, Philippe Polet, Frédéric Vanderhaegen, Simon Enjalbert

To cite this version:

Stéphane Zieba, Philippe Polet, Frédéric Vanderhaegen, Simon Enjalbert. Autonomie ajustable et résilience pour une coopération Homme – Robot. CIFA 2008 (Conference Internationale Francophone d'Automatique), Sep 2008, Bucarest, Roumanie. hal-03644426

HAL Id: hal-03644426

https://uphf.hal.science/hal-03644426

Submitted on 20 Apr 2022

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.

Autonomie ajustable et résilience pour une coopération Homme – Robot

STEPHANE ZIEBA [1], PHILIPPE POLET [1], FREDERIC VANDERHAEGEN [1], SIMON ENJALBERT [1]

[1] Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines
Université de Valenciennes et du Hainaut - Cambrésis, Le Mont Houy, 59313 Valenciennes Cedex 9, France

{stephane.zieba,philippe.polet,frederic.vanderhaegen,simon.enjalbert}@univ-valenciennes.fr

Résumé – Cet article propose un cadre théorique pour la résilience d'un système coopératif Homme-Robot doté de principes d'autonomie ajustable. L'autonomie ajustable est présentée comme une application possible de la résilience à un système Homme-Machine et gère les transitions entre différents modes d'autonomie mettant en œuvre des mécanismes de coopération Homme-Machine. L'approche présentée dans cet article propose une formalisation de l'autonomie et des conditions nécessaires à l'application des formes de coopération. Une illustration de ce cadre théorique est ensuite proposée en prenant comme contexte celui de la robotique mobile terrestre. Les perspectives de ce formalisme portent sur l'évaluation de la résilience d'un système Homme-Machine.

Mots-clés – résilience, autonomie ajustable, coopération homme-robot

I. INTRODUCTION

Les systèmes Homme-Robot sont amenés à accomplir des tâches de plus en plus complexes et diverses. Dans le domaine de la robotique mobile terrestre, l'un des problèmes majeurs est de trouver un compromis efficace entre un système téléopéré et un système totalement autonome. En effet, pour un système téléopéré d'une part, les performances sont conditionnées par la communication des informations. Pour un système totalement autonome d'autre part, l'évolution d'un robot mobile en environnement extérieur amène de nombreuses situations imprévues ne pouvant toutes être solutionnées par des algorithmes autonomes. Le compromis retenu consiste à élaborer un système doté de plusieurs modes d'autonomie et capable de sélectionner le mode le plus adapté à la situation courante. Le système, composé de l'opérateur humain et de la plate-forme robotique doit alors être capable d'anticiper une situation dangereuse, de réagir à l'occurrence d'une telle situation en maintenant un niveau de performances suffisant. La notion d'autonomie ajustable est alors liée au concept de résilience, soit la propriété d'un système à retrouver ou à maintenir un état stable en présence de perturbations.

L'article est structuré en cinq sections. La section II présente le concept de résilience et son application à différents domaines ainsi que différents indicateurs utilisés pour son évaluation. La section III introduit l'autonomie ajustable comme une contribution possible à la résilience d'un système Homme-robot. Dans cette section, une approche de l'autonomie est proposée ainsi que la définition de quatre modes d'autonomie, de la téléopération à un mode autonome, ainsi que des modes intermédiaires faisant intervenir l'opérateur humain et le robot. Ces modes d'autonomie nécessitent la mise en place d'une coopération Homme-Machine dont les principes sont présentés dans la section IV ainsi qu'un mode d'interaction plaçant l'opérateur humain et le robot au même niveau décisionnel : le contrôle coopératif Homme-Robot. La section V détaille le cadre théorique proposé dans cet article et définit ainsi de façon formelle la définition proposée pour l'autonomie du système Homme-Robot et les conditions nécessaires à l'application des différentes formes de coopération Homme-Machine. Une illustration de ce formalisme est ensuite présentée dans le cadre de la robotique mobile terrestre. Les perspectives de ce formalisme portent sur une évaluation objective de la résilience du système Homme-Robot.

II. RESILIENCE

A. *Définitions*

1. Application aux systèmes écologiques

Dans le domaine de l'écologie, deux définitions de la résilience sont généralement retenues et proposent des mesures de la résilience essentiellement appliquées aux écosystèmes.

La première définit la résilience comme la capacité d'un système à intégrer dans son fonctionnement des perturbations de telle sorte que son intégrité soit maintenue [1]. Cette première approche est nommée *ecological resilience* et peut être évaluée en fonction de la quantité de perturbation pouvant être absorbée par le système avant un changement d'état [1].

La seconde définition est relative au temps mis par le système pour retrouver un état d'équilibre après une perturbation et définie par le terme *engineering resilience* [2].

2. Application aux systèmes organisationnels

Ce concept s'applique également à des systèmes organisationnels ou des systèmes socio-techniques complexes comme les systèmes ferroviaires [3] ou les systèmes économiques [4]. De faibles performances ou un dysfonctionnement de tels systèmes peuvent s'expliquer par un manque de résilience. La résilience aux fautes est également une notion importante dans la fiabilité des réseaux électriques ou informatiques [5].

Dans le cadre des systèmes organisationnels, plusieurs caractéristiques d'un système résilient peuvent être retenues [6]:

- la quantité de perturbations que le système peut absorber sans se reconfigurer (*buffering capacity*),
- la flexibilité du système (*flexibility*) par opposition à sa rigidité (*stiffness*),
- la gestion des limites de fonctionnement du système (*margin*),
- le comportement aux limites de fonctionnement du système (*tolerance*),
- les interactions croisées entre les différents niveaux de l'architecture (*cross-scale interactions*).

E. Hollnagel introduit la notion d'organisation proactive (Figure 1) dans laquelle le système analyse constamment son état afin de déterminer s'il est capable de réagir à un

événement imprévu. Le système est de plus doté de capacités d'apprentissage face à cette réaction [7].

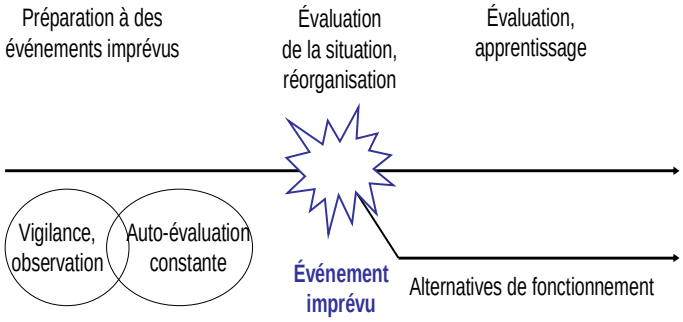

Figure 1. Organisation proactive (d'après E. Hollnagel, [7]).

La section suivante présente des définitions du concept de résilience pouvant être appliquées aux systèmes Homme-Machine.

3. Application aux systèmes Homme-Machine

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 [8]. 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 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 [9].

Les définitions de la résilience appliquées aux systèmes organisationnels laissent apparaître un manque de mesures objectives permettant l'évaluation de la résilience d'un système. Dans le domaine de l'écologie, différentes approches présentées dans la section suivante ont été mises en place afin d'évaluer la résilience d'un écosystème.

B. Mesures de la résilience d'un système

De nombreuses métriques existent dans le domaine de l'écologie afin d'évaluer la résilience d'un écosystème. Ces métriques sont liées à la notion de stabilité écologique. Ces métriques sont des applications directes des définitions présentées précédemment, à savoir le temps de récupération d'un système à un état d'équilibre et l'intensité nécessaire d'une perturbation pour faire changer le système d'état [2].

A partir de ces définitions, la résilience peut être définie en fonction de la stabilité écologique, de la persistance et de la résistance [10, 11]. Dans la théorie de la viabilité, la résilience est définie comme l'inverse du coût de la restauration d'une propriété du système à la suite d'une perturbation [12].

La résilience exprime donc la capacité du système à empêcher l'occurrence d'une défaillance, à empêcher la propagation des conséquences de l'occurrence d'une défaillance et à récupérer de l'occurrence d'une défaillance. De nombreuses métriques existent dans le domaine de l'écologie afin d'évaluer la résilience. Dans les systèmes organisationnels, la résilience exprime une propriété du système et se place comme un guide de conception et d'analyse de fonctionnement. Dans la perspective des systèmes Homme-Machine, l'approche doit combiner à la fois des critères objectifs permettant l'évaluation de la résilience et des caractéristiques guidant la conception du système composé de l'opérateur humain et du robot. La résilience du système dépend alors de la fiabilité des deux agents et de leur faculté à récupérer non seulement leurs propres erreurs mais également celles de l'autre.

Dans un tel système, l'autonomie ajustable peut être un moyen pour améliorer sa résilience.

III. AUTONOMIE AJUSTABLE

A. Proposition d'une définition de l'autonomie

On peut définir une approche de l'autonomie basée sur l'expression des compétences, des capacités du robot et des prescriptions qui lui sont accordées. 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. Les capacités sont susceptibles d'évoluer au cours du temps et représentent la possibilité pour un agent de mettre en œuvre une compétence donnée au cours de la mission. Elles sont soumises à des aléas comme la charge de travail de l'agent décideur (l'opérateur humain ou le robot), les ressources disponibles ou les domaines de fonctionnement des différents algorithmes. Les prescriptions définissent l'ensemble des actions et des décisions que le robot est autorisé ou non à accomplir.

Pour ces trois axes, on distingue trois catégories d'activité : la réalisation d'une tâche, la sélection d'une alternative de résolution de la tâche appropriée au contexte pour atteindre un but fixé et l'identification et la gestion des contraintes associées au but fixé.

B. Définition de l'autonomie ajustable

L'autonomie ajustable peut être définie comme 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 [13]. Dans cette définition, le système autonome représente pour nous le robot mobile terrestre, composé de plusieurs comportements sensorimoteurs (fonctions de suivi d'objets fixes ou mobiles par exemple). L'autre système mentionné pouvant ajuster le niveau d'autonomie peut être assimilé à un agent superviseur gérant la répartition des tâches entre la plate-forme robotique et l'opérateur humain. En fonction des choix de développement et de l'architecture choisie, cet agent superviseur peut être déporté sur l'unité de commande distante du robot ou être intégré au robot lui-même.

L'autonomie ajustable permet de mettre en œuvre des mécanismes de transition entre différents modes d'autonomie, situés entre la téléopération et l'autonomie complète. Quatre modes d'autonomie ont ainsi été définis en se fondant sur le modèle de Parasuraman qui décompose l'activité de l'opérateur humain en quatre catégories : l'acquisition d'informations, l'analyse d'informations, la prise de décision et l'implémentation de l'action [14].

Ces quatre modes, numérotés de 0 à 3, ont été définis en fonction d'une répartition des tâches entre l'opérateur humain et le robot autour de la prise de décision comme catégorie principale [15]. Le mode 0 est proche de la téléopération et l'opérateur humain est en charge de toutes les actions. Dans les modes 0 et 1, l'opérateur humain est seul habilité à prendre des décisions. Dans le mode 2, le robot peut proposer des alternatives appropriées au contexte que l'opérateur peut accepter ou refuser. Dans le cas d'un refus, l'opérateur peut

expliquer les raisons du refus et proposer une solution au robot. Dans le mode 3, le robot décide des actions qu'il exécute sans en référer explicitement à l'opérateur humain.

Ces modes d'autonomie intermédiaires impliquent une interaction entre l'opérateur humain et le robot. Cette interaction peut avoir pour but de récupérer les erreurs des deux agents et répartir les tâches en fonction de leur fiabilité afin de rendre le système plus résilient. Cette interaction se traduira par la mise en place d'une coopération Homme-Machine.

IV. COOPERATION HOMME-MACHINE

A. Définition de la coopération

Deux agents sont en situation de coopération aux deux conditions suivantes [16]:

- 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.

B. Formes de coopération

K. Schmidt [17] définit trois formes de coopération pouvant être appliquées à la coopération Homme-Machine [18] et permettant d'étudier pourquoi s'effectue la coopération. 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 les capacités des différents agents pour parvenir à une meilleure performance.

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 réalisable par l'agent le plus compétent pour celle-ci.

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.

Ces formes de coopération peuvent être appliquées dans le cadre d'un système Homme-Robot en exploitant la définition proposée pour l'autonomie. Les échanges entre l'opérateur humain et le robot doivent alors être spécifiés au sein d'un mode d'interaction exploitant leurs compétences respectives et posant les bases d'une coopération Homme-Machine.

C. 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 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 [19].

Dans ce modèle de contrôle coopératif, la coopération est limitée à un échange de requêtes et de réponses pré-formatées entre l'opérateur humain et le robot. Ce modèle ne conduit pas à une capitalisation de ces échanges. Or une telle capitalisation permettrait un apprentissage des procédures de résolution afin d'améliorer l'ajustement de l'autonomie.

Le cadre théorique présenté dans la section suivante propose une formalisation de l'autonomie et des conditions nécessaires à l'application des formes de coopération Homme-Machine.

V. PROPOSITION D'UN CADRE THEORIQUE

A. Formalisation de l'autonomie

Afin de définir formellement l'autonomie du système Homme-Robot, nous introduisons les notations suivantes.

Soit $Act = \{\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n\}$ l'ensemble des actions composant les différentes activités du système Homme-Robot : la réalisation d'une tâche, la sélection d'une alternative de réalisation de la tâche appropriée au contexte pour atteindre un but fixé et l'identification et la gestion de contraintes associées au but fixé. Une action α_k peut être considérée comme une action élémentaire ou une succession d'actions entre deux états e_i et e_j tels que $\alpha_k(e_i) = e_j$ avec $\alpha_k \in Act$.

Soit $\theta = \{T_1, T_2, ..., T_m\}$ l'ensemble des tâches réalisables par le système opérateur humain – 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. Un état du système est caractérisé par un vecteur contenant l'instant d'occurrence de l'état et l'état des différents agents composant le système. Une tâche T_{ij} est réalisable si et seulement si $\exists \alpha_k \in Act, \alpha_k(e_i) = e_j$.

Chacune des actions nécessaires à la réalisation d'une tâche est caractérisée par des ressources nécessaires à sa mise en œuvre. Soit $R_X(e_i, e_j) = \{r_1, r_2, ..., r_m\}$ l'ensemble des ressources disponibles pour l'agent X entre un état e_i et un état e_j. Soit $K(\alpha, e_i, e_j)$ les ressources nécessaires à la réalisation de l'action α pour passer de l'état e_i à l'état e_j. On définit alors $R_X(\alpha, e_i, e_j)$ les ressources allouées à l'agent X pour l'action α tel que $R_X(\alpha, e_i, e_j) = K(\alpha, e_i, e_j) \cap R_X(e_i, e_j)$.

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.

Soit $S(X)$ l'ensemble des compétences d'un agent X,

$$S(X) = \{(\alpha, T_{ij}) \in Act \times \theta \mid \exists T_{ij} \in \theta, \alpha \in Act, \alpha(e_i) = e_j\}.$$

On définit le prédicat $s(X, T_{ij})$ soit l'agent X est compétent pour une tâche T_{ij} tel que $s(X, T_{ij}) \leftrightarrow T_{ij} \in S(X)$.

Soit $C(X)$ l'ensemble des capacités d'un agent X,

$$C(X) = \left\{ \begin{array}{l} T_{ij} \in \theta \mid \\ s(X, T_{ij}) \wedge (R_X(\alpha, e_i, e_j) = K(\alpha, e_i, e_j)) \end{array} \right\}$$

On définit le prédicat $c(X, T_{ij})$ soit l'agent X a les capacités pour réaliser la tâche T_{ij} tel que $c(X, T_{ij}) \leftrightarrow T_{ij} \in C(X)$.

La dimension prescriptive de l'autonomie peut être définie relativement à des permissions et des obligations, distinguant des permissions positives (A^+) et négatives (A^-) ainsi que des

obligations positives (O^+) et négatives (O^-) [20]. On définit alors l'ensemble $Pol = \{A^+, A^-, O^+, O^-\}$. Soit *P(X)* l'ensemble des prescriptions d'un agent *X*,

$$P(X) = \{(T_{ij}, pol) \in \theta \times Pol\}.$$

On définit le prédicat $p(X, T_{ij})$ soit *X* est autorisé à accomplir la tâche T_{ij} tel que $p(X, T_{ij}) \leftrightarrow pol(T_{ij}) \in Pol - \{A^-\}$ où $pol(T_{ij})$ donne la prescription associée à la tâche T_{ij}.

On définit alors l'autonomie d'un agent pour réaliser une tâche par le prédicat suivant :

$$A(X, T_{ij}) = s(X, T_{ij}) \wedge c(X, T_{ij}) \wedge p(X, T_{ij}).$$

L'autonomie d'un agent est alors :

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

Une fois ces ensembles définis, on peut s'attacher à la description des catégories d'activité définissant l'autonomie d'un agent, à savoir la réalisation d'une tâche, la sélection d'une alternative appropriée au contexte pour réaliser une tâche afin d'atteindre un but fixé et la gestion des contraintes liées au but à atteindre et nécessitant la réalisation d'une ou plusieurs tâches.

La réalisation d'une tâche consiste à exécuter une action élémentaire en utilisant les ressources disponibles à un instant *t* ou à exécuter chacune des actions composant une action non élémentaire.

La sélection d'une alternative appropriée au contexte consiste pour un agent à sélectionner un chemin entre deux états parmi ceux composant l'ensemble de ses compétences. Un chemin peut être sélectionné en évaluant ses performances attendues et les ressources nécessaires pour son parcours.

La gestion des contraintes liées au but est à rapprocher de la notion de savoir-coopérer [18]. Deux classes d'activités constituent le savoir-coopérer d'un agent : la gestion des interférences entre les buts et la facilitation des buts des autres agents. Dans notre approche de l'autonomie, ces classes d'activité peuvent être intégrées à l'activité d'identification et de gestion des contraintes associées au but. En effet, pour un agent donné, le but en question est celui du système opérateur humain – robot. Les deux classes d'activité du savoir-coopérer d'un agent doivent donc être intégrées dans la représentation de son autonomie et plus précisément dans ses compétences qui sont alors conditionnées par les prescriptions sur la possibilité d'inclure dans son plan d'exécution l'intervention d'un autre agent et par les capacités de mettre en œuvre un tel plan.

Ces trois catégories d'activité nécessitent donc de prendre en compte l'autonomie des différents agents présents au sein du système opérateur humain – robot et la façon dont ils coopèrent pour la réalisation d'une tâche. Les formes de coopération de Schmidt peuvent être exprimées en fonction de ces ensembles.

B. Conditions nécessaires aux formes de coopération

Les définitions proposées posent les conditions nécessaires à l'application des différentes formes de coopération.

La forme de coopération augmentative s'applique lorsque les agents ont des savoir-faire similaires mais mutualisent leurs capacités pour la réalisation de la tâche. Soient $CA(X, Y, T_{ij})$ les conditions nécessaires à la mise en oeuvre de la coopération augmentative entre deux agents *X* et *Y* afin de réaliser une tâche T_{ij} :

$$\begin{pmatrix} (s(X, T_{ij}) \wedge s(Y, T_{ij})) \wedge \\ (R_X(\alpha, e_i, e_j) \cup R_Y(\alpha, e_i, e_j) = K(\alpha, e_i, e_j)) \wedge \\ (p(X, T_{ij}) \wedge p(Y, T_{ij})) \end{pmatrix} \rightarrow CA(X, Y, T_{ij})$$

La forme de coopération intégrative répond à une spécialisation des agents. Ces agents possèdent ainsi des compétences, des capacités ou des prescriptions spécifiques à chacun d'entre eux. Soient $CI(X, Y, T_{ij})$ les conditions nécessaires à la mise en œuvre de la coopération intégrative entre deux agents *X* et *Y* pour une tâche T_{ij} :

$$\begin{pmatrix} \exists T_{ik} \in \theta, T_{kj} \in \theta, T_{ij} = T_{ik} \cup T_{kj}, \\ (s(X, T_{ik}) \wedge s(Y, T_{kj})) \wedge \\ (c(X, T_{ik}) \wedge c(Y, T_{kj})) \wedge \\ (p(X, T_{ik}) \wedge p(Y, T_{kj})) \end{pmatrix} \rightarrow CI(X, Y, T_{ij})$$

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

$$\begin{pmatrix} \exists T_{ik} \in \theta, T_{kj} \in \theta, T_{ij} = T_{ik} \cup T_{kj}, \\ A(X, T_{ik}) \wedge A(Y, T_{kj}) \end{pmatrix} \rightarrow CI(X, Y, T_{ij})$$

La forme de coopération confrontative illustre une situation dans laquelle les agents ont des savoir-faire similaires. Soient $CC(X, Y, T_{ij})$ les conditions nécessaires à la mise en oeuvre de la coopération confrontative entre deux agents *X* et *Y* afin de réaliser une tâche T_{ij} :

$$\begin{pmatrix} \exists \alpha_X \in S(X), \alpha_X(e_i) = e_j, \\ \exists \alpha_Y \in S(Y), \alpha_Y(e_i) = e_j, \\ \alpha_X \neq \alpha_Y, \\ (s(X, T_{ij}) \wedge s(Y, T_{ij})) \wedge \\ (c(X, T_{ij}) \wedge c(Y, T_{ij})) \wedge \\ (p(X, T_{ij}) \wedge p(Y, T_{ij})) \end{pmatrix} \rightarrow CC(X, Y, T_{ij})$$

Les formes de coopération augmentative et intégrative ont pour but de répondre à un manque d'autonomie de la part d'un des agents. Le résultat va donc être un ajustement de l'autonomie de cet agent qui peut prendre différentes formes. En effet, le manque d'autonomie peut concerner les compétences, les capacités ou les prescriptions. Dans une forme de coopération confrontative, les deux agents sont autonomes pour la réalisation de la tâche. Cette forme a pour but de gérer les conflits entre les deux agents et peut être assimilée à un problème de prise de décision. Cette décision peut être la mise en œuvre d'une coopération augmentative ou intégrative.

Les formes de coopération permettent la réalisation d'une tâche en partageant les informations perçues par les agents. Ce partage d'informations vise à modifier l'ensemble de compétences des agents. Une fois les ensembles de compétences modifiés par l'activité de coopération, les capacités des agents sont accrues par l'existence de multiples chemins pour la réalisation d'une tâche. La forme de

coopération confrontative modifiera les prescriptions nécessaires à la réalisation de la tâche résultant de la confrontation.

Le paragraphe suivant présente une illustration du formalisme introduit précédemment en détaillant la mise en œuvre des différentes formes de coopération. Cet exemple prend comme contexte la robotique mobile terrestre et le déplacement d'un robot dans un environnement naturel.

C. Illustration des formes de coopération

1. Présentation du contexte

On considère dans cet exemple deux agents, l'opérateur humain *OH* et le robot *R*. Soit T_{Obs} une tâche consistant à rallier un point d'observation, cette tâche peut être décomposée en deux sous-tâches principales : T_{Acq} l'acquisition d'un point de ralliement et T_{Ral} le suivi de ce point. On a alors $\theta = \{T_{Obs}, T_{Acq}, T_{Ral}\}$. On considère deux états principaux : l'état initial e_i et l'état final e_j tels que $T_{Obs} = (e_i, e_j)$.

2. Formes de coopération et modes d'autonomie

Les formes de coopération applicables peuvent être déterminées en fonction des différents modes d'autonomie qui vont essentiellement modifier l'ensemble des prescriptions. On peut considérer que dans le mode 0, les formes de coopération ne sont pas applicables. En effet, l'opérateur humain est en charge de toutes les actions et le robot est considéré comme un outil sans capacités décisionnelles. Dans le mode 1, la coopération augmentative n'est possible qu'au niveau de la catégorie d'activité correspondant à la réalisation d'une tâche. La coopération intégrative n'est possible qu'à l'initialisation d'une tâche ou d'un comportement sensorimoteur. Dans le mode 2, la coopération intégrative est prépondérante par la sollicitation possible de l'opérateur humain sur une procédure de résolution ou sur une sous-tâche précise. La coopération confrontative n'est a priori possible que dans le mode 3 dans lequel le robot décide des alternatives appropriées sans en référer à l'opérateur humain. La confrontation peut alors porter sur le plan élaboré afin d'accomplir la tâche ou sur une décision.

3. Application d'une coopération augmentative

Cette forme de coopération peut être appliquée à une tâche d'évitement d'obstacles notée T_{Evit}. On suppose que T_{Evit} est une sous-tâche de T_{Obs}. On suppose que l'opérateur humain et le robot ont tous les deux les compétences et les autorisations nécessaires pour la mise en œuvre de cette tâche, soit $s(OH, T_{Evit}) \wedge s(R, T_{Evit})$ et $p(OH, T_{Evit}) \wedge p(R, T_{Evit})$. Par exemple, le robot, en charge de la réalisation de cette tâche, n'a plus les capacités de repérer tous les obstacles à cause d'un environnement très encombré. Une sous-tâche nécessaire à l'évitement d'obstacles, en l'occurrence la détection T_{Detect} n'est donc plus possible pour le robot. On a alors $c(OH, T_{Detect}) \wedge \neg c(R, T_{Detect})$. Les conditions pour cette situation sont alors les suivantes :

$$\left(s(OH, T_{Evit}) \wedge s(R, T_{Evit})\right) \wedge \left(c(OH, T_{Detect}) \wedge \neg c(R, T_{Detect})\right) \wedge \left(p(OH, T_{Evit}) \wedge p(R, T_{Evit})\right).$$

Les conditions précédemment énoncées permettent alors la mise en œuvre de la coopération augmentative. Dans ce cas de figure, cette forme de coopération peut avoir comme résultat l'allocation de la tâche de détection à l'opérateur humain qui dispose du retour vidéo pour assister le robot dans la détection et l'indication des obstacles.

4. Application d'une coopération intégrative

Cette forme de coopération peut dépendre du fonctionnement des algorithmes de déplacement du robot. En effet, pour un suivi d'objet dans le mode 1 par exemple, le robot peut avoir à solliciter l'opérateur humain pour la sous-tâche $T_{Extract}$ d'extraction de l'environnement d'un objet à suivre. Les compétences de l'opérateur humain et du robot sont donc différentes et complémentaires, soit $s(OH, T_{Extract}) \wedge \neg s(R, T_{Extract})$. Soit T_{Traj} une seconde sous-tâche du suivi d'objet pour laquelle le robot est compétent, soit $s(R, T_{Traj})$. Le suivi d'un objet est possible si les deux agents ont les capacités et les autorisations de réaliser les tâches pour lesquelles ils sont chacun compétents, soit $\left(c(OH, T_{Extract}) \wedge c(R, T_{Traj})\right) \wedge \left(p(OH, T_{Extract}) \wedge p(R, T_{Traj})\right)$.

On a alors les conditions permettant la mise en œuvre d'une coopération intégrative :

$$\left(s(OH, T_{Extract}) \wedge \neg s(R, T_{Extract})\right) \wedge \left(c(OH, T_{Extract}) \wedge c(R, T_{Traj})\right) \wedge \left(p(OH, T_{Extract}) \wedge p(R, T_{Traj})\right).$$

Dans cette forme de coopération, l'objet désigné par l'opérateur humain est alors utilisé par le robot.

5. Application d'une coopération confrontative

On prend comme exemple la localisation du robot. Au cours du déplacement, les erreurs de localisation peuvent se cumuler et rendre la position estimée du robot différente de sa position réelle. La confrontation peut alors porter sur la détermination de la position réelle. Les agents disposent des compétences nécessaires pour la tâche de localisation du robot T_{Loc}, d'où $s(OH, T_{Loc}) \wedge s(R, T_{Loc})$. Les deux agents disposent de chemins différents et on note T_{Loc1} et T_{Loc2} les deux alternatives de réalisation de cette tâche. On suppose que le système est dans le mode d'autonomie 3 et que les agents disposent des capacités et des autorisations requises, soit $c(OH, T_{Loc1}) \wedge c(R, T_{Loc2}) \wedge p(OH, T_{Loc1}) \wedge p(R, T_{Loc2})$. Les conditions suivantes permettent alors la mise en œuvre d'une forme de coopération confrontative :

$$s(OH, T_{Loc}) \wedge s(R, T_{Loc}) \wedge c(OH, T_{Loc1}) \wedge c(R, T_{Loc2}) \wedge p(OH, T_{Loc1}) \wedge p(R, T_{Loc2}).$$

Deux solutions sont alors possibles : soit l'opérateur et le robot utilisent les données dont ils disposent (GPS, retour vidéo…) de façon intégrative afin de retrouver la position correcte du robot, soit l'opérateur prend en charge la localisation et modifie alors les prescriptions allouées au robot.

VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'approche proposée dans cet article présente un cadre théorique pour la notion d'autonomie et les formes de coopération Homme – Machine dans un système Homme – Robot. Ce formalisme introduit les notions de compétences, capacités et autorisations pour la définition de l'autonomie. Les conditions nécessaires à l'application des différentes formes de coopération sont spécifiées et établissent ainsi la coopération augmentative et la coopération intégrative comme une réponse à un manque d'autonomie d'un agent au sein du système. La forme de coopération confrontative permet la résolution de conflits entre les agents et la gestion des formes de coopération intégrative et augmentative.

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. Dans un premier temps, on va distinguer des changements de mode d'autonomie et de comportement sensorimoteur. Cette approche de l'autonomie ajustable se rapproche de l'automatisation adaptative. 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 caractérisant l'autonomie, à savoir les compétences, les capacités et les prescriptions.

Dans le cadre d'un système à autonomie ajustable, il est essentiel de se focaliser sur la gestion des transitions. La formalisation des résultats des différentes formes de coopération Homme-robot permettra à terme d'évaluer la résilience du système Homme-Machine en se basant sur des critères objectifs précédemment proposés et sur l'élaboration de métriques évaluant la performance des différents ajustements d'autonomie relatifs aux formes de coopération.

Un premier indicateur de résilience a été proposé : le taux de récupération des erreurs du système Homme – robot [21]. L'évaluation de la résilience d'un système doit être complétée par l'évaluation de ses performances. Cette évaluation doit prendre en compte des critères basés sur les caractéristiques d'un système résilient, à savoir son efficacité, son adaptabilité, sa capacité à fonctionner en présence de perturbations et l'aptitude des différents agents composant ce système à communiquer.

VII. Remerciements

Ces travaux ont été financés par la Délégation Générale pour l'Armement (DGA) et ont été menés au sein de l'équipe Systèmes Homme-Machine du Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines en collaboration avec la société THALES.

VIII. References

[1] C.S. Holling, « Resilience and stability of ecological systems ». Annual Review of Ecology and Systematics, Vol. 4, pp. 1-23, 1973.

[2] C.S. Holling, « Engineering resilience versus ecological resilience ». In P.C. Schulze (Ed.) Engineering within ecological constraints, National Academy Press, Washington, DC, USA, pp. 31-43, 1996.

[3] A. Hale and T. Heijer, « Is resilience really necessary? The case of railways ». In E. Hollnagel, D.D. Woods and N. Leveson (Eds.), Resilience Engineering: Concepts and Precepts, Ashgate, 2006.

[4] G. Sundström and E. Hollnagel, « Learning how to create resilience in business systems ». In E. Hollnagel, D.D. Woods and N. Leveson (Eds.), Resilience Engineering: Concepts and Precepts, Ashgate, 2006.

[5] A. Konak and M.R. Bartolacci, « Designing survivable resilient networks: a stochastic hybrid genetic algorithm approach ». Omega (35), pp. 645 - 658, 2007.

[6] E. Hollnagel and D.D. Woods, « Epilogue: Resilience engineering precepts ». In E. Hollnagel, D.D. Woods and N. Leveson (Eds.), Resilience Engineering: Concepts and Precepts », Ashgate, 2006.

[7] E. Hollnagel, « Achieving system safety by resilience engineering ». 1st Institution of Engineering and Technology International Conference on System Safety, June, 2006.

[8] R. Amalberti, « 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.

[9] J. Wreathall, « Properties of resilient organizations: an initial view ». In E. Hollnagel, D.D. Woods and N. Leveson (Eds.), Resilience Engineering: Concepts and Precepts, Ashgate, 2006.

[10] K.H. Orwin and D.A. Wardle, « New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances ». Soil Biology and Biochemistry, Vol. 36, pp. 1907-1912, 2004.

[11] H. Pérez-España and F. Arreguín-Sánchez, « An inverse relationship between stability and maturity in models of aquatic ecosystems ». Ecological modelling, Vol. 45, pp. 189-196, 2001.

[12] S. Martin, « La résilience dans les modèles de systèmes écologiques et sociaux ». Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, June 17, 2005.

[13] G.A. Dorais, R.P. Bonasso, D. Kortenkamp, B. Pell and D. Schreckenghost, « 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.

[14] R. Parasuraman, T.B. Sheridan and C.D. Wickens, « A model for types and levels of human interaction with automation ». In IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part A: Systems and Humans, Vol. 30, N° 3, May, 2000.

[15] S. Zieba, P. Polet, D. Jouglet and F. Vanderhaegen. « 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, Korea, September, 2007.

[16] J.-M. Hoc, « Supervision et contrôle de processus – La cognition en situation dynamique ». Presses Universitaires de Grenoble, 1996.

[17] K. Schmidt, « Cooperative Work: A Conceptual Framework ». In J. Rasmussen, B. Brehmer and J. Leplat (Eds.), Distributed Decision Making: Cognitive Models for Cooperative Work, pp. 75-110, John Wiley & Sons Ltd, 1991.

[18] P. Millot, « Concepts and limits for Human-Machine cooperation ». In IEEE SMC - CESA'98 - Computational Engineering in Systems Applications, Hammamet, April 1-4, Tunisia, 1998.

[19] T. Fong, C. Thorpe and C. Baur, « 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.

[20] J.M. Bradshaw, P.J. Feltovitch, H. Jung, S. Kulkarni, W. Taysom and A. Uszok, « Dimensions of adjustable autonomy and mixed-initiative interaction ». In M. Nickles, M. Rovatsos, and G. Weiss (Eds.): AUTONOMY 2003, LNAI 2969, pp. 17–39, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.

[21] S. Zieba, P. Polet, D. Jouglet and F. Vanderhaegen. « Resilience and Affordances: Perspectives for Human – robot cooperation », 26th European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control, Lyngby, Danemark, June, 2007.