

## Partage d'autorité dans un essaim de drones auto-organisé

Francois Legras, Arnaud Glad, Olivier Simonin, François Charpillet

► **To cite this version:**

Francois Legras, Arnaud Glad, Olivier Simonin, François Charpillet. Partage d'autorité dans un essaim de drones auto-organisé. 16es Journées Francophones des Systèmes Multi-Agents - JFSMA'08, Oct 2008, Brest, France. 2008. <inria-00332010>

**HAL Id: inria-00332010**

**<https://hal.inria.fr/inria-00332010>**

Submitted on 20 Oct 2008

**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.

# Partage d'autorité dans un essaim de drones auto-organisé

F. Legras<sup>a,b</sup> francois.legras@telecom-bretagne.eu    A. Glad<sup>c,d</sup> arnaud.glad@loria.fr    O. Simonin<sup>c,d</sup> olivier.simonin@loria.fr    F. Charpillet<sup>c,d</sup> francois.charpillet@loria.fr

<sup>a</sup>Institut TELECOM / TELECOM Bretagne, Département LUSSE, France

<sup>b</sup>LabSTICC, UMR 3192, équipe CID, CNRS, France

<sup>c</sup>LORIA Laboratoire Lorrain de Recherche en Informatique et ses Applications UMR 7503, Université Henri Poincaré, CNRS, INRIA, Nancy 2, INPL, France

<sup>d</sup>INRIA Nancy Grand Est, Equipe-projet MAIA, France

## Résumé

*Comme l'attestent de nombreuses études prospectives, les essais de drones devraient connaître un développement considérable dans les années à venir. La réalisation de ces nouveaux SMA se heurte cependant à de nombreux défis, en particulier au coût humain dans leur mise en oeuvre, amenant à revoir complètement les interfaces de contrôle actuelles. Nous proposons une approche qui permet à un opérateur unique de faire voler en simulation une flottille de drones et de réaliser des missions de surveillance et d'interception. Cet article expose tant les modèles d'auto-organisation développés par l'équipe MAIA autour de la notion de phéromone digitale que les modes opératoires développés par TELECOM Bretagne pour le partage d'autorité. Enfin des résultats expérimentaux faisant intervenir des sujets humains montrent l'adéquation de la combinaison des deux approches pour des missions de surveillance.*

**Mots-clés :** Partage d'autorité ; robotique collective ; émergence, Auto-organisation ; déploiement de SMA, résistance aux pannes

## Abstract

*This paper addresses the human control of a large number of unmanned air vehicles (UAVs) for the surveillance of a sensitive outdoor area. We leverage the combination of sensor network and environment marking for swarm intelligence. This grants autonomy to the UAVs system and allows the operator to focus on noteworthy tasks like counter-intrusion. This paper presents the experimental results of the SMAART project.*

**Keywords:** Authority sharing ; collective robotics ; emergence, self-organization ; MAS deployment, robustness

## 1 Introduction

Cette étude est menée dans le cadre du projet SMAART. L'objectif est la surveillance par un essaim de drones d'une base aérienne afin de détecter et intercepter d'éventuels intrus avant que ceux-ci ne puissent atteindre des installations sensibles (*cf.* base militaire simulée fig. 1). Pour mener cette tâche à bien, nous dotons le système d'un nombre défini de drones à voilure tournante autonomes (DVT), c'est à dire de type hélicoptère (*cf.* fig. 2), capables d'effectuer seuls des actions simples comme décoller, atterrir ou se rendre à un point de la base. Ils sont également munis d'une caméra leur permettant de percevoir localement l'environnement et de détecter des intrus dans un rayon donné. Nous simulons ce système à travers un environnement continu où tous les agents évoluent à une altitude identique. Comme représenté en fig. 1, nous étudions également le couplage de ce système avec un réseau de capteurs venant compléter le dispositif de détection.

À l'heure actuelle un grand nombre d'opérateurs humains est nécessaire pour superviser la mission d'un seul drone (au moins un pour la plate-forme et un autre pour la charge de mission), même si l'on ne tient pas compte du personnel nécessaire au lancement, à l'entretien, *etc.* Les futurs systèmes prévoient l'utilisation de plusieurs engins coopérant pour accomplir leur mission, et le ratio actuel entre le nombre d'opérateurs et le nombre d'engin ne sera plus viable [9]. Il est donc nécessaire d'abandonner les modes actuel de contrôle (proches de la téléopération) pour donner plus d'autonomie à ces systèmes [5], et donc de partager l'autorité de décision sur certains éléments de la mission.

Rendre les drones autonomes est une problématique qui peut être abordée selon deux ap-



FIG. 1 – Modélisation de la base militaire utilisée (avec réseau de capteurs au sol).

proches. La première, la plus classique, consiste à *planifier* des parcours entre les lieux à surveiller puis de laisser les drones suivre les trajectoires pré-calculées [16, 11]. La seconde, au contraire, repose sur une *auto-organisation* des drones, qui fait émerger des parcours de surveillance en fonction de leurs interactions avec l'environnement [19, 3]. Le principal défaut de la première approche est de construire une solution figée une fois le calcul terminé. La patrouille ainsi obtenue peut difficilement s'adapter à des changements de configuration lors de l'exécution, tels que l'ajout ou la disparition d'un agent, le retour d'un agent à la base pour ravitaillement ou encore l'intervention d'un opérateur humain. Chacune de ces situations implique de re-planifier une nouvelle organisation. Dans ce cas, cette approche est soumise au problème de l'explosion combinatoire dès lors que la taille de l'environnement ou le nombre d'agents augmentent. À l'opposé, les approches de type intelligence en essaim reposent sur les interactions entre agents et avec l'environnement, où chaque individu agit de façon autonome. Il nous semble intéressant d'étudier comment une telle approche peut interagir en temps réel avec un ou plusieurs opérateurs humains. D'une part cette approche ouvre à des interactions indirectes avec le système (e.g. via l'environnement). D'autre part, dans ce type de solutions auto-organisées, supprimer ou ajouter un agent ne remet pas en cause le fonctionnement global du système. Ainsi nous montrons dans cet article comment un opérateur peut – par exemple – prendre la main d'une sous partie d'un essaim de drones sans porter atteinte à l'organisation générale du système.

Le partage d'autorité décrit dans cet article est



FIG. 2 – Drone hélicoptère (PY Automation).

proche d'une approche par comportements (voir section 2.1) : le SMA est doté de capacités d'auto-organisation lui permettant de mener à bien la mission sans l'intervention de l'opérateur. L'opérateur dispose d'une interface lui donnant d'une part des informations sur l'état du système, et d'autre part le moyen d'agir sur le comportement du système. Ces moyens d'action sont de deux ordres, directs ou indirects : (1) assigner à certains agents des positions cibles à partir desquelles ils reprendront leur comportement autonome ; (2) modifier localement les taux d'évaporation d'une phéromone digitale (voir section 3.1) pour attirer ou repousser les agents dans certaines zones.

La section 2 résume les travaux existants dans le domaine du contrôle multi-drones et les notations utilisées pour décrire le partage d'autorité. Les sections 3 et 4 présentent les algorithmes proposés pour les tâches de patrouille et de poursuite ainsi que les modes opératoires associés. En section 5, nous présentons des résultats expérimentaux obtenus avec des opérateurs humains et analysons en section 6 les perspectives de ce travail.

## 2 Travaux existants

### 2.1 Approches pour le contrôle multi-drones

Nous présentons ici les principales approches proposées pour le contrôle multi-drones, qui sont toutefois peu nombreuses.

Les travaux de Cummings *et al.* traitent de la supervision de multiples engins sans pilotes (missiles tomahawk tactiques et drones [4]) par un opérateur. D'une part, ces travaux se focalisent sur les aspects « facteurs humains » de la tâche de supervision (charge de travail, nombre d'engins, *etc.*) plutôt que sur les aspects de contrôle.

D'autre part, bien que plusieurs « agents » soient impliqués, il ne s'agit pas à proprement parler de contrôler un système multi-agent car les agents n'interagissent pas.

Une approche fréquemment utilisée est de doter les agents de comportements élémentaires (suivre une cible, se rendre à un point donné, patrouiller, *etc.*). La tâche de l'opérateur est alors d'assigner à chaque agent un comportement et de superviser le déroulement de la tâche, changeant les comportements individuels au fur et à mesure de l'activité du système. RoboFlag est par exemple un banc d'essai privilégié pour l'application d'approches fondées sur le comportement [22]. Mais l'approche par comportements a ses limites [21]. Pour que ce type d'approche soit intéressante, il faut qu'un petit nombre de comportements suffise et qu'ils soient suffisamment simples pour que l'opérateur en maîtrise parfaitement les effets.

Citons également le contrôle par *politique* qui permet à l'opérateur de fixer des bornes au comportement des agents sous la forme de contraintes formelles [13, 6]. Il s'agit d'une sorte de contrôle « en creux » en complément d'un autre mode.

Plutôt que de redéfinir et de communiquer aux membres d'une équipe la tactique à adopter pour chaque phase de jeu, un entraîneur fait référence à des tactiques connues de tous (le *playbook*) et n'a qu'à définir quelques détails (assigner un rôle, passer par la droite ou la gauche, *etc.*). L'architecture *Playbook* a été utilisée dans le cas de contrôle et déploiement de robots terrestres tactiques [18], ou d'interaction en temps réel avec des équipes de drones militaires hétérogènes [8].

Enfin, Machinetta permet de mettre en place des équipes hétérogènes d'humains et d'agents artificiels (robots ou logiciels) en associant à chaque RAP (Robot, Agent and/or Person) un agent logiciel mandataire (*proxy*). Chaque agent mandataire communique avec l'humain ou l'agent artificiel qu'il représente, et l'ensemble des agents mandataires fonctionne comme une équipe utilisant des mécanismes de coordination. Des travaux sont en cours pour appliquer cette approche au cas d'opérateur contrôlant plusieurs dizaines d'engins volants sans pilotes [17]. Cependant, plusieurs difficultés restent en suspens, tels l'hypothèse d'indépendance des problèmes de coordination détectés ; ou l'absence de conscience de situation d'un opérateur qui n'est appelé qu'en cas de problème et consi-

déré comme au service du système.

## 2.2 Modes opératoires et niveaux d'autonomie

Pour accomplir les différentes tâches et actions qui composent son activité, l'opérateur d'un système capable de partage d'autorité dispose de plusieurs *modes opératoires*. Des modes opératoires pour une même tâche peuvent différer par la *modalité* utilisée (par exemple : commande vocale ou à la souris) mais aussi par leur niveau d'automatisation : l'opérateur agit-il seul ou le système l'aide-t-il dans sa tâche ? l'opérateur a-t-il vraiment son mot à dire ? (IA, algorithmes d'aide à la décision, *etc.*)

Dans la suite de l'article, nous présenterons les différents modes opératoires du système SMAART pour chacune des fonctions du système. L'objectif est de faire apparaître les nuances entre les modes opératoires possibles sur certaines fonctions du système en leur attribuant une valeur numérique sur une échelle d'autonomie (voir tableau 1).

TAB. 1 – Niveaux d'automatisation de Sheridan.

10	L'ordinateur décide de tout, agit seul, ignore l'humain,
9	informe l'humain s'il (l'ordinateur) le décide,
8	informe l'humain s'il le lui demande,
7	agit puis informe l'humain,
6	accorde un délai pour un éventuel veto avant l'exécution,
5	exécute sa suggestion si l'humain approuve,
4	suggère une possibilité,
3	présente un ensemble restreint de possibilités,
2	présente un ensemble complet de possibilités,
1	n'offre aucune assistance.

Dans le cadre de SMAART, c'est l'*opérateur* qui choisit quel mode utiliser sur une fonction donnée à un instant donné. On parle alors de système à autonomie *ajustable* par opposition à un système à autonomie adaptative, dans le cadre duquel le système décide des changements de mode opératoire en fonction de son modèle de la situation (y compris de l'état de l'opérateur).

## 3 Patrouille multi-agent

### 3.1 Patrouille autonome

La patrouille consiste à déployer des agents afin de visiter tous les lieux de l'environnement le plus régulièrement possible [11]. Pour cela nous

proposons des mécanismes reposant sur l'utilisation de phéromones digitales. Elles sont l'implémentation informatique des substances chimiques - les phéromones - déposées par les fourmis et leur permettant d'interagir. Bien que le comportement individuel d'une fourmi soit très simple, ce moyen de communication indirect leur permet de s'auto-organiser pour accomplir des tâches complexes (constructions de chemins, tris, *etc.* [1, 2, 14]).

La phéromone est soumise à deux mécanismes distincts :

- Le processus d'évaporation qui réalise une diminution progressive de l'information tout en assurant sa disparition avec le temps.
- Le processus de diffusion qui permet la propagation de l'information à travers l'environnement. Ce processus a également pour propriété de construire un gradient de phéromone exploitable par les agents.

Pour réaliser la tâche de patrouille, nous adaptons aux spécificités du problème présenté en introduction le modèle EVAP [7, 3] qui exploite uniquement le processus d'évaporation (cf. algorithmes 1 et 2). Cet algorithme est initialement défini pour des environnements théoriques discrets (grille de cellules couvrant tout l'environnement). EVAP repose sur le marquage de l'environnement, un agent dépose une quantité fixe  $Q_{max}$  de phéromone lorsqu'il visite une cellule. L'évaporation faisant diminuer cette valeur, la quantité restante de phéromone représente le temps écoulé depuis la dernière visite de la cellule, nommée *oisiveté* de la cellule. Ainsi, sur l'ensemble des cellules, il se crée localement des gradients donnant la direction des cellules de plus grande oisiveté (plus faible quantité de phéromone). Par conséquent le comportement des agents est défini par un descente du gradient, assurant localement la patrouille des zones les plus anciennement ou jamais visitées (cf. illustration fig. 3).

---

**Algorithm 1** Agent EVAP (se trouvant sur la cellule  $x$ )

---

- A) Choisir une cellule  $y$  dans  $Vois(x)$  telle que  
 $q(y) = \min_{w \in Vois(x)} q(w)$   
 si  $y$  non unique, faire un choix aléatoire
- B) Aller vers la cellule  $y$
- C) Déposer la qté  $Q_{max}$  de phéromone :  $q(y) \leftarrow Q_{max}$
- 

---

**Algorithm 2** Environnement EVAP

---

Pour chaque cellule  $x$  de l'environnement  
 Si  $q(x) \neq 0$  alors  $q(x) \leftarrow \rho \cdot q(x)$  ( $\rho \in ]0,1[$ )

---

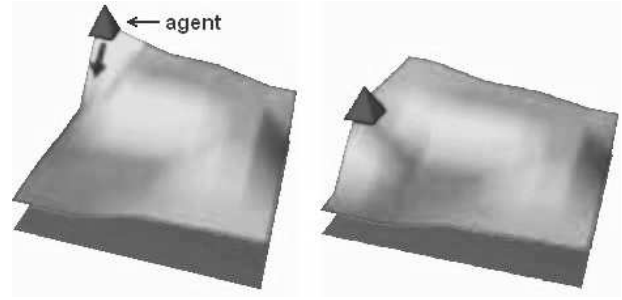


FIG. 3 – Illustration 3D de l'algorithme EVAP (avec un seul agent).

Contrairement aux agents EVAP, les drones SMAART se déplacent en coordonnées réelles, selon un cap et une vitesse donnée. Ainsi, nous conservons la matrice uniquement pour le dépôt et la perception des phéromones. Les agents disposent maintenant d'un disque de perception de rayon  $r$ . Ils sont donc en mesure d'effectuer leur choix parmi les cellules appartenant à ce disque définissant  $Vois(x)$ . Le dépôt de phéromones  $Q_{max}$  est maintenant réalisé sur toutes les cellules de  $Vois(x)$ .

Au niveau de l'environnement, chaque cellule possède désormais un taux d'évaporation  $\rho_x$  propre permettant de modifier dynamiquement la vitesse d'évaporation de certaines cellules, permettant de créer des zones de priorité.



FIG. 4 – Patrouille de la base par un ensemble de drones déposant une phéromone de visite (couleur claire représente une quantité maximum).

La figure 4 illustre le fonctionnement de la patrouille SMAART sur l'environnement de la base présentée en fig. 1. Les agents réalisent dans un premier temps une phase d'exploration de l'environnement. Lorsque l'ensemble des cellules a été visité une fois, le système tend à se stabiliser autour d'une performance moyenne où les agents sont répartis de façon homogène dans l'environnement (cf. étude des performances de cet algorithme dans [7]). Leur

comportement individuel reste cependant non-prédictible, comme souhaité dans le cadre de la surveillance d'un site sensible.

### 3.2 Modes opératoires

La tâche principale (en terme de répartition temporelle) accomplie par l'opérateur du démonstrateur SMAART est de superviser la surveillance de la base par le système de DVT. L'objectif de cette activité est que les différents points de la base soient régulièrement surveillés par un engin, soit de manière homogène sur toute la base, soit en donnant une priorité à certaines zones en fonction du contexte opérationnel. Dans le cadre de cette activité, l'opérateur doit percevoir et évaluer l'état de surveillance de la base (zones ignorées depuis longtemps, *etc.*) et agir en conséquence afin que le système de drones adapte son comportement pour améliorer la surveillance. Afin de juger de l'état de surveillance de la base, l'opérateur dispose de plusieurs moyens d'information : il peut observer le positionnement des DVT sur la base et estimer ainsi un éventuel déséquilibre dans la répartition des drones ; il peut accéder dans l'interface (module de surveillance) aux valeurs moyennes et maximales d'oisiveté calculées pour les différentes zones définies sur la base (zones générales et particulières, exemple : hangars, piste, zone résidentielle) ; il peut enfin accéder à une représentation de la phéromone de visite utilisée par les DVT pour déterminer leurs trajectoires. Cette représentation en dégradé de couleur permet d'identifier visuellement les points les moins visités.

Ces trois moyens correspondent aux trois modes opératoires de la fonction d'observation de l'activité de surveillance. Le niveau 1 correspond au mode dans lequel l'opérateur n'utilise que la position des drones pour juger de leur bonne répartition. Au niveau 10, il n'utilise que les informations calculées de moyenne et de maximum par zone. Enfin, à un niveau intermédiaire, évalué à 6, l'opérateur peut afficher la grille au delà d'un certain seuil d'oisiveté afin de faire apparaître clairement les zones négligées.

À partir des informations de couverture et des ses connaissances liées au contexte opérationnel, l'opérateur a la possibilité d'ajuster la priorité de certaines zones logiques sur la base. Une priorité augmentée pour une zone a pour conséquence que les DVT y reviendront plus régulièrement, elle sera donc plus souvent surveillée et donc mieux surveillée. Cette modification

de priorité passe par une modification locale du taux d'évaporation de la phéromone de visite. Cette possibilité d'intervention « en amont » sur le déploiement des DVT correspond à un niveau 3 d'autonomie sur la fonction d'ajustement de l'évaporation. Ce niveau est noté à 3 car l'opérateur a un choix restreint en termes de nombre de zones et de niveaux de priorité.

En ce qui concerne le déploiement des DVT, seuls deux niveaux sont disponibles : automatique au niveau 10 si les DVT suivent l'algorithme de phéromone ; et manuel au niveau 1 si l'opérateur assigne des positions au engins par le biais de balises sur l'interface. Toutefois, ces deux modes peuvent être actifs en même temps : si l'opérateur assigne un sous-groupe de DVT à un ensemble de positions, les autres DVT continuent de déterminer leur comportement en fonction de la phéromone.

## 4 Poursuite

### 4.1 Poursuite autonome

Patrouiller l'environnement pour repérer les intrus n'est pas suffisant pour assurer leur interception. Lorsqu'un intrus est détecté, et partant du principe qu'il aura alors tendance à essayer de s'enfuir ou de se dissimuler, il devient nécessaire de le poursuivre. Il s'agit alors de continuer la recherche dans une zone restreinte si le contact venait à être perdu. Ainsi, lorsqu'un drone perçoit un intrus, il dépose un second type de phéromone (appelé phéromone d'alarme) qui se diffuse localement. Cette diffusion représente un disque de probabilité de présence de l'intrus que les drones vont explorer pour le retrouver (*cf.* fig. 5). Ainsi, dès qu'un drone perçoit de la phéromone d'alarme, il la consomme en remontant son gradient. En conséquence, les drones remontent jusqu'au point d'émission du signal avant de consommer les isolignes du champ de phéromone formé.

La propagation de l'information à travers l'environnement permet également d'attirer d'autres drones passant à proximité sur la zone de recherche afin d'augmenter les chances de retrouver les intrus avant qu'ils ne s'éloignent trop. Il faut cependant veiller à régler correctement le coefficient de diffusion afin de ne pas mobiliser trop de drones et de ne pas laisser une partie de l'environnement sans surveillance (ceci étant fait expérimentalement pour chaque environnement).





FIG. 5 – Illustration de l'utilisation de la phéromone d'alarme par un drone.

Le processus d'évaporation joue également un rôle important puisqu'il détermine la durée de vie d'un signal d'alarme. En effet, si le signal disparaît avant que les drones n'aient consommé l'ensemble de la phéromone ceux-ci reprennent la tâche de patrouille sans avoir pu exploiter pleinement la trace laissée préalablement. À l'inverse, il est inutile et même pénalisant de conserver une information obsolète qui mobilisera des agents pour retrouver un intrus qui s'est déjà éloigné de la zone de recherche. Nous avons pu établir analytiquement la valeur  $Q_{max}$  et le taux d'évaporation pour dimensionner efficacement la propagation de la phéromone d'alarme.

Nous définissons un second mode de surveillance, complémentaire aux drones, qui est basé sur l'utilisation d'un réseau de capteurs (comme proposé par exemple dans [10]). En effet, le nombre de drones nécessaires pour patrouiller l'environnement à haute fréquence risque d'être très important et donc trop coûteux. Ainsi des capteurs peuvent être dispersés sur l'environnement (*cf.* fig 1) ou placés sur une frontière. Ceux-ci peuvent individuellement déclencher une alerte, en déposant une quantité de phéromone d'alarme. Les drones peuvent exploiter indifféremment ces alarmes de celles qu'ils déclenchent pour réaliser ces poursuites.

Nous ne développons pas ici la présentation des performances du système lorsqu'il est 100% autonome pour nous concentrer dans la section suivante sur l'interaction entre opérateur et essaim de drones.

## 4.2 Modes opératoires

Lorsqu'une alarme est levée sur la base, l'activité de l'opérateur change : il passe d'une activité de surveillance à la poursuite d'intrus potentiels qui auraient pénétré dans le périmètre.

Le rôle de l'opérateur dans cette activité de poursuite est double :

- il doit analyser, identifier, interpréter et classer les contacts (alarmes). En effet, il peut se produire des fausses alarmes (panne, fausse manipulation, animal, *etc.*). Mais une alarme peut aussi faire partie d'une intrusion multiple et coordonnée en différents points de la base, et la compréhension rapide d'un tel scénario est vitale ;
- il doit superviser le déploiement des DVT qui ont pour tâche de rechercher et de localiser les intrus afin de les identifier, ce qui permettra de les neutraliser.

L'interface du démonstrateur SMAART assiste l'opérateur dans ces deux rôles déclinés sur quatre fonctions : détection des alarmes, formation des contacts ; classification des contacts en intrusions ; décision de déploiement des DVT pour la poursuite.

La première fonction consiste en une agrégation automatique des alarmes (sur la base d'un seuil temporel et d'un seuil spatial). Ainsi, plutôt que de faire remonter plusieurs alarmes si plusieurs intrus sont détectés au même moment au même endroit, un seul événement est présenté à l'opérateur. Ceci évite la prolifération d'informations relatives au même événement. Cette fonction n'a qu'un seul mode, évalué à 8 car bien qu'il soit automatisé, l'opérateur peut tout de même avoir accès au détail des alarmes qui composent un contact.

La fonction de gestion des intrusions permet à l'opérateur de classer et d'organiser les contacts survenus. Cela permet de représenter dans l'interface l'hypothèse qu'un certain nombre de contacts séparés dans le temps et dans l'espace sont en fait liés au même intrus ou groupe d'intrus (voir figure 6). Afin de déterminer quels contacts doivent être liés à quels autres au sein d'une intrusion, un algorithme calcule la vraisemblance des différentes hypothèses : il s'agit d'un intrus jamais détecté, ou bien c'est l'intrus de l'intrusion 1, 2, 3, *etc.* Au niveau noté 2-4 de la fonction d'intrusion, le système propose pour chaque contact le choix entre les différentes hypothèses classées par ordre de vraisemblance (d'où le 2-4, sans le classement il s'agirait d'un niveau 2). Au niveau 8 le système applique le choix le plus vraisemblable, et à un niveau intermédiaire 6, l'opérateur dispose d'un délai pour faire le classement lui-même avant que le système n'applique le choix le plus vraisemblable.



FIG. 6 – Représentation d’une intrusion : plus un camembert est plein plus le contact est récent

De même que pour le déploiement dans l’activité de patrouille (section précédente), l’opérateur dispose de deux modes non exclusifs aux niveaux 1 et 10 : les DVT sont dirigés manuellement par des balises ou bien suivent l’algorithme de phéromone (ici phéromone d’alarme). Toutefois, l’activité de poursuite compte un mode intermédiaire supplémentaire évalué à 5. Il correspond à la possibilité de diriger les DVT sur des objets intermédiaires : des contacts ou des intrusions. Ainsi il est possible de diriger un ou plusieurs DVT sélectionnés sur un contact, mais aussi d’affecter un groupe de DVT à une intrusion, auquel cas les engins se répartissent le long de l’intrusion en privilégiant les zones les plus récentes.

## 5 Expérimentations avec opérateurs

### 5.1 Protocole expérimental

Afin d’évaluer l’efficacité des différents modes opératoires développés dans SMAART pour aider l’opérateur dans son travail, une série d’expérimentations a été menée.

**Sujets.** Les sujets sont huit élèves officier de l’École Navale de Lanvéoc-Poulmic âgés de 20 à 23 ans. Ils sont anonymisés et seulement identifiés par un chiffre qui correspond au numéro de leur session et une lettre qui correspond au poste qu’ils occupaient dans la salle (*a* ou *b*)

**Scénario expérimental.** L’objectif des expérimentations est d’évaluer le dispositif dans le cadre des deux principales activités supportées : la surveillance de la base et la poursuite des in-

trus. Pour ce faire, le scénario de cinquante minutes auquel sont confrontés les sujets est divisé en trois parties : une première partie de simple surveillance, puis déclenchement d’une fausse alarme qui permet à l’opérateur de se familiariser avec les opérations de poursuite, et enfin un scénario d’intrusion sérieuse par six intrus répartis en trois binômes.

Pour effectuer ce scénario, les opérateurs disposent d’un réseau de capteurs disposés tous les trente mètres le long de la clôture de la base et d’un ensemble de 10 DVT qui décollent de leur base au démarrage de la simulation.

**Données qualitatives.** Suite aux cinquante minutes d’expérimentation, chaque sujet est soumis à un entretien avec l’expérimentateur, guidé par un questionnaire. Ces questions attendent des réponses nuancées entre oui et non, transposées entre  $-1$  et  $+1$ . Cet entretien est également l’occasion de recueillir des commentaires « libres » des sujets sur le système. Bien que ces commentaires soient précieux dans une démarche d’amélioration du système (boucle de conception centrée-utilisateur) nous ne les présenterons pas en détail dans cet article mais nous les évoquerons dans la section 6.

Durant l’activité de chaque sujet sur le scénario expérimental, un certain nombre de paramètres sont enregistrés par le système. Ces données sont de trois ordres :

1. mesure de la performance de la surveillance de la base sous la forme de l’oisiveté moyenne à chaque pas de temps de la simulation ;
2. enregistrement daté des actions de l’opérateur sur l’interface ;
3. enregistrement de l’action des intrus : interception, atteinte de points de ralliement ou d’objectif.

Afin d’évaluer l’influence de l’action de l’opérateur par rapport à l’action des automatismes seuls, le SMA a été confronté au même scénario sur une douzaine de sessions différentes sans opérateur. Les performances moyennes sur ces sessions servent de référence pour évaluer l’action de l’opérateur sur (1) la surveillance (mesurée par l’oisiveté moyenne sur la base) ; (2) la poursuite (mesurée par le nombre d’intrus qui atteignent leur objectif).

### 5.2 Performance de la surveillance

La figure 7 permet de comparer la performance de la surveillance du SMA seul (trait gras) avec



la performance de l'action des différents sujets (traits fins continus et pointillés).

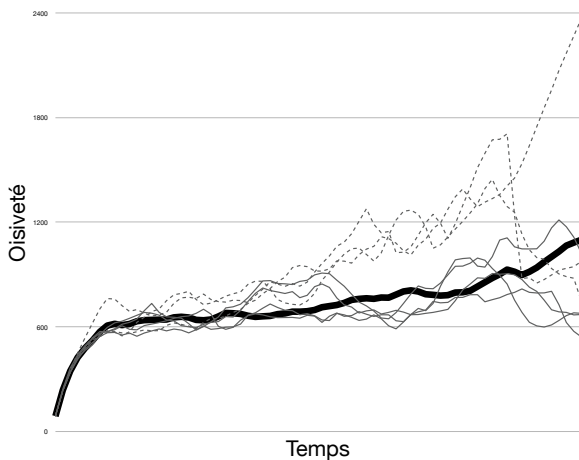


FIG. 7 – Comparaison de la performance en surveillance sur une heure, avec et sans opérateur (une valeur basse d'oisiveté indique une meilleure performance).

Deux phases apparaissent sur ce graphique : (1) durant les premières vingt minutes, il n'y a pas d'intrusion, le seul objectif est de minimiser l'oisiveté des différents points de la base ; (2) sur la deuxième moitié de la session, des intrus pénètrent sur la base et les DVT doivent les intercepter.

Sur la première phase, on observe que les performances des opérateurs sont très proches de la performance du SMA seul (10 DVT). Certains sont meilleurs, d'autres moins bons, mais la marge est faible. Cette observation est à mettre en rapport avec certains résultats du questionnaire. Les sujets jugent en effet moyennement bonne (0,5 sur une plage de -1 à +1) la performance du SMA pour la surveillance et sont unanimes pour juger l'intervention humaine utile, pourtant certains sont moins performants que le SMA seul.

Dans la deuxième phase, la poursuite des intrus a potentiellement un impact sur la surveillance puisque le comportement des DVT est en partie changé. On constate cet effet aussi bien avec que sans opérateur. Toutefois pour trois des huit opérateurs (X3a, X4a, X4b, en pointillés sur la figure 7), la dégradation de la surveillance est bien plus marquée. Ces opérateurs ont massivement mobilisé les DVT pour la poursuite des intrus, laissant ainsi le reste de la base sans surveillance. Pour autant, les résultats du tableau 2 nous indiquent que si X3a est le meilleur « in-

tercepteur », X4a et X4b sont parmi les moins bons. L'intervention massive de l'opérateur sur le système ne semble pas être un facteur de performance significatif.

### 5.3 Performance de l'interception

Le tableau 2 montre les résultats des intrus lors des sessions avec opérateur. En moyenne, seuls 2,1 intrus sur six (écart-type : 0,7) ont réussi à atteindre leur objectif. En revanche, si le SMA seul est confronté au même scénario, 3,4 intrus en moyenne sur six (écart-type : 1,1) atteignent leur objectif.

TAB. 2 – Succès des intrus (A1, A2, B1, B2, C1, C2) pour chaque sujet.

	A1	A2	B1	B2	C1	C2	Nbr succès
X1a	X	-	-	-	X	X	3
X1b	-	X	-	-	X	-	2
X2a	-	X	-	-	-	X	2
X2b	-	-	-	X	-	X	2
X3a	-	-	-	-	-	-	0
X3b	X	X	-	-	-	-	2
X4a	X	X	-	X	-	-	3
X4b	-	-	X	X	X	-	3

On constate ici un apport significatif de l'intervention de l'opérateur sur la performance du système. La compréhension globale qu'a l'opérateur de la situation lui permet d'amener les agents dans des positions où leur comportement local sera le plus efficace pour l'interception. L'analyse des actions sur l'interface nous apprend que seuls deux sujets (X1b et X2b) ont utilisé le mode intermédiaire de niveau 5 en dirigeant des drones par le biais de contacts ou d'intrusions (voir section 4.2), les autres ont uniquement désigné des points (balises) directement sur la carte – à la souris – pour déployer les drones.

## 6 Analyse et perspectives

Nous n'avons présenté dans cet article qu'une partie des résultats des expérimentations SMAART, il manque notamment les résultats complets des entretiens « libres » qui ont donné des pistes intéressantes pour de futurs développements. Nous pouvons tout de même tirer deux résultats principaux de ces expérimentations et les mettre en relation avec certains éléments issus des entretiens.

## 6.1 Complexité de l'interprétation pour l'opérateur

Les opérateurs humains ont très nettement des difficultés à juger de l'efficacité d'un algorithme fondé sur l'utilisation de phéromones pour la patrouille. Ceci est mis en évidence par la contradiction entre les performances mesurées et l'appréciation des sujets (les actions de certains sujets ont même dégradé les performances). Pour autant la présence de l'opérateur reste nécessaire : par exemple des « îlots » de phéromones peuvent rester inexplorés temporairement à cause du traitement local des agents.

Ces difficultés d'interprétation d'une grille de phéromone (la majorité des sujets ont gardé la grille affichée durant toute la session) peuvent sans doute être en partie levées avec l'entraînement et la formation des opérateurs. Toutefois il reste nécessaire de développer des outils qui permettent à l'opérateur de savoir si l'algorithme se trouve dans un mode de fonctionnement normal ou s'il est face à un « piège » (*i.e.* îlot) qui nécessite l'aide de l'humain : la présentation de la grille, même filtrée ne suffit pas.

## 6.2 Vers une extension des modes de contrôle

Sur une tâche ponctuelle, localisée et urgente comme l'interception d'intrus, l'intervention de l'opérateur apporte un important gain de performance. Les sujets ont été par exemple capables de positionner les DVT sur les trajets présumés des intrus afin de les intercepter. Une fois positionnés, les DVT sont bien guidés par la phéromone, mais s'ils la consomment sans détecter d'intrus, ils s'éloignent pour continuer la surveillance. Ce comportement a obligé les opérateurs à répéter des ordres afin de maintenir les engins sur une certaine zone une fois la phéromone disparue. Ces difficultés exprimées par les opérateurs appellent l'introduction de nouveaux modes de contrôle dédiés à l'interception. Il serait par exemple intéressant d'introduire la possibilité de restreindre un sous-groupe d'agents à une certaine zone géographique tout en maintenant leur comportement autonome. Cela reviendrait à ajouter une composante de contrôle par *politique* au système. De telles zones pourraient même évoluer en fonction de la vitesse et de la direction probable d'un intrus.

## 7 Conclusion

Nous avons abordé dans cet article le problème du partage d'autorité entre un opérateur et un essaim de drones réalisant des tâches de patrouille et de poursuite. Dans ce cadre, nous avons proposé une extension de l'algorithme EVAP [7] pour l'adapter à des drones en environnement continu. Le modèle proposé repose sur le double marquage de l'environnement par des phéromones de visite (pour la patrouille) et d'alarme (pour la poursuite et l'interception), et l'utilisation d'un réseau de capteurs. En définissant une gamme de modes opératoires pour ces tâches, nous avons mis en lumière deux types d'interaction possibles avec un système auto-organisé : direct ou indirect selon que l'on interagit avec l'environnement ou non. Les expérimentations menées avec des opérateurs sur le démonstrateur SMAART ont montré que le partage d'autorité proposé permet d'améliorer les performances du système seul. Toutefois, cette amélioration n'est pas systématique, et met en évidence l'enjeu important de la compréhension par un sujet humain du fonctionnement d'une intelligence en essaim.

## Remerciements

Cette étude s'est déroulée dans le cadre d'un contrat de Recherche Exploratoire et Innovation (REI) financé par la Délégation Générale pour l'Armement (DGA), Mission pour la Recherche et l'Innovation Scientifique (MRIS).

Nous voudrions ici remercier chaleureusement tout d'abord Messieurs Christophe Claramunt, Thomas Devogele et Cyril Ray pour avoir permis que ces expérimentations aient lieu, mais ensuite – et bien sûr – les élèves dont la bonne volonté et l'enthousiasme ont été précieux.

## Références

- [1] R. Beckers, O.E. Holland, and J.-L. Deneubourg. From local actions to global tasks : stigmergy and collective robotics. In *Artificial Life IV : Proc. of the 4th Int. Workshop on the synthesis and the simulation of living systems, third edition, MIT Press*, 1994.
- [2] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz. *Swarm Intelligence : From Natural to Artificial Systems*. New York, Oxford University Press, 1999.
- [3] H. Chu, A. Glad, O. Simonin, F. Sempe, A. Drogoul, and F. Charpillet. Swarm approaches for the patrolling problem, information propagation vs. pheromone evaporation. In *ICTAI'07 IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, pages 442–449, 2007.

- [4] M. L. Cummings and P. J. Mitchell. Operator scheduling strategies in supervisory control of multiple UAVs. *Aerospace Science and Technology*, 2006.
- [5] S. Dixon and C. Wickens. Control of multiple-UAVs : A workload analysis. In *Proceedings of the 12th International Symposium on Aviation Psychology*, 2003.
- [6] M.C. Dorneich, S. D. Whitlow, C. A. Miller, and J. A. Allen. A superior tool for airline operations. *Ergonomics in Design*, 12(2) :18–23, 2004.
- [7] A. Glad, H. Chu, O. Simonin, F. Sempé, A. Drogoul, and F. Charpillat. Méthodes réactives pour le problème de la patrouille, informations propagées vs. dépôt d'informations. In *14eme journées Franco-phones sur les Systèmes Multi-Agents*, pages 23–32, 2007.
- [8] R. Goldman, C. Miller, P. Wu, H. Funk, and J. Meisner. Optimizing to satisfy : Using optimization to guide users. In *Proceedings of the American Helicopter Society's International Specialists Meeting on Unmanned Aerial Vehicles*, Chandler, AZ, January 18-20 2005.
- [9] C. Johnson. Inverting the control ratio : Human control of large, autonomous teams. In *Proceedings of AAMAS'03 Workshop on Humans and Multi-Agent Systems*, 2003.
- [10] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. J. Pister. Next century challenges : Mobile networking for "smart dust". In *International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*, pages 271–278, 1999.
- [11] F. Lauri and F. Charpillat. Ant colony optimization applied to the multi-agent patrolling problem. In *IEEE Swarm Intelligence Symposium*, 2006.
- [12] F. Legras and G. Coppin. Autonomy spectrum for distributed systems. In *Proceedings of COGIS'07*, Stanford, USA, 2007.
- [13] K. L. Myers. Advisable planning systems. In A. Tate, editor, *Advanced Planning Technology*, Menlo Park, CA, 1996. AAAI Press.
- [14] L. Panait and S. Luke. A pheromone-based utility model for collaborative foraging. In *Proc AAMAS'04*, pages 36–43. ACM, 2004.
- [15] R. Parasuraman, T. Sheridan, and C. Wickens. A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A : Systems and Humans*, 30(3), 2000.
- [16] H. Santana, G. Ramalho, and R. Bohndana V. Coruble. Multi-agent patrolling with reinforcement learning. In *the 3th international Joint Conference on autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, pages 1122–1129, 2004.
- [17] Paul Scerri, Katia Sycara, and M. Tambe. Adjustable autonomy in the context of coordination. In *AIAA 3rd "Unmanned Unlimited" Technical Conference, Workshop and Exhibit*, 2004.
- [18] R. Simmons, D. Apfelbaum, D. Fox, R. Goldman, K. Haigh, D. Musliner, M. Pelican, and S. Thrun. Coordinated deployment of multiple heterogeneous robots. In *Conference on Intelligent Robotics and Systems*, Takamatsu Japan, 2000.
- [19] I. Wagner, M. Lindenbaum, and A. Bruckstein. Co-operative covering by ant-robots using evaporating traces. In *Technical report CIS-9610, Center for Intelligent Systems, Technion, Haifa*, 1996.
- [20] C. Wickens, S. Gordon, and Y. Liu. *An Introduction to Human Factors Engineering*. Longman, New York, 1998.
- [21] M.S. Wilson and M.J. Neal. Diminishing returns of engineering effort in telerobotic systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A :Systems and Humans*, 31(5) :459–465, September 2001. Special Issue on Socially Intelligent Agents - The Human in the Loop.
- [22] P. Zigoris, J. Siu, O. Wang, and A. Hayes. Balancing automated behavior and human control in multi-agent systems : a case study in Roboflag. In *Proceedings of the American Control Conference*, pages 667–671, 2003.