

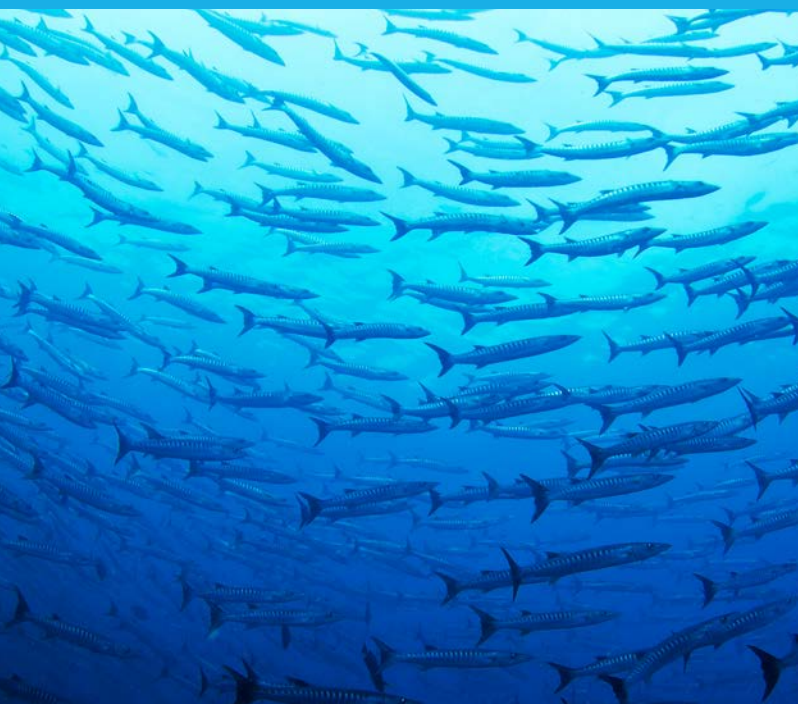


Les essaims de robots
Dossier de recherche

INTRODUCTION

Le concept d'essaimage n'est pas nouveau. On trouve des essaims dans la nature : bancs de poissons (pour la recherche de nourriture et la défense contre les prédateurs), colonies d'abeilles (reproduction) et volées d'oiseaux (recherche de nourriture et migration). L'essaimage est également une tactique militaire de longue date, dans laquelle plusieurs unités convergent pour attaquer une cible à partir de plusieurs axes et de manière délibérément structurée et coordonnée. Mais un nouveau type d'essaims se profile à l'horizon : les essaims robotisés.

Suivant l'exemple du secteur civil et commercial, les organisations militaires investissent de plus en plus dans des essaims de systèmes robotiques. Cette technologie va progressivement faire son entrée sur le champ de bataille et pourrait y apporter des changements qui perturberaient la conduite des opérations militaires.



QU'EST-CE QU'UN ESSAIM ?

Les démonstrations d'essaims font souvent les gros titres des médias grand public, en particulier lorsqu'elles impliquent un grand nombre d'unités robotisées.

Le comportement des essaims repose sur l'utilisation de règles locales et de robots relativement simples qui, lorsqu'ils sont organisés en groupe, peuvent effectuer des tâches complexes d'une manière dont un seul robot serait incapable, conférant ainsi robustesse et flexibilité au groupe. La description la plus simple d'un essaim de robots est qu'il s'agit d'un essaim composé de **nombreuses unités robotiques (identiques ou différentes) dont seules quelques personnes participent au contrôle**. Il n'y a pas de « nombre magique » : en théorie, les essaims peuvent varier de deux à des milliers d'unités. Chaque unité robotique au sein de l'essaim peut être considérée comme un membre **autonome**, qui réagit en fonction de règles internes et de l'environnement. L'algorithme utilisé pour calculer le « nombre magique » d'un essaim est **distribué**, ce qui signifie que l'algorithme de l'essaim fonctionne séparément sur chaque robot de l'essaim. Pour qu'un essaim soit plus qu'un simple groupe de robots individuels, les robots autonomes qui le composent doivent présenter un **comportement collectif grâce à la collaboration entre les unités individuelles et avec leur environnement** pour effectuer une tâche donnée. Pour parvenir à un comportement collaboratif, une forme de communication permettant l'échange d'informations entre les robots – telles la co-observation ou la signalisation sans fil via Bluetooth ou Wi-Fi – est nécessaire.

Il n'existe pas de définition universelle de ce qu'est un essaim. La signification de ce terme est loin d'être établie, tant au sein de la communauté internationale que du secteur privé, du monde universitaire et des milieux techniques. Tout en étant conscients de ces contextes techniques et politiques, nous proposons, pour les besoins de ce dossier, d'adopter la définition de travail suivante des essaims : **systèmes multi-robots dans lesquels les robots coordonnent leurs actions pour travailler collectivement à la réalisation d'un objectif**.



© shutterstock.com/Jeanne Weston

© shutterstock.com/Andy Dean Photography

POURQUOI LES ESSAIMS SONT-ILS IMPORTANTS DANS LE CADRE DES DISCUSSIONS SUR LE CONTRÔLE HUMAIN ?

La perspective du déploiement d'essaims militaires est réelle, bien qu'ils ne soient pas encore opérationnels et que la technologie soit plutôt fragile. La manière d'inclure une implication humaine dans les essaims à des niveaux efficaces et responsables est un domaine de recherche naissant. Les principaux défis sont liés à la conception et à la mise en œuvre d'interactions homme-machine et machine-machine appropriées. Les chercheurs et les concepteurs ont adopté de nombreuses approches pour inclure une participation humaine dans l'opérationnalisation des essaims. L'implication ou le contrôle humain dans le contexte d'un essaim se réfère généralement au commandement, au contrôle ou à la coordination.

En général, un contrôle direct des unités individuelles d'un essaim serait non seulement contre-productif mais également très probablement impossible. À mesure que le nombre d'unités robotisées dans un essaim augmente, il devient de plus en plus difficile de concevoir une **interaction homme-machine** appropriée. Par conséquent, pour que l'implication humaine reste efficace, elle doit se concentrer de plus en plus sur l'essaim dans son ensemble plutôt que sur ses unités individuelles.

Les essaims d'unités robotisées reposent nécessairement sur des algorithmes pour la formation, la surveillance, l'espace-ment, la trajectoire de vol, la distribution des tâches, l'identification des cibles, etc. Cela signifie que les essaims s'engagent inévitablement dans une **interaction machine-machine**. Les

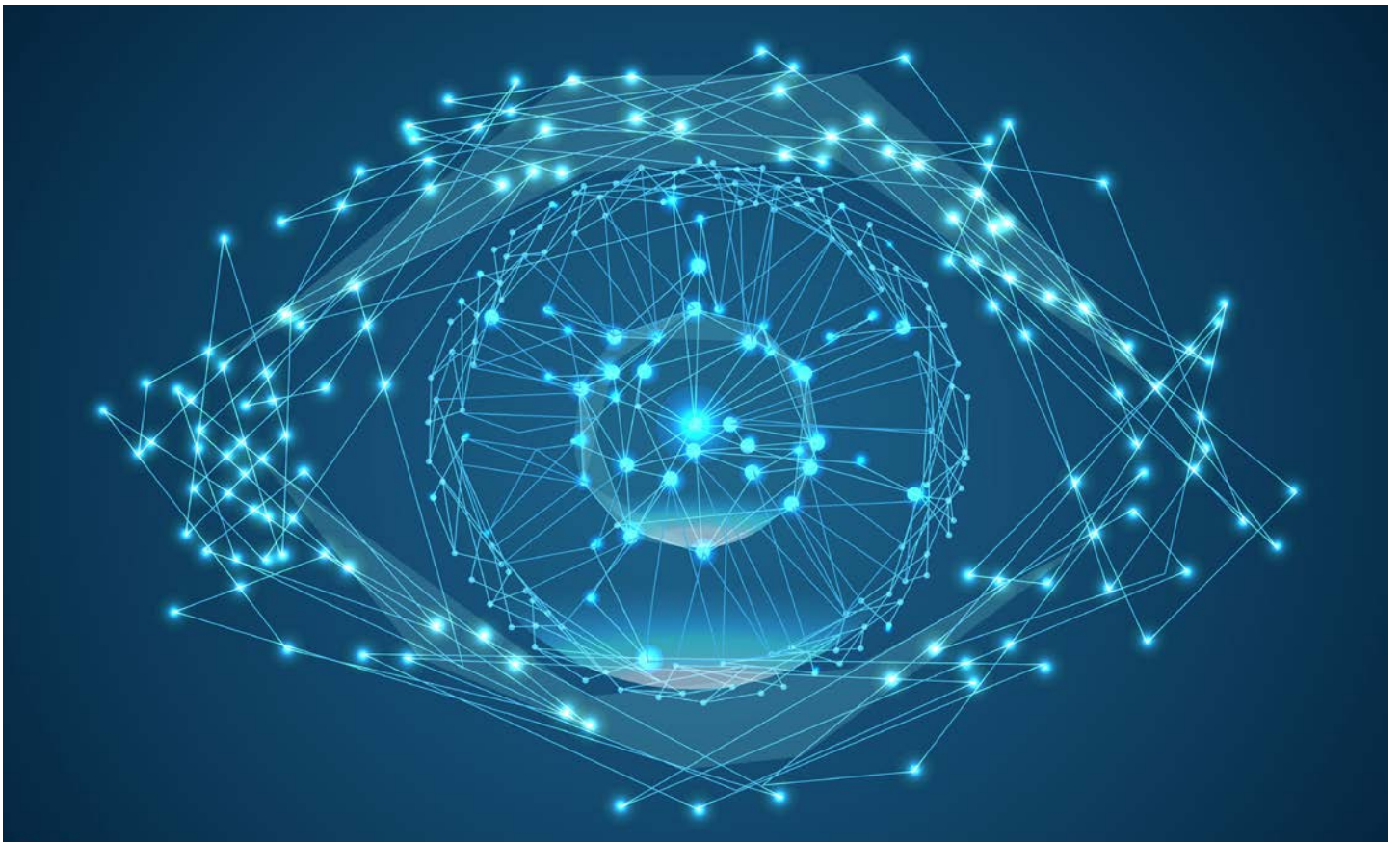
robots individuels interagissent avec d'autres robots de l'essaim pour accomplir une tâche et, grâce à cette interaction, un comportement collectif peut se produire. Ce comportement collectif affectera à son tour la manière dont les humains peuvent commander, contrôler et coordonner le comportement de l'essaim.

Il y a actuellement un manque d'études sur la façon dont les humains peuvent efficacement concevoir et mettre en œuvre des relations homme-machine et machine-machine appropriées et de nombreuses questions restent en suspens. Ces questions appellent des études supplémentaires importantes avant que le potentiel de la robotique des essaims puisse être exploité et que les essaims puissent être déployés de manière efficace et responsable dans des opérations militaires.

L'étude de l'UNIDIR sur les essaims robotiques contribue à combler cette lacune dans la littérature en établissant un lien entre l'élément technique de cette technologie émergente, son utilisation opérationnelle et les implications qui en découlent pour la sécurité internationale et la maîtrise des armements.

VOUS SOUHAITEZ EN SAVOIR PLUS SUR LES ESSAIMS ?

Vous pouvez accéder au rapport complet «*Swarm Robotics: Technical and Operational Overview of the Next Generation of Autonomous Systems*» sur www.unidir.org/publications



COMMANDEMENT

Quels genres d'instructions les humains pourraient-ils donner à un essaim?

Si les essais sont censés, pour la plupart d'entre eux, opérer de manière autonome, ils ne fonctionnent pas dans le vide ou sans instructions. **Les essais robotiques opèrent en fin de compte sur les instructions des décideurs humains.** Ces instructions ou commandements peuvent prendre différentes formes.



Les commandes de bas niveau ont déjà fait leurs preuves dans la robotique des essais, du moins en matière de recherche et développement, d'essais et de simulations. Divers projets ont examiné des méthodes pour commander un essaim en fournissant des **commandes de haut niveau**, tout en déléguant la prise de décision de niveau inférieur aux unités robotiques.



Les robots individuels peuvent être équipés d'une bibliothèque interne qui contient un ensemble de comportements préprogrammés. Dans ce cas, les humains ordonnent à l'essaim d'exécuter un **comportement préprogrammé spécifique**.



Une autre méthode, peut-être plus collaborative, pour commander un groupe d'unités robotisées consiste à **communiquer des plans spécifiques**.



Dans tous les cas, une opération sera limitée par un **ensemble de paramètres**, dont des limitations spatiales ou temporelles. Même si ces paramètres n'influencent pas directement le comportement de l'essaim, ils peuvent limiter le temps et l'espace dans lesquels l'essaim peut opérer et, dès lors, affecter indirectement le comportement de l'essaim en interagissant avec son environnement.



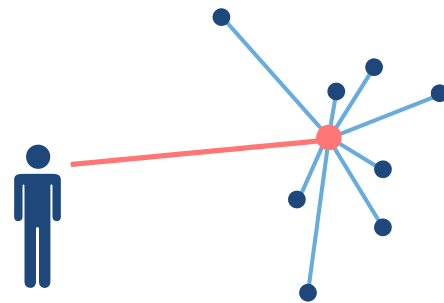
CONTRÔLE

Comment les tâches sont-elles réparties entre les différents robots de l'essaim?



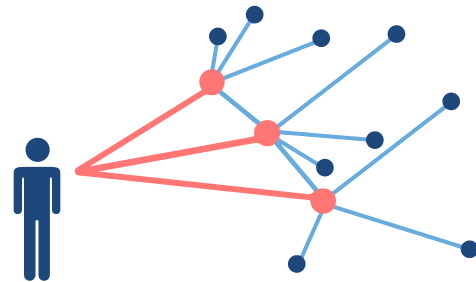
Après avoir reçu des directives émises par l'homme, l'essaim s'appuie sur des algorithmes pour la formation, la surveillance, l'espacement, la trajectoire de vol, la distribution des tâches, l'identification des cibles et bien plus encore. Ces algorithmes, ou « architectures de contrôle », déterminent la répartition des tâches au sein de l'essaim.

Le commandement peut être transmis à un robot qui agit comme un contrôleur central. Cette architecture de **contrôle centralisé** signifie que chaque robot est affecté à une tâche individuelle et qu'il n'y a pas de collaboration directe entre les unités en dehors de celle qui passe par le contrôleur central.



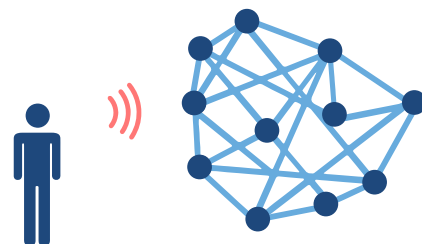
Contrôle centralisé

Un humain peut transmettre des ordres à plusieurs « chefs » dans un essaim. Dans cette architecture de **contrôle hiérarchique**, les robots individuels peuvent être contrôlés par plusieurs agents de niveau inférieur (niveau « équipe »), qui sont à leur tour dirigés par des contrôleurs de niveau supérieur et ainsi de suite.



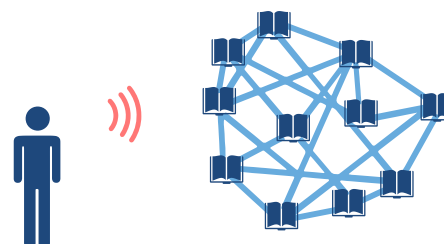
Contrôle hiérarchique

Le contrôle au niveau de l'ensemble est une méthode décentralisée qui permet aux humains de transmettre les instructions à un essaim en tant que groupe unique (et non à certains robots particuliers au sein du groupe). Les robots individuels décident ensuite comment effectuer le commandement.



Contrôle au niveau de l'ensemble

Dans les architectures de **contrôle comportemental**, chaque robot dispose d'une bibliothèque de comportements et les opérateurs commandent au système quel comportement adopter.



Contrôle comportemental



Une fois que les humains ont fourni des commandes à l'essaim (ou à des unités spécifiques au sein de l'essaim) et que les architectures de contrôle ont guidé la manière dont ces commandes seront distribuées, l'essaim doit coordonner son comportement collectif et exécuter les tâches qui lui sont assignées. La manière dont l'essaim exécute les tâches assignées dépend, en partie, de la méthode de coordination.



Les modèles de type « **leader-follower** » désignent une unité robotique comme étant le leader et les autres robots comme étant les suiveurs. Dans ce modèle, les robots se coordonnent en suivant la trajectoire du leader ou le leader peut assigner des tâches spécifiques aux différents robots de l'essaim.



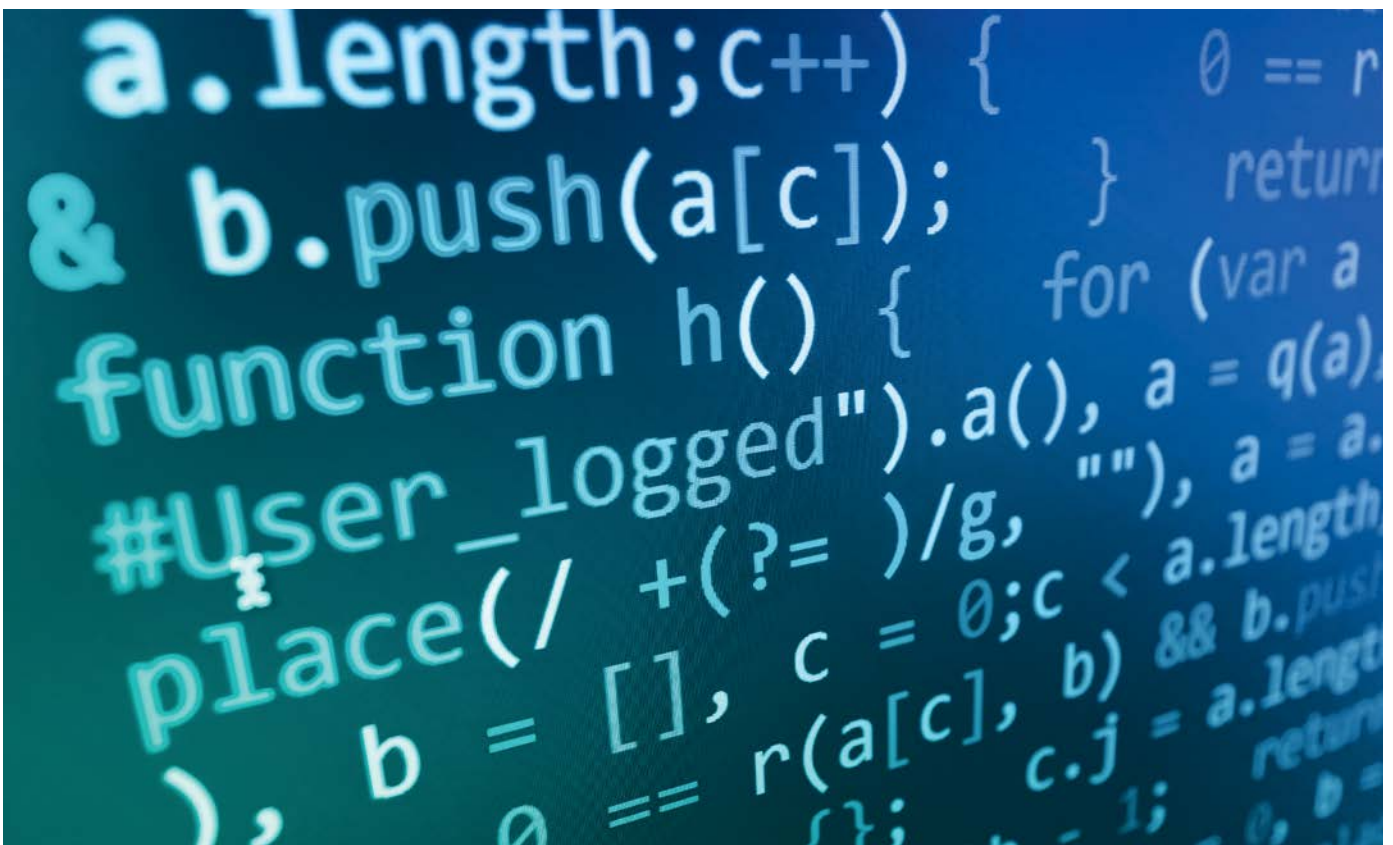
Les **fonctions utilitaires** peuvent être utilisées pour optimiser le comportement de l'essaim: l'essaim reçoit un ordre de haut niveau (un objectif) puis équilibre les coûts et les bénéfices de certaines actions et poursuit l'action considérée comme la plus utile (avec le bénéfice le plus élevé).



Une autre méthode pour coordonner le comportement des essaims est l'utilisation d'**algorithmes de consensus**: des robots individuels communiquent entre eux et convergent vers une solution par le biais de méthodes de vote ou d'enchères.



La **coordination émergente** résulte de l'interaction entre les différentes unités de l'essaim et peut être comparée au comportement des musiciens dans un ensemble de jazz, où les musiciens individuels se coordonnent en réagissant au comportement des autres musiciens du groupe.











ÉTAT DE LA SITUATION

Le déploiement d'essais militaires a le potentiel de changer de manière significative le rôle des humains et la façon dont ils exercent un contrôle sur les systèmes autonomes.

Actuellement, les essais – dans les domaines civil et militaire – sont en cours de développement ou encore en phase d'essai et de démonstration. Dans le contexte militaire, les projets de recherche et développement relatifs aux essais se concentrent principalement sur les applications décrites dans le tableau ci-dessous.

Aucun des projets figurant dans le tableau ne semble avoir atteint le stade opérationnel. Concevoir, développer et tester des essais dans des environnements structurés (par exemple, un laboratoire) ou relativement peu perturbés (par exemple, un espace aérien contrôlé) n'est qu'un début. Le déploiement de cette même technologie dans un environnement non contrôlé, non structuré et potentiellement hostile présente de nombreux autres défis.

Application	Description	Exemples
Renseignement, surveillance et reconnaissance 	Les essais peuvent être chargés de fouiller une zone définie pour y identifier des cibles potentielles par exemple, ou être utilisés pour cartographier de larges zones.	Le projet Perdrix de l'US Strategic Capabilities Office and Naval Air Systems Command et le Distributed and Collaborative Intelligent Systems and Technology Collaborative Research Alliance (DCIST CRA).
Surveillance et protection de périmètres 	Les essais pourraient être utilisés comme systèmes autonomes de surveillance des frontières.	L'initiative de l'Union européenne Roborder; la flotte d'essaimage CARACaS de l'US Office of Naval Research; l'essai de drones de 56 bateaux de la Chine.
Attaques distribuées 	Les essais pourraient être utilisés comme des systèmes d'armes qui se répartissent les cibles entre eux de manière autonome.	Le projet CODE (Collaborative Operations in Denied Environment) de l'US Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA); l'essai Kargu de la société turque STM.
Défense aérienne 	Les essais peuvent être utilisés pour confondre, submerger et neutraliser la défense aérienne ennemie par leur simple nombre.	Le projet de l'Union européenne Suppression of Enemy Air Defence Swarm.
Protection des forces 	Les essais pourraient également être déployés lors de missions autour de convois, de navires ou autres pour protéger des plateformes haut de gamme et les troupes.	Le projet Gremlins de la DARPA et Research Laboratory; le projet de l'US Air Force XQ-58A Valkyrie de l'US Air Force ou « loyal wingman ».
Tromperie 	Les essais peuvent agir comme des leurres, effectuer de fausses manœuvres ou faire croire à l'adversaire que l'essaim est un véhicule beaucoup plus grand se déplaçant dans une zone.	Des tactiques similaires utilisant des leurres ont été déployées par les forces armées israéliennes en République arabe syrienne, faisant croire aux radars syriens que les drones attaquaient des avions. Il n'a cependant pas été confirmé que les drones opéraient en essaims.
Tâches ennuyeuses, sales et dangereuses 	Les essais pourraient également être utilisés pour accomplir des tâches dites « dull, dirty and dangerous » (ennuyeuses, sales et dangereuses), comme la recherche et l'élimination des mines.	Robots autonomes de détection des mines terrestres en essaim; robots miniatures de Rolls-Royce capables d'effectuer les inspections visuelles de moteurs.
Lutter contre les autres essaims 	Étant donné la disponibilité mondiale de petites plateformes robotiques (en particulier les véhicules aériens tels que les avions de loisir), les essais ont été proposés comme techniques pour contrer d'autres essaims ennemis.	Les expériences anti-essaims de l'US Naval Postgraduate School menées par l'Advanced Robotic Systems Engineering Laboratory (ARSENL).

A propos de l'UNIDIR


L'Institut des Nations Unies pour la recherche sur le désarmement (UNIDIR) est un institut autonome au sein des Nations Unies, financé par des contributions volontaires. L'UNIDIR est l'un des rares instituts politiques au monde à se concentrer sur le désarmement. Il développe les connaissances et promeut le dialogue et l'action en matière de désarmement et de sécurité. Basé à Genève, l'UNIDIR aide la communauté internationale à développer des idées pratiques et innovantes nécessaires à l'élaboration de solutions aux problèmes critiques de sécurité.

Ce domaine de recherche du Programme Sécurité et Technologie est soutenu par les gouvernements de l'Allemagne, de la Norvège, des Pays-Bas et de la Suisse.

www.unidir.org

 @unidirgeneva

 @UNIDIR

 un_disarmresearch

Les auteurs: Merel Ekelhof et Giacomo Persi Paoli

Les contributions à cette publication ont été tirées de:
Ekelhof, Merel, & Giacomo Persi Paoli. 2020. *Swarm Robotics: Technical and Operational Overview of the Next Generation of Autonomous Systems*. Geneva: United Nations Institute for Disarmament Research.

Ekelhof, Merel. 2019. *The Distributed Conduct of War: Reframing Debates on Autonomous Weapons, Human Control and Legal Compliance in Targeting*. Dissertation. VU University Amsterdam.

Création: Kathleen Morf, www.kathleenmorf.ch

Photo: Couverture avant et arrière: © istockphoto.com/4X-image

Icônes: © iconfinder.com

