

Techniques de Coordination Multi-Agents Appliquées au Contrôle du Trafic Aérien

Minh NGUYEN-DUC, Vu DUONG, Jean-Pierre BRIOT, Alexis DROGOU

Résumé—Le contrôle du trafic aérien (*Air Traffic Control* - ATC) suppose un travail collaboratif des contrôleurs aériens et des pilotes qui assument ensemble la responsabilité d'assurer la sûreté et l'exactitude de tous les vols. La demande croissante des voyages par avions commerciaux pose de grands défis au système ATC contrôleur-centré actuel, dans lequel les contrôleurs ont l'essentiel des responsabilités -- ils commandent et les pilotes suivent les ordres. La capacité de l'espace aérien devient rapidement saturée, en particulier quand des embouteillages d'avions se produisent et causent des risques de surcharge instantanée du trafic. Le besoin essentiel est donc de décentraliser mieux le système en redistribuant la responsabilité aussi bien que la charge de travail. Cet article présente notre recherche dans le cadre de cette redistribution, qui consiste à installer un cadre méthodologique qui utilise des techniques de coordination multi-agents. La cohérence et la simplicité sont les qualités principales que nous attendons de ce travail sur les mécanismes de collaboration dans l'ATC. En outre, les résultats récents des recherches sur la capacité de plusieurs agents de réagir ensemble à des incidents peuvent apporter de la flexibilité au système ATC qui est encore particulièrement rigide.

Index Terms—contrôle du trafic aérien, multi-agents, STEAM, techniques de coordination.

I. INTRODUCTION

Le système ATC actuel est centré sur l'espace. L'espace aérien est divisé en plusieurs secteurs, dont la taille dépend du nombre d'avions dans la région et la géométrie des routes aériennes. Il y a habituellement deux contrôleurs aériens dans chaque secteur qui manipulent le trafic: un contrôleur planificateur et un contrôleur exécutif. Le planificateur travaille à un niveau stratégique et essaye de réduire au minimum le nombre de conflits ou leur complexité. Le contrôleur exécutif travaille à un niveau tactique et s'assure

qu'il n'y a aucun conflit. Quand beaucoup d'avions occupent la même région, la taille d'un secteur typique peut se rétrécir à 5 minutes. Ceci occasionne plusieurs problèmes potentiels. Beaucoup de temps est dépensé pour faire passer l'avion d'un secteur (paire de contrôleurs) à l'autre, ce qui ajoute de la complexité et de l'incertitude au processus. Les contraintes temporelles et spatiales rendent difficile la détection et la résolution des conflits, et restreignent la flexibilité de l'ensemble.

Pendant longtemps, les contrôleurs se sont vue assignée toute la responsabilité et l'autorité de contrôle sur des secteurs individuels. Bien qu'il y ait des exceptions, d'une manière générale, ils n'interagissent avec des contrôleurs d'autres secteurs qu'au moment des transferts de contrôle inter-secteur. L'avantage de ce paradigme opérationnel est qu'une erreur opérationnelle (par exemple conflit entre avions) est aisément détectée. Cependant, son inconvénient principal, qui apparaît particulièrement à notre époque d'explosion du trafic aérien, est qu'il n'y a aucune raison pour que les contrôleurs collaborent sur d'autres opérations que le transfert de contrôle; et des actions contradictoires peuvent se produire quand les contrôleurs de différents secteurs travaillent sur la même circulation, ou ontrôlent le même vol.

De nos jours, beaucoup de recherches [8][10][12] dans le domaine ATC essayent d'établir les nouveaux concepts opérationnels qui permettront aux contrôleurs de différents secteurs de travailler mieux ensemble. Leur objectif est non seulement de rationaliser les comportements collectifs de contrôleurs, mais également de distribuer leur responsabilité et leur charge de travail sur différents secteurs. Pour l'instant, les deux contrôleurs d'un secteur encombré sont assurés que la circulation arrivant dans leur secteur est lissée par les contrôleurs des secteurs voisins précédents. La redistribution des tâches de contrôle entre le contrôleur exécutif et le pilote est actuellement étudiée par des chercheurs au centre expérimental EUROCONTROL [3][8][12]. Ces études essayent de définir de nouvelles opérations de coordination pour les acteurs classiques du système ATC: contrôleurs (planificateur/exécutif) et pilotes. Cependant, ils ont besoin de cadres méthodologiques qui fournissent les outils nécessaires au traitement des aspects essentiels de la coordination. Pour réduire les imperfections du système ATC mentionnées ci-dessus, nous proposons d'établir un tel cadre méthodologique sur la base de techniques de coordination multi-agents. Pourquoi utiliser des agents?. La première raison vient de la simplicité et de la cohérence de leurs comportements collectifs. Étant entièrement artificiels, leurs comportements,

Manuscrit reçu le 20 septembre 2002.

Minh NGUYEN-DUC. Laboratoire d'Informatique de Paris 6 (LIP6), Université de Paris 6, Paris, France, minh.nguyen-duc@lip6.fr. Institut de la Francophonie pour l'Informatique (IFI), Hanoi, Vietnam, ndminh@ifi.edu.vn.

Vu DUONG, EUROCONTROL Experimental Center, Brétigny, France, vu.duong@eurocontrol.int.

Jean-Pierre BRIOT. Laboratoire d'Informatique de Paris 6 (LIP6), Université de Paris 6, Paris, France, jean-pierre.briot@lip6.fr.

Alexis DROGOU. Laboratoire d'Informatique de Paris 6 (LIP6), Université de Paris 6, Paris, France, alexis.drogoul@lip6.fr.

individuels comme collectifs, sont toujours clairement modélisés et conçus. Bien que la coordination humaine soit vraiment très complexe, beaucoup de guides ATC sont en effet édités avec comme objectif principal de définir et de normaliser les procédures opérationnelles. Et, si une technique simple prouve son efficacité et sa sécurité, on préférera l'appliquer plutôt qu'une plus complexe. La deuxième raison est que les résultats des recherches actuelles sur les mécanismes de coordination d'agents artificielles sont prometteurs. Nous avons en particulier étudié soigneusement les principes fondamentaux de la coordination d'actions: de la planification distribuée, de l'intention commune, et des systèmes à réaction collective.

Le papier est organisé comme suit: la section 2 explique quelques mots clef du domaine ATC. Dans la section 3, nous présentons certaines caractéristiques utiles des techniques de coordination multi-agents. Dans la section 4, notre approche de recherche est présentée et illustrée par un exemple spécifique de l'application à la *Délégation Limitée* dans la section 5. Enfin dans la section 6 nous tirons quelques conclusions.

II. LE DOMAINE ATC

Le domaine de recherche ATC possède certains concepts qui ne sont pas difficiles à comprendre mais apparaissent rarement dans la vie quotidienne et dans les autres domaines. Nous voudrions d'abord expliquer de façon simple quelques mots clef du domaine.

- *Secteur*: Une partie de l'espace aérien contrôlée par une équipe de contrôleurs, définie, notamment, par ses coordonnées géographiques et sa fréquence de radio assignée. Deux postes de contrôleur sont identifiés pour un secteur spécifique: contrôleur planificateur et contrôleur exécutif. Dans un secteur, tous les avions sont sous le contrôle d'un seul contrôleur exécutif.
- *Contrôleur Planificateur*: Une personne qui travaille à un niveau stratégique avec la responsabilité d'organiser le trafic entrant, traversant et quittant son secteur. Elle/il rassemble les plans de vol et essaye de résoudre des conflits d'avions potentiels en mettant à jour ces plans. Elle/il négocie avec des contrôleurs sur les secteurs directement adjacents (quand les secteurs adjacents sont couverts par le centre de contrôle) ou par téléphone (quand les secteurs adjacents sont en dehors du centre de commande).
- *Contrôleur Exécutif*: Une personne qui travaille à un niveau tactique avec la responsabilité d'assurer une distance de sécurité entre avions et de résoudre les conflits d'avions instantanés. Elle/il communique avec les pilotes par radio et leur donne des instructions de contrôle. Dans le système ATC actuel, les pilotes doivent obéir strictement à ces ordres.
- *Plan de Vol*: L'information spécifiée relative à un vol prévu ou une partie d'un vol d'un avion: type d'avion, aéroport de départ et de destination, piste d'atterrissage et

piste de décollage, niveaux prévus de vol (altitude), route prévue (les buts), etc. Un contrôleur traite seulement des plans partiels de vol concernés par son secteur.

- *Transfert de Contrôle Inter-secteur*: Une procédure opérationnelle exécutée par les contrôleurs de deux secteurs adjacents quand un avion part d'un secteur et entre dans l'autre. L'instant de transfert de l'autorité et de la responsabilité du contrôle d'un avion doit être clairement défini par les documents d'accord officiels et être précisément déterminé dans l'exécution.
- *Délégation Limitée [8]*: Un nouveau concept opérationnel qui identifie le transfert de certaines responsabilités du contrôleur aux pilotes comme celle de l'assurance standard de distance de séparation. clearances.

III. APPLICABILITE DES TECHNIQUES DE COORDINATION MULTI-AGENTS

Dans cette section, nous ne décrivons pas en détail ces techniques mais seulement certaines de leurs caractéristiques essentielles qui peuvent être utiles pour la prise de décision de collaboration dans le système ATC.

- *Coordination par planification*: Les agents forment les plans qui indiquent totalement ou partiellement leurs actions futures et les partagent pour identifier les améliorations potentielles à apporter à la coordination et éviter des actions inconsistantes et contradictoires. Durfee a développé un mécanisme bien connu d'échange du plan global partiel (*Partial Global Plan - PGP*) [2][4]; ce type de plan contient les informations générales courantes d'une partie de toutes les activités. De telles techniques de planification peuvent offrir des solutions potentielles de représentation *des conflits et des problèmes de concordance dus aux actions simultanées et contradictoires de contrôleurs adjacents* [10].
- *Coordination par intentions communes*: Quand le monde (l'environnement et d'autres agents) n'est pas chaotique, c.-à-d. ne change pas à une vitesse trop élevée par rapport à leurs capacités de traitement, les agents d'une équipe peuvent générer l'intention commune d'exécuter une activité commune. La capacité pour des agents de travailler ensemble, qui est offerte par les techniques d'intention commune [1][9], peut rendre de nouveaux concepts opérationnels ATC possibles, par exemple *la coordination inter-secteur centrée sur la trajectoire* [10] ou *la délégation limitée des tâches de contrôle aux pilotes* [8].
- *Coordination réactive* [5]: Au contraire des techniques précédentes, la coordination réactive considère qu'il est souvent plus simple d'agir directement sans planification comme préliminaire. Les différents agents réagissent ensemble à des incidents, par exemple un risque imminent de collision, en considérant l'action des uns et des autres, mais sans communication. L'avantage de ce genre de coordination pour le système ATC sera plus évident quand les pilotes se verront accordés plus d'autonomie (avec *Vol Libre* [3] ou *Délégation Limitée* [8]). Un pilote

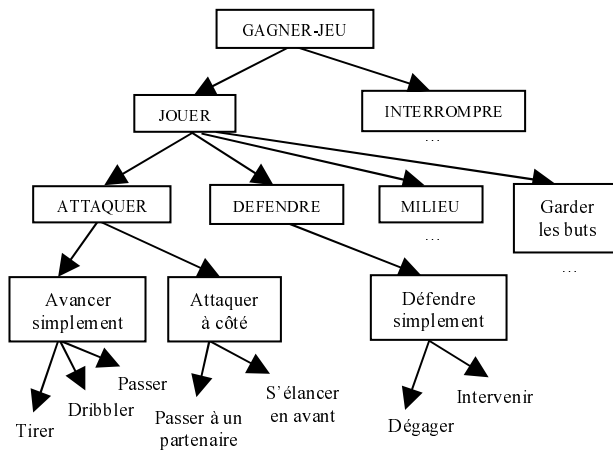
peut cependant éventuellement instantanément réagir à une situation, par exemple le risque de violer la distance de séparation standard à un autre avion, sans en référer au contrôleur, et ce type de coordination peut être aisément représentée sous la forme de coordination réactive.

Exemple d'un modèle pratique de coordination - STEAM

STEAM (Shell for TEAMwork) [11][13] est un modèle générique de travail d'équipe (*Teamwork*) basé sur la théorie de l'*intention commune* [1][9], mais qui emprunte également quelques idées à la théorie des *plans partagés* [6][7]. Ce modèle est basé sur l'exécution des plans réactifs hiérarchiques parmi lesquels les *plans d'équipe* sont distingués de *plans individuels* (les agents forment toujours ensemble des équipes pour exécuter des activités collectives). Quand un agent choisit un plan d'équipe pour l'exécution, une *intention commune* est créée pour l'équipe. Les plans d'équipe expriment explicitement des activités communes de l'équipe, opposés aux plans individuels qui expriment les propres activités de l'agent.

Quand un agent a_i utilise un plan d'équipe pour l'exécution, le plan est associé à un agent d'exécution, qui peut être dynamiquement déterminé comme un agent individuel, ou une sous-équipe, ou l'équipe entière. Dans la hiérarchie, chaque plan non-feuille p_j est un ensemble de plans-enfant dont les agents d'exécution sont membres/sous-équipes de celui du p_j . Il y a une intention commune liée à chaque plan (d'équipe).

Pour appliquer des plans d'équipe, un agent basé sur



* les plans encadrés sont les plans d'équipe

Fig. 1. Partie de la hiérarchie des plans utilisés par des robots dans la simulation de football *RoboCup* [14].

STEAM maintient un état d'équipe qui est habituellement initialisé avec des informations sur l'équipe, telle que les membres de l'équipe, les sous-équipes possibles, les voies de transmission disponibles, le leader prédéterminé de l'équipe et ainsi de suite. STEAM peut également maintenir des états de sous-équipe pour la participation de sous-équipe. Une restriction est imposée afin de préserver la consistance d'un état de (sous-)équipe -- seulement les plans représentant des intentions communes de cette (sous-)équipe peuvent le modifier.

Les plans d'équipe reposent sur des *butts faibles persistants* (*Persistent Weak Achievement Goal - PWAG*). $PWAG(v_i, OP, \Theta)$ dénote l'engagement d'un membre v_i (d'une équipe Θ) à sa tâche d'équipe OP avant que l'équipe établisse un *but persistant commun* (*Common Persistent Goal - CPG*). Pour exécuter un plan d'équipe, les agents doivent d'abord l'établir comme *intention commune* au moyen du protocole d'engagement décrit ci-dessous:

- Le leader diffuse un message à l'équipe Θ_i pour créer un CPG concernant la tâche OP , puis définit $PWAG(\text{leader}, OP, \Theta_i)$; si $CPG(\Theta, OP)$ n'est pas établi dans les délais, il répète la diffusion.
- Les subordonnés v_i attendent jusqu'à ce qu'ils reçoivent le message du leader. Puis, à tour de rôle, diffusent autour d'eux des messages pour créer $PWAG(v_i, OP, \Theta_i)$; ils l'établissent ensuite.
- Chaque agent attend jusqu'à ce que tous établissent $PWAG(v_i, OP, \Theta_i)$ et puis établisse $CPG(v_i, OP, \Theta_i)$.

STEAM comporte également des mécanismes de *re-planification*. Il forme une *intention commune* pour re-planifier toutes les fois que l'*intention commune* d'une équipe pour une étape d'exécution est vue comme inatteignable. D'ailleurs, pour éviter des coûts de communication significatifs, STEAM intègre aussi des mécanismes de *sélectivité des communications*.

IV. APPROCHE DE RECHERCHE

Notre objectif général mentionné ci-dessus était d'**installer un cadre méthodologique utilisant des techniques de coordination multi-agents qui soutient le travail collaboratif des contrôleurs et pilotes dans l'ATC**. Quatre grands sous-objectifs de notre recherche sont:

- De découvrir des applications potentielles des techniques de coordination multi-agents dans l'ATC,
- De modéliser quelques problèmes collaboratifs actuellement « chauds » dans l'ATC en employant un modèle générique de coordination bien connu, STEAM [13],
- En se basant sur l'analyse expérimentale de cette modélisation, de continuer à appliquer d'autres techniques de coordination,
- Et finalement d'essayer d'appliquer un grand nombre de techniques de coordination au système ATC.

Comme un fruit de la collaboration entre le centre expérimental EUROCONTROL et le Laboratoire d'Informatique de Paris 6 (LIP6), quelques projets de recherche ont été lancés. Nous avons étudié l'applicabilité des techniques de coordination multi-agents à l'ATC au moyen d'employer STEAM pour modéliser quelques scénarios. Nous avons également examiné plusieurs problèmes collaboratifs et certains d'entre eux ont été choisis pour des expérimentations. Nous mettons en application maintenant un simulateur prototype pour *des méthodes anti-dépassement en temps réel*

[12].

V. UN EXEMPLE ILLUSTRATIF

La recherche sur le concept de la *Délégation Limitée* est conduite par Zeghal et autres [8] au centre expérimental EUROCONTROL. Cette section ne concerne que les esquisses de l'application du cadre méthodologique de coordination multi-agents.

A. Description opérationnelle

Les opérations collaboratives générales sont:

- *Formation d'une équipe*: Le contrôleur identifie des conflits potentiels et pour chacun de ces conflits forme une équipe comprenant le contrôleur elle/lui-même et les avions impliqués. Chaque avion dans l'équipe sait avec quel avion il doit assurer la distance sûre.
- *Formation d'une équipe déléguée*: En se basant sur la situation et la capacité de chaque avion, le contrôleur choisit quelques sous-équipes. Chaque sous-équipe comprend le contrôleur et les avions auxquels elle/il a l'intention de déléguer une certaine partie de la responsabilité de l'assurance de distance sûre. Cette partie déléguée est commune à tous les membres de la sous-équipe. Le leader de la sous-équipe peut être n'importe quel avion; il peut être déterminé en employant les règles de priorité. Le leader est chargé de la communication nécessaire pour mettre en application la délégation entre le contrôleur et le sous-groupe.
- *Détermination du niveau de délégation*: Pour chaque équipe déléguée, en se basant sur la capacité de chaque

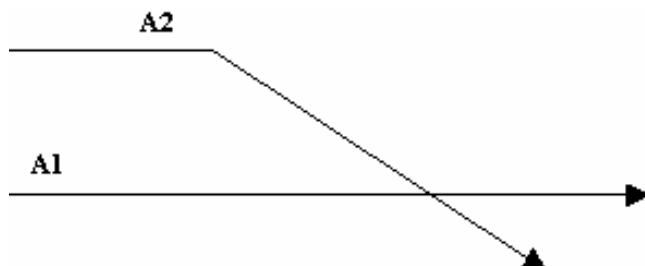


Fig. 2. Scénario de croisement vertical.

avion, le contrôleur décide le niveau de délégation affectée à tous les membres de l'équipe déléguée.

- *Manoeuvre*: Sous la surveillance du contrôleur, les avions dans l'équipe déléguée manoeuvrent de manière coopérative pour effectuer la partie commune de responsabilité que le contrôleur leur délègue.
- *Transformation de niveau en temps réel*: Tout en manoeuvrant, si aucun avion dans l'équipe déléguée ne peut assumer la responsabilité pour la partie que le contrôleur lui a déléguée, elle doit informer tous les membres de l'équipe déléguée et le contrôleur. Le contrôleur réduit alors le niveau de délégation pour l'équipe déléguée.

B. Scénario

L'avion A1 est stable à FA250 (altitude de vol) et l'avion A2 à FA390 demande la descente, mais croise la trajectoire d'A1. Le contrôleur doit coopérer avec A2 en réponse à sa demande. Nous considérons une équipe de trois membres: contrôleur, A2 et un A1 qui sera impliqué dans quelques cas spéciaux. Les niveaux de délégation sont identifiés comme les suivants:

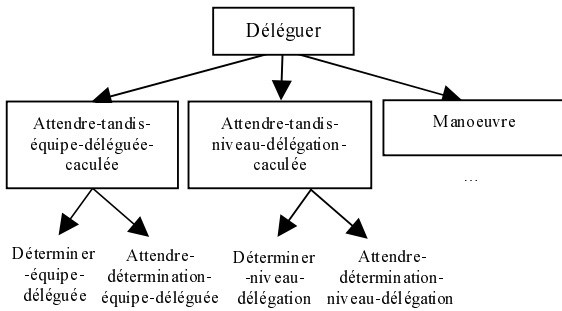
- *Niveau de base*: Le contrôleur délègue à A2 la responsabilité de l'identification du « *clear of target (A1)* »; il doit identifier l'événement « *clear of target (A1)* » et l'annoncer au contrôleur. Il aide le contrôleur en lui fournissant un rappel opportun, pour but de réduire des tâches de surveillance du contrôleur en annonçant « *clear of target (A1)* ».
- *Niveau intermédiaire*: Le contrôleur délègue à A2 la responsabilité de la surveillance du « *clear of target (A1)* » et de la reprise de montée ou de navigation normale.
- *Niveau avancé*: Le contrôleur délègue à A2 la responsabilité de l'exécution de manoeuvre. Elle/il identifie le conflit, puis choisit le type de manoeuvre pour assurer la distance sûre, par exemple changement de direction de vol, et l'exécute.

En appliquant les opérations générales, les résultats supposés des opérations de ce scénario peuvent être décrits comme suit:

- *Formation d'une équipe*: Une équipe contenant A1, A2 et le contrôleur est formée.
- *Formation d'une équipe déléguée*: Une équipe contenant seulement un membre A2 est formée; A2 sait qu'il est responsable des tâches déléguées de l'assurance de distance sûre et attend l'attribution du niveau de délégation; A1 est au courant de cette responsabilité d'A2.
- *Détermination du niveau de délégation*: Le niveau intermédiaire est choisi; A2 est au courant de ce niveau choisi.
- *Manoeuvre*: A1 est verrouillé sur sa direction de vol, cela signifie qu'il maintient voler tout droit et régulièrement; le contrôleur demande à A2 de situer A1; A2 annonce cette position; le contrôleur demande à A2 de descendre jusqu'au « *clear of target (A1)* » et de continuer la descente; A2 annonce le « *clear of target (A1)* » et descend à l'altitude de vol désirée.
- *Transformation de niveau en temps réel*: (Pendant la descente jusqu'au « *clear of target* », A2 perd la capacité de prévoir la trajectoire de l'autre avion (A1); cela signifie que la condition d'applicabilité du niveau intermédiaire n'est pas assurée) Le contrôleur décide de réduire le *niveau* de délégation en employant la délégation de base pour tout le reste de la descente d'A2; Elle/il informe A2 de ce nouveau niveau.

C. Modélisation basée sur STEAM

Nous essayons d'employer STEAM pour modéliser partiellement les tâches collaboratives décrites ci-dessus, dont la modélisation complète doit être beaucoup plus complexe. Les contrôleurs et les avions tous sont modélisés comme agents. La hiérarchie des plans résultante est présentée dans la figure 3.



* les plans encadrés sont les plans d'équipe

Fig. 3. Hiérarchie des plans pour la *Délégation Limitée*.

Nous décrivons maintenant comment les agents suivent l'exécution de plan d'équipe standard tout en exécutant *Attendre-tandis-équipe-déleguée-calculée* et *Attendre-tandis-niveau-délégation-calculée*.

- *Attendre-tandis-équipe-déleguée-calculée*: Le but faible persistant d'un membre (avion) de l'équipe formée pour le plan *Attendre-tandis-équipe-déleguée-calculée* est établi quand il commet à la tâche collective pour attendre tandis que l'équipe déléguée d'avion est calculée. Quand l'engagement des autres est assuré, l'avion établit le but persistant commun pour le plan *Attendre-tandis-équipe-déleguée-calculée*. Les actions détaillées sont comme suit:
 - Le contrôleur diffuse un message à l'équipe Θ_2 formée pour créer un CPG concernant le plan *Attendre-tandis-équipe-déleguée-calculée*, puis définit $PWAG(\text{controller}, \text{Attendre-tandis-équipe-déleguée-calculée}, \Theta_2)$; si $CPG(\Theta_2, \text{Attendre-tandis-équipe-déleguée-calculée})$ n'est pas établi dans les délais, il répète la diffusion.
 - Les subordonnés a_i (avion) dans l'équipe attendent jusqu'à ce qu'ils reçoivent le message du contrôleur. Puis, à tour de rôle, diffusent autour d'eux des messages pour créer $PWAG(a_i, \text{Attendre-tandis-équipe-déleguée-calculée}, \Theta_2)$; ils l'établissent ensuite.
 - Chaque avion attend jusqu'à ce que tous définissent $PWAG(a_i, \text{Attendre-tandis-équipe-déleguée-calculée}, \Theta_2)$ et puis établisse $CPG(a_i, \text{Attendre-tandis-équipe-déleguée-calculée}, \Theta_2)$.
- *Attendre-tandis-niveau-délégation-calculé*: L'établissement d'engagement pour ce plan est très semblable à celui pour le plan *Attendre-tandis-équipe-déleguée-calculée*. Une seule différence doit être notée:
 - L'exécution de ce plan doit attendre l'arrêt de l'exécution du plan *Attendre-tandis-niveau-délégation-calculé*. Quand le contrôleur obtient le niveau de délégation déterminé, elle/il exécute un plan de communication (un type spéciale de plan) pour mettre à jour la croyance d'équipe. Un message est envoyé à tout l'avion délégué et le résultat de la détermination du niveau de délégation est attaché à ce message qui peut être considéré comme pour établir le but persistant commun du plan *Attendre-tandis-niveau-délégation-calculé*.

La transformation de niveau en temps réel peut d'ailleurs

être bien modélisée par l'utilisation de la *re-planification* fournie par STEAM.

D. Gains opérationnels

En se basant sur les différentes descriptions d'un nouveau paradigme pour le scénario de *Délégation Limitée* (descriptions opérationnelle, par un scénario spécifique et basée sur STEAM), nous pouvons identifier les principaux avantages de la modélisation multi-agents de la *Délégation Limitée* comme suit:

- L'adaptation du niveau de délégation à la situation pourrait devenir faisable en appliquant la transformation de niveau en temps réel.
- Le modèle peut être employé pour tout ensemble de niveaux de délégation que les chercheurs du domaine ATC veulent vérifier parce qu'il est indépendant de la nature ATC du niveau de délégation et ne concerne que le partage (aspect collaboratif) du niveau de délégation.
- La possibilité de déléguer des tâches de contrôle non seulement à un avion simple mais également à un groupe d'avions n'est pas vraiment décrite dans le scénario (l'équipe déléguée contient toujours un seul membre); cependant le modèle défini peut la soutenir.

E. Tâches automatisables et réduction de charge de travail

Tandis que la technique de communication facilite la *Délégation Limitée*, qui vise à réduire la charge de travail des contrôleurs, ils ajoutent également quelques tâches génériques, par exemple l'établissement d'intention commune. Le problème est si de telles tâches additionnelles peuvent être automatisées. Nous croyons que celles appliquées aux agents sont particulièrement automatisables. Cependant cette exigence doit être validée par des expérimentations et également par des implémentations réelles. Dans l'exemple présenté ci-dessus, des messages génériques de communication non seulement peuvent être intégrés dans de vrais messages entre des contrôleurs et des avions mais également être automatiquement transmis par des outils de logiciel/matériel. Par exemple, il est facile de reconnaître que toutes les tâches dans le protocole d'établissement d'intention commune sont automatisables.

VI. CONCLUSION

Le travail présenté étudie l'application de techniques de coordination multi-agents au contrôle de trafic aérien (ATC). Nous croyons que la simplicité et l'automatisabilité des comportements collectifs des agents peuvent offrir des solutions efficaces à des problèmes collaboratifs actuellement « chauds » dans l'ATC. Des succès récents des techniques de coordination multi-agents sont prometteurs. À cette étape de la recherche, des scénarios opérationnels réalistes et leur modélisation utilisant quelques modèles de coordination génériques, par exemple STEAM, devraient être employés afin d'évaluer des gains opérationnels, l'applicabilité et la possibilité d'implémenter. Dans ce but, des applications potentielles initiales, par exemple au problème de *Délégation*

Limitée, ont été identifiées et les résultats analytiques obtenus sur leur modèle basé sur STEAM étaient prometteurs. La réduction de la charge de travail des contrôleurs a été toujours considérée comme exigence principale.

L'étape prochaine sera donc une expérimentation quantitative, avec l'objectif d'évaluer des gains attendus d'un point de vue plus réaliste. D'ailleurs il est clair que la rapidité et la flexibilité (réactivité contre des incidents) du système global ne pourraient pas être vraiment évaluées sans expérimentation « homme dans la boucle ».

[14] <http://www.robocup.org/02.html>.

REFERENCES

- [1] Cohen P. R. & Levesque H. J. "Teamwork". *Nous*, **25**(4), p. 487-512, 1991.
- [2] Decker K. S. & Lesser V. R. "Generalizing the Partial Global Planning Algorithm". *International Journal of Intelligent and Cooperative Information Systems*, **1**(2), p.319-346, 1992.
- [3] Duong N. V., Hoffman E. & Nicolaon J. P. "Initial Results of Investigation into Autonomous Aircraft Concept", *1st USA/EUROPE ATM R&D Seminar*, Saclay, 1997.
- [4] Durfee E. & Lesser V. R. "Global Partial Planning: A coordination framework for Distributed Hypothesis". *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **21**(6), 1991.
- [5] Ferber J. "Reactive Distributed Artificial Intelligence: Principles and Applications". O'Hare G. M. P. & Jennings N. R. (Ed.), *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, John Wiley & Sons Inc., p. 287-314, 1996.
- [6] Grosz B. "Collaborative systems". *AI Magazine*, **2**(17), p. 67-85, 1996.
- [7] Grosz B. & Kraus S. "Collaborative plans for complex group actions". *Artificial Intelligence*, **86**, p. 269-358, 1996.
- [8] Hoffman E., Zeghal K., Cloerec A., Grimaud I. & Nicolaon J. "Is limited delegation of separation assurance promising?". *3rd USA/Europe ATM R&D Seminar*, Napoli, 2000.
- [9] Jennings N. R. "Controlling Cooperative Problem Solving in Industrial Multi-Agent Systems Using Joint Intentions". *Artificial Intelligence*, **75**(2), p. 195-240, 1995.
- [10] Leiden K. & Green S. "Trajectory Orientation: A Technology-Enabled Concept Requiring a Shift in Controller Roles and Responsibilities". *3rd USA/Europe ATM R&D Seminar*, Napoli, 2000.
- [11] Marsella S., Adibi J., Alonaizan Y., Kaminka G., Muslea I. & Tambe M. "On being a teammate: Experiences acquired in the design of robocup teams". *Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents (Agents'99)*, 1999.
- [12] Stoltz S. & Ky P. "Reducing Traffic bunching more Flexible Air Traffic Flow Management", *4th USA/Europe ATM R&D Seminar*, New-Mexico, 2001.
- [13] Tambe M. "Towards Flexible Teamwork". *Journal of Artificial Intelligence Research*, **7**, p. 83-124, 1997.