



Académie des technologies

Réflexions sur la robotique militaire

Communication présentée à l'Académie
en juillet 2013



Imprimé en France
ISBN : 978-2-7598-1702-3

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2015



PARTICIPANTS

**Ce rapport a été rédigé par Jean-Pierre Marec dans le cadre
du groupe de travail « Vers une technologie de la conscience ? »
de l'Académie des technologies :**

Membres de l'Académie :

Laurent ALEXANDRE	Jean-Claude MILLET
Sigrid AVRILLIER	Paul PARNIÈRE
Alain BERTHOZ	Dominique PECCOUD
Danièle BLONDEL	Marc PÉLEGRIN
Philippe COIFFET (co-président)	Pierre PERRIER
Michel FRYBOURG	Gérard SABAH (président)
Jean-Pierre MAREC	Erich SPITZ
Roland MASSE	

Membre extérieur à l'Académie :

Claude MANGEOT

Qu'ils soient ici particulièrement remerciés de leur contribution à la constitution de ce rapport. Remerciements aussi à François Lefaudeux, membre de l'Académie, qui a relu le tapuscrit et l'a mis en forme avant transmission à l'éditeur.

|





PRÉFACE

L'Académie des technologies aborde pour la première fois avec cette communication des questions relatives aux technologies dites militaires. « Dites militaires », car il s'agit, dans le cas des drones comme dans bien d'autres, plutôt des applications à des fins militaires de technologies également utilisées à des fins civiles, ceci que l'essentiel de l'effort de développement ait été supporté par des budgets militaires ou par des budgets civils. En l'occurrence, le développement des drones doit effectivement beaucoup à l'expression des besoins des armées de quelques pays particuliers.

Les drones (appellation le plus souvent réservée aux engins autonomes aériens), et leurs équivalents pour les milieux terrestres et marin (surface et sous-marin) ont aussi de nombreuses applications civiles. Les plates-formes sont ~~très~~ souvent très voisines, les différences portant surtout sur les équipements embarqués. Les usages militaires se sont développés plus anciennement et, surtout, de manière plus visible que les usages civils, c'est une première raison de l'intérêt porté à ces usages par l'académie.

L'usage militaire des drones et autres robots pose des problèmes éthiques aigus, dans une large mesure distincts de ceux que va poser l'explosion prévisible des usages civils des drones aériens et des robots terrestres. Les applications civiles



dans le domaine maritime sont déjà nombreuses, mais essentiellement dans des domaines ne posant pas de problèmes éthiques particuliers (travaux sous-marins).

Ces deux raisons expliquent pourquoi l'Académie, dans une première communication consacrée pour une grande part à l'examen des notions « d'intelligence » et de « conscience » des robots, se penche dans ce deuxième volet sur leurs applications militaires en faisant une large place aux difficiles questions d'éthique que pose cet usage. Le troisième volet de ce triptyque sera consacré à une catégorie bien spécifique des usages civils des robots, celui des robots domestiques dits de compagnie, domaine choisi là aussi en raison des problèmes particuliers d'éthique que pose ce type d'usage.

Alain Bugat,
Président de l'Académie des technologies



RÉSUMÉ

Les robots militaires existent et sont de plus en plus utilisés sur différents théâtres d'opérations et dans les différents milieux : air (drones), mer, terre et, peut-être bientôt, espace. Leur marché est en forte croissance.

Employés pour l'observation, la reconnaissance, le déminage, voire le tir (par exemple : drones armés), ils présentent en effet l'avantage d'éloigner le « combattant » du champ de bataille, de réduire ainsi les pertes amies et d'être en principe récupérables, ce qui les distingue formellement des armes connues telles que missiles et torpilles. De plus, des réductions de coûts du matériel peuvent être espérées du fait de ne pas avoir à satisfaire aux contraintes liées à la présence humaine à bord. Les drones aériens permettent également une permanence sur site (jusqu'à plusieurs jours) qu'un aéronef piloté ne pourrait pas assurer.

Ces robots posent cependant des problèmes d'éthique importants et originaux par rapport aux autres armements, surtout lorsqu'ils sont dotés d'une grande autonomie (d'action), y compris pour l'ouverture du feu. Leur complexité peut conduire à une certaine imprévisibilité, responsable d'inadmissibles « bavures ». Leur facilité d'emploi, associée à une certaine « invulnérabilité » du servant liée à l'éloignement, peut entraîner des excès de violence : on parle de *joy-stick war* pour une guerre assimilable à un jeu vidéo !



Aussi est-il essentiel de bien maîtriser la mise en œuvre de ces robots, à tous les niveaux, depuis la décision politique de développement de l'arme jusqu'à l'utilisation opérationnelle. Il y va de la responsabilité des différents acteurs, et les aspects juridiques sont importants. Pour l'instant, la « responsabilité » du robot lui-même est considérée comme inexistante, mais l'idée que l'on s'en fait pourrait être amenée à évoluer.

En effet, ce robot militaire n'est-il pas déjà doté, en apparence, d'une certaine « conscience » ? Des fonctionnalités de la conscience humaine sont bien déjà présentes chez lui. Certaines méritent d'être développées, par exemple celle de la représentation précise de l'environnement (matériel et humain), notamment de l'identification rigoureuse des cibles, afin d'éviter au maximum les « bavures ». D'autres pourraient être introduites ou au contraire évitées : un robot dépourvu d'« émotions » ou de « sentiments » pourrait, dans certains cas, se montrer plus objectif et respectueux de l'éthique que l'homme. Des méthodes commencent à voir le jour pour améliorer, notamment par apprentissage, la « conscience » (y compris « morale » ?) du robot.



ABSTRACT

Comments on military robotics

Military robots exist and are more and more used on various operation theatres and in the different environments: air (drones), sea, ground and even, maybe soon, space. Their market is rapidly expanding.

Used for observation, reconnaissance, mine clearance and even action (e.g. armed drones), they offer the advantage to position the servant away from the battlefield, thus reducing the friendly losses, and to be theoretically recoverable, unlike missiles or torpedoes. Furthermore, cost reduction of aircraft can be expected owing to the fact that the constraints linked to human presence on board are suppressed. Also, drones allow permanence on site that a piloted aircraft could not provide.

However, these robots raise important and original ethics issues with respect to other armaments, mainly when they are endowed with a great autonomy (of action), including the decision to fire. Their complexity may lead to a certain unpredictability, responsible of unacceptable “blunders”. Their ease of use, associated with a certain “invulnerability” of the servant linked to his remoteness, may result in an excess of violence: one speaks of “joy-stick war” for a war assimilated to a video game!

Thus, it is essential to fully control the use of these robots, at all levels, from the political decision of their development to their operational use. This implies the



responsibility of the different actors, and legal aspects are important. Until now, the robot's own "responsibility" is denied, but this statement may evolve.

Indeed, isn't this military robot already outwardly equipped with a certain "consciousness"? Functional properties of human consciousness are already present in it. Some of them are worth being developed, such as a precise representation of the environment (material and human), including a precise representation of targets, in order to avoid "blunders", as far as possible. Others could be introduced or on the contrary avoided: a robot devoid of "emotions" or "feelings" might, in some cases, act more objectively and ethically friendly than a human being. Methods begin to appear for improving, in particular through self-training, the robot "consciousness" (including "moral" aspects?).



TABLE DES MATIÈRES

01 Introduction

05 La robotique militaire

- 05 Qu'est-ce qu'un robot militaire ?
- 07 Exemples de robots militaires
- 18 Les robots militaires du futur
- 19 Aspects à considérer

57 Les robots militaires ont-ils déjà une certaine « conscience » ?

- 58 Conscience de niveau I
- 60 Conscience de niveau II
- 61 Conscience de niveau III

69 Un supplément de « conscience » pour les robots militaires ?

- 69 Fonctionnalités prioritaires
- 70 Comment améliorer la « conscience » des robots ?



75 Conclusion – Aspects prioritaires

- 80 Réduire l'imprévisibilité du robot militaire
- 81 Garder le sens des responsabilités, malgré la facilité d'emploi
- 81 Maîtriser la situation, face à une complexification croissante
- 82 Tenir compte de l'empathie

83 Références

85 Sigles utilisés

89 Publications de l'Académie



INTRODUCTION

Cette communication à l'Académie des technologies préparée par le groupe de travail « Vers une technologie de la conscience ? », est un complément à la communication à l'Académie de ce même groupe de travail ayant pour titre *Vers une technologie de la conscience ?* [1]¹ dont la substance est supposée connue du lecteur ; un pendant civil à ce document, consacré, lui, aux robots de compagnie, est en préparation. La première communication de ce groupe de travail était volontairement limitée à un traitement générique de la question des robots. Il a paru souhaitable au groupe de travail de compléter cette approche *top-down* par une approche *bottom-up* à partir de certaines des applications possibles, montrant dans chaque cas l'intérêt et l'éventuelle faisabilité de doter le robot d'une certaine forme de « conscience ». Le présent complément et le suivant abordent les aspects pratiques de cette question des robots, en partant chacun d'un domaine d'application très typé.

Compte tenu de l'importance naturellement attachée à la composante « conscience morale » et aux problèmes d'éthique, il a été proposé dans un premier

¹ Les nombres entre crochets renvoient aux références bibliographiques figurant à la fin du présent document.



temps de se limiter, de ce point de vue, aux deux cas extrêmes : le « méchant » robot militaire² et le « gentil » robot de compagnie³. La présente communication à l'Académie des technologies *Réflexions sur la robotique militaire*, complément à la communication citée [1], s'intéresse à cette première catégorie, mais dépasse assez largement le cadre d'une interrogation sur la possibilité de doter les robots militaires d'une certaine « conscience ». Dans ce panorama général, bien d'autres aspects sont également abordés.

Depuis une dizaine d'années, la robotique militaire prend une importance croissante, surtout dans le domaine des drones. Il est envisagé de donner plus d'autonomie (de décision) aux robots militaires, y compris pour le feu. Cela pose de graves problèmes d'éthique. Faut-il donc essayer, dès à présent, de donner plus de « conscience » à ces robots ? Cela est-il possible ?

Par rapport à l'étude [1] qui s'intéresse à la « conscience » en général, et surtout au sens courant de ce terme, il s'agit ici essentiellement de *conscience* « morale », car le choix parmi les moyens permettant de doter le robot de ce « supplément de conscience » devra être davantage orienté vers le bien de l'homme (autant que faire se peut, dans un contexte de conflit !) que vers l'efficacité du robot (qui pourrait en abuser !). Or, cette conscience « morale » fait appel à des notions supplémentaires de civilisation. Pour faire preuve de comportement moral, il faut être doté de conscience, certes, mais la condition n'est pas suffisante !

Fort heureusement, la question de l'éthique des robots militaires a donné lieu récemment en France à une réflexion d'un groupe de travail de l'AACHEAR (Association des anciens auditeurs du centre des hautes études de l'armement) [2] à laquelle il est fait ici de larges emprunts.

Nous nous intéressons dans ce rapport aux véritables robots, laissant de côté les véhicules (terrestres, maritimes, aériens) avec pilote à bord, ainsi que – ce qui est discutable – les missiles (stratégiques ; tactiques ; de croisière, comme le Tomahawk ou l'Apache/Storm Shadow) et les torpilles, systématiquement détruits en fin de course, donc ni récupérables ni réutilisables. Ils présentent pourtant, par les perfectionnements qui leur ont été apportés, bien des aspects communs avec

² *A priori* « dangereux » pour l'ennemi, surtout s'il est armé.

³ *A priori* « inoffensif », bien qu'il puisse poser de délicats problèmes de sécurité !



les robots, notamment sur le plan de l'IHM (Interaction homme « opérateur » - machine) ou de l'autonomie d'action⁴.

Dans ce qui suit, au chapitre 1, après avoir donné quelques exemples de robots militaires, on s'intéressera successivement aux aspects scientifique et technologique, sociologique, économique, éthique, réglementaire et juridique⁵. On s'interrogera ensuite, au chapitre 2, sur l'existence d'une [certaine] « conscience » chez les robots militaires actuels et, au chapitre 3, sur l'intérêt et la possibilité de l'augmenter. Cela conduira à une conclusion et à la définition de quelques priorités.

⁴ On pourrait les considérer comme des robots « kamikaze », les autres robots étant également « mortels », comme les humains, par éventuelle destruction en opération ou simple vieillissement.

⁵ Pour l'innovation, l'Université d'Helsinki utilise l'approche PESTEL prenant en compte les aspects politiques, économiques, sociaux, technologiques, environnementaux et légaux. Si l'environnement ne paraît pas jouer ici un rôle majeur, il n'en est pas de même des décisions politiques présidant au développement et à l'utilisation de ces armes nouvelles.





Chapitre 1

LA ROBOTIQUE MILITAIRE

Il est essentiel, tout d'abord, de bien connaître l'objet auquel on s'intéresse (le robot militaire) avant d'aborder la question de son éventuelle « conscience ».

QU'EST-CE QU'UN ROBOT MILITAIRE ?

En qui concerne l'armement [2], est appelé robot un système d'armes possédant des capacités de perception, de décision, d'action et de communication, parfois capable d'améliorer ses propres performances par apprentissage automatique ou supervisé par des hommes, pour :

- ▶ agir dans un environnement ouvert ou confiné, dynamique et imparfaitement modélisé, voire très mal connu ;
- ▶ exécuter, de façon autonome ou en relation avec des humains, des tâches d'observation, d'exploration, de manipulation et/ou d'intervention sur l'environnement ou sur l'ennemi ;
- ▶ interagir le cas échéant avec d'autres machines (dont des robots) ou avec des êtres humains.

Le robot est généralement récupérable et réutilisable. Traduite en termes militaires, cette définition indique qu'un robot de combat doit être capable de remplir



tout ou partie des quatre fonctions opérationnelles traditionnellement attribuées aux combattants⁶ : observation, orientation, décision, action (OODA). Ses caractéristiques et ses performances peuvent être améliorées et modifiées par bouclage au travers de l'analyse après action (AAA) à court terme et du RETour d'EXpérience (RETEX) à moyen terme.

On peut distinguer plusieurs finalités pour l'emploi militaire des robots, en substitution ou en complémentarité du combattant :

- ▶ améliorer ou étendre (notamment en distance) les performances et les capacités du combattant humain⁷ ; le robot peut être, notamment, équipé de capteurs dépassant les seuls sens humains ;
- ▶ autoriser des missions dans un environnement insupportable ou hostile : températures ou pressions extrêmes, facteurs de charge élevés, atmosphère NRBC⁸, danger immédiat ou inacceptable, etc., ou nécessitant une grande endurance, une répétitivité ou une permanence sur zone vingt-quatre heures sur vingt-quatre, ce qui est déjà le cas avec les drones ;
- ▶ éloigner le combattant de la menace mortelle adverse ; le concept de « zéro mort » (dans les forces amies...), bien que contesté par certaines armées (dans le respect d'une certaine « éthique de la guerre », où le risque est le prix à payer pour le droit d'infliger des pertes à l'adversaire), concrétise la préoccupation croissante des opinions publiques, au moins en Occident, de réduire, voire d'annuler, les pertes des soldats du camp ami.

De façon générale, une distinction doit être faite entre deux catégories de robots militaires :

- ▶ les robots télé-opérés⁹, pour lesquels l'opérateur humain reste présent « dans la boucle » et garde une capacité instantanée (variable suivant le partage de la représentation et de la décision d'action entre le robot et

⁶ Au sens large : du chef d'état-major au simple soldat.

⁷ L'homme « amélioré » ou « augmenté » (par des implants ou prothèses technologiques, voire par des drogues ou des optimisations génétiques), ou le robot doté de certains organes vivants sont ici exclus. Ces sujets sont abordés dans [3].

⁸ NRBC, pour nucléaire, radiologique, biologique ou chimique.

⁹ Il existe plusieurs degrés : télé-pilotage, télé-guidage, etc.

l'opérateur et, en fonction des interfaces homme-machine) de réflexion, de réaction face aux situations non prévues et de décision, notamment pour le déclenchement du feu ;

- les robots autonomes, susceptibles, à partir d'une planification et d'une programmation initiales (du genre « aller détruire le deuxième radôme au point GPS xxx, yyy), d'adapter, dans une certaine mesure, leur action à l'environnement réel, avec des possibilités limitées pour l'homme de reprendre la main.

Cette distinction est très importante du point de vue des responsabilités (voir plus loin) ; elle pose la question de la clarification des rôles, des règles d'engagement et même des métiers militaires tant de la hiérarchique opérationnelle que du contrôle politique. En effet, dans l'usage d'un robot, l'action de se servir de l'objet ne commence-t-elle pas par la décision de sa création, avant même la décision de son utilisation ? Il ne suffit pas de réfléchir aux conditions d'utilisation de ces objets, il faut aussi repenser toute la chaîne allant de la décision de développement à l'emploi. L'utilisation de plus en plus en plus généralisée de ces armements impose de revoir doctrine et concept d'emploi, au vu de l'expérience acquise.

EXEMPLES DE ROBOTS MILITAIRES

Quelques exemples de robots militaires en développement ou en service sont présentés selon l'habituelle classification par « milieu » : terre, mer, air ; mais plutôt que cet ordre classique relatif à l'apparition des armées correspondantes dans l'histoire, nous préférons l'ordre inverse : air, mer, terre et, peut-être un jour¹⁰, espace¹¹, qui respecte mieux la chronologie de l'utilisation, beaucoup plus récente, des robots militaires. Cette limitation volontaire ne doit pas occulter le fait que

¹⁰ Dans un futur sans doute assez proche : l'environnement le plus difficile est l'environnement terrestre, pas les environnements homogènes comme, par exemple, l'espace.

¹¹ Malgré les traités internationaux...



l'usage des drones se développe également rapidement dans la surveillance des espaces nationaux et pas seulement aux fins de protection civile... ce qui ne manque pas de soulever aussi d'importantes questions éthiques.

Air (drones)

Dans le domaine aérien, l'environnement homogène rend relativement facile la conception et l'emploi des véhicules aériens sans pilote ou « drones¹² » [4, 5]. Ils sont déjà largement en service opérationnel, notamment pour les missions de surveillance et de renseignement. Ils se classent en diverses catégories en fonction de paramètres tels que : taille, rayon d'action, altitude, endurance, vitesse, niveau d'emploi (stratégique, « opératif » ou de théâtre, tactique).

Certains ont également été équipés d'armements (drone Predator emportant des missiles Hellfire). Des démonstrateurs de véritables drones de combat armés UCAV¹³, tel le programme européen nEUROn, sont en projet ou déjà réalisés.

Les drones doivent donc être considérés comme des robots à part entière. Il est important de remarquer qu'il faut parler de « système drone », comprenant le « segment air » et le « segment sol » (lancement et récupération, conduite de mission).

Détaillons un peu :

- **Drones miniatures.** Ce sont des drones de dimensions inférieures à 50 cm, essentiellement utilisés pour l'espionnage.
- ▷ **Minidrones.** Dimensions entre 15 et 50 cm. Exemples : REMANTA (Onera), Birotan, projet Bertin...
- ▷ **Microdrones.** Dimensions inférieures à 15 cm. Exemples : mouche-robot d'espionnage ou de détection d'armes chimiques de Robert Wood (Harvard) (projet DARPA¹⁴), 3 cm !
- **Drones à court rayon d'action.** Drones TCP (Très courte portée) ou « drones du capitaine », destinés à « voir de l'autre côté de la colline », à quelques kilomètres. Exemple : EMT Aladin.

¹² Appelés encore UAV : *Uninhabited (ou Unmanned) Aerial Vehicles*.

¹³ UCAV : *Unmanned Combat Aerial Vehicle*.

¹⁴ DARPA : *Defense Advanced Research Projects Agency* (États-Unis).

- **Drones tactiques à moyen rayon d'action.** Utilisés par l'armée de l'air française : CL289 (700 km/h) et Crécerelle (140 km/h). Le drone Crécerelle est en cours de retrait de service et il est remplacé par le SDTI¹⁵ (Système de drone tactique intérimaire) (figure 1).



Figure 1 : Drone SDTI (Système de drone tactique intérimaire) sur lanceur Robonic.

- **Drones maritimes tactiques.** Ils sont capables d'apponer par fort vent sur une plate-forme étroite, partiellement entourée d'obstacles et soumise à des déplacements de grande amplitude, en roulis, en pilonnement et en tangage par mer agitée. Deux démonstrateurs américains : Fire Scout¹⁶ (Northrop Grumman), Eagle Eye¹⁷ (Bell Helicopter) (figure 2). En France : Orka (EADS), Hetel M01 (ETC Industries + bureau d'études Inav).

¹⁵ Le SDTI appartient à la famille Sperwer de la société Sagem. Il équipe l'armée de terre depuis 2005. Le 61^e régiment d'artillerie de Chaumont est le régiment spécialisé dans la mise en œuvre des drones tactiques : le CL 289, le Crécerelle et le SDTI. Le SDTI peut voler 4 h à 80 km de sa base et à la vitesse de 185 km/h. Il a été déployé au Kosovo dès la fin 2007. Il est engagé en Afghanistan depuis novembre 2008, dans le cadre de la FIAS (Force internationale d'assistance et de sécurité).

¹⁶ Fire Scout : masse : 1 150 kg, autonomie : 6 h, rayon d'action : 200 km.

¹⁷ Eagle Eye : convertible développé pour les USCG (*US Coast Guards*, gardes-côtes américains), autonomie : 5,5 h, rayon d'action : 600 km, vitesse : 370 km/h.



Figure 2 : Eagle Eye.

- **Drones à voilure tournante (hélicoptères, convertibles).** En dehors des drones maritimes, il y a le projet Onera RESSAC (Recherche et sauvetage par système autonome coopérant) à partir de l'hélicoptère R-Max (Yamaha) utilisé notamment pour l'épandage agricole.



Figure 3 : Predator emportant un missile Hellfire.

► **Drones à longue endurance**

- ▷ **MALE** (pour moyenne altitude, longue endurance) : altitude : 5 000 à 12 000 m, rayon d'action : 1 000 km, vitesse : jusqu'à 360 km/h, masse : jusqu'à 3,5 t, dimensions : 10 à 15 m
Exemples : Hunter et Heron (Israël Aircraft Industries), Predator¹⁸ (General Atomics, USA) (figures 3 et 4), EADS Harfang¹⁹ (figure 5) utilisé en Libye.
- ▷ **HALE** (pour haute altitude, longue endurance) : dimensions d'un avion de transport de classe A320, autonomie : 10 000 km et plus, altitude : jusqu'à 20 000 m. Masse au décollage : jusqu'à 10 t dont 10 % de CU (charge utile). À rapprocher de l'avion espion U2 ou des avions de renseignement électronique Sigint et des satellites d'observation ou d'alerte. Exemple : Global Hawk (Northrop Grumman) (figure 6).
- ▷ **Drones de combat (UCAV: Unmanned Combat Aerial Vehicle)**. À distinguer des drones armés. Ce sont de véritables avions de combat non pilotés. Aujourd'hui on a expérimenté uniquement des drones de reconnaissance armés, pour l'attaque de cibles d'opportunité, ou sur renseignement (Gaza, Yemen, Waziristan) : un Predator américain a tiré à plusieurs reprises des missiles antichars Hellfire (à guidage laser) et antiaériens Stinger. Mais les projets américains X-45

¹⁸ Predator : drone de reconnaissance/attaque, envergure : 14,8 m, longueur : 8,22 m, hauteur : 2,10 m, masse à vide : 512 kg, masse maximale : 1 020 kg, vitesse maximale : 130 km/h, plafond : 7 600 m, rayon d'action : 740 km, premier vol : 1994, utilisation : Balkans, Afghanistan, Pakistan. La flotte de Predator a passé en avril 2010 le cap du million d'heures de vol qui ont été réalisées en 80 000 missions, dont 85 % en combat ; en avril 2011, utilisation en Libye.

¹⁹ Le Harfang (anciennement Système intérimaire de drone MALE ou SIDM) est un système de drones destiné à équiper l'armée de l'air française en remplacement du Hunter. Aussi nommé *Eagle One*, c'est une réalisation d'EADS et d'IAI (Israel Aircraft Industries). Son nom est inspiré du harfang, une chouette des neiges. Il est basé sur l'appareil israélien IAI Heron conçu au début des années 90. Il a fait son premier vol en 2006 ; mis en service en 2008 il a été utilisé en Afghanistan en 2009. Dimensions : envergure 16,6 m, longueur 9,3 m. Masses : à vide 657 kg, carburant 250 kg, masse maximale au décollage 1 250 kg. Performances : vitesse maximale 207 km/h, plafond 7 620 m, rayon d'action : 1 000 km. La première dotation de l'armée de l'air a été de trois appareils et deux stations au sol.

et X-47²⁰ (Northrop Grumman) (figures 7 et 8) et européen nEUROn²¹ (Dassault Aviation + Saab + HAI) (figure 9) préfigurent les drones de combat futurs, dont les performances et les équipements permettront des missions plus complexes et plus variées.



Figure 4 : Pilotage d'un Predator depuis une station au sol.

²⁰ X-47 Pegasus : drone expérimental, version initiale A (et navale B), premier vol A : 23/02/03 (B : 04/02/11), 2 exemplaires, 1 turboréacteur Pratt & Whitney JT15D de 14 200 N, envergure A : 8,47 m (B : 18,92 m), masse à vide : 1 740 kg, avec armement : 2 212 kg, maximale : 2 678 kg, vitesse maximale : 1 000 km/h, plafond : 12 200 m, rayon d'action 2 800 km, emport potentiel de 2 bombes de 225 kg.

²¹ nEUROn : drone de combat dont le premier vol a été effectué en 2012, turboréacteur avec post-combustion Turboméca-Rolls Royce Adour Mk 951 de 40 kN, envergure : 12,5 m, masse à vide : 4 900 kg, maximale : 6 500 kg, vitesse maximale : 980 km/h (Mach 0,8), plafond : 14 000 m, équipé de 2 bombes guidées laser de 250 kg.



Figure 5 : Le Harfang (anciennement Système intérimaire de drone MALE ou SIDM).



Figure 6 : Global Hawk.



Figure 7 : X-47A Pegasus.



Figure 8 : X-47B Pegasus (version marine).



Figure 9 : nEUROn.

Mer

Dans le domaine maritime, où le milieu est aussi assez homogène, les robots sont classés en deux catégories : les robots sous-marins (autonomes ou télépilotes) et les robots de surface. Leur emploi reste contraint par les limitations des communications et de la localisation, liées aux caractéristiques de la propagation des ondes (électromagnétiques ou acoustiques) en milieu marin ; il correspond essentiellement aux opérations de déminage, ainsi qu'à la surveillance, la protection rapprochée et la lutte anti-sous-marine. Par exemple :

- ▶ Alistar 3 000 (figure 10) de la société ECA, engin sous-marin autonome AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) capable d'effectuer une grande variété de tâches d'inspection sur les champs offshore ultra-profonds sans intervention humaine ;
- ▶ la société ECA propose aussi un robot kamikaze, le Kster ; c'est un ROV (*Remotely Operated Vehicle*) téléopéré depuis la surface, muni d'une petite charge et capable de se diriger vers une mine pour la faire exploser. D'après

nos conventions, comme il est détruit à la fin (kamikaze !), il ne devrait pas être cité, mais il est téléguidé et non pas autoguidé comme les torpilles.

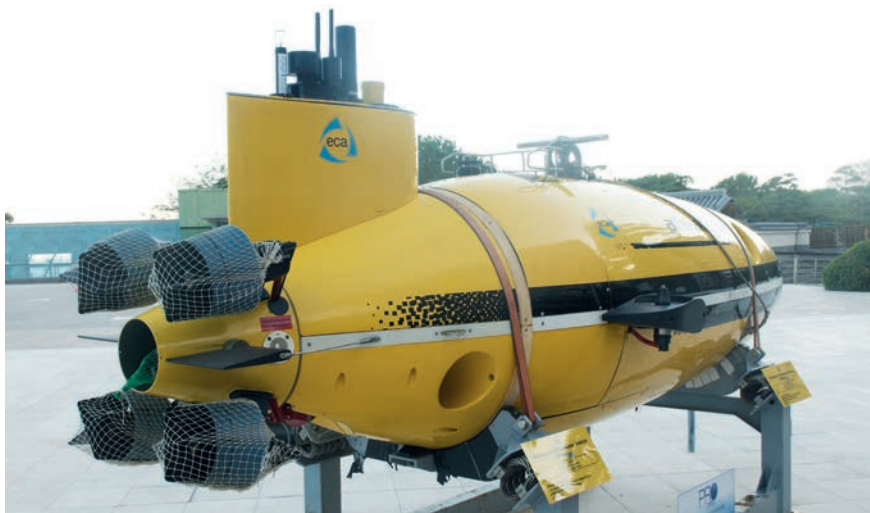


Figure 10: Alistar 3 000.

Terre

L'hétérogénéité et la variabilité de l'environnement terrestre n'ont pas permis, au-delà des démonstrateurs, un emploi significatif et généralisé des robots terrestres. Les domaines d'emploi existants ou potentiels sont pourtant très diversifiés : déminage et destruction d'engins explosifs, surveillance, logistique (*ravitaillement de postes isolés par exemple*), tir, etc.

- ▶ **Robot démineur.** Exemple : PackBot (iRobot) (figure 11), détecteur d'explosifs, à chenilles, très agile, utilisé en Irak et Afghanistan.
- ▶ **Robot de reconnaissance.** Exemple : Miniroc, assistance au combat en zone urbaine (repérage).
- ▶ **Robot de transport.** Exemple : BigDog (Boston Dynamics) (figure 12), capable de porter une lourde charge.
- ▶ **Robot armé.** Exemple : SWORDS (*Special Weapons Observation Reconnaissance Detection System*) (Foster-Miller) (figure 13), robot de combat télécommandé, d'un poids de 45 kg, équipé de plusieurs armes, utilisé



par l'armée américaine depuis 2004. Objectif : épargner la vie de soldats américains lors des reconnaissances armées sur le front. C'est la version armée des Talon, robots multifonctions à chenilles, équipés d'un bras, utilisés en Bosnie en 2000 et en Afghanistan en 2002 (plus de 20 000 missions à leur actif).



Figure 11 : Packbot.

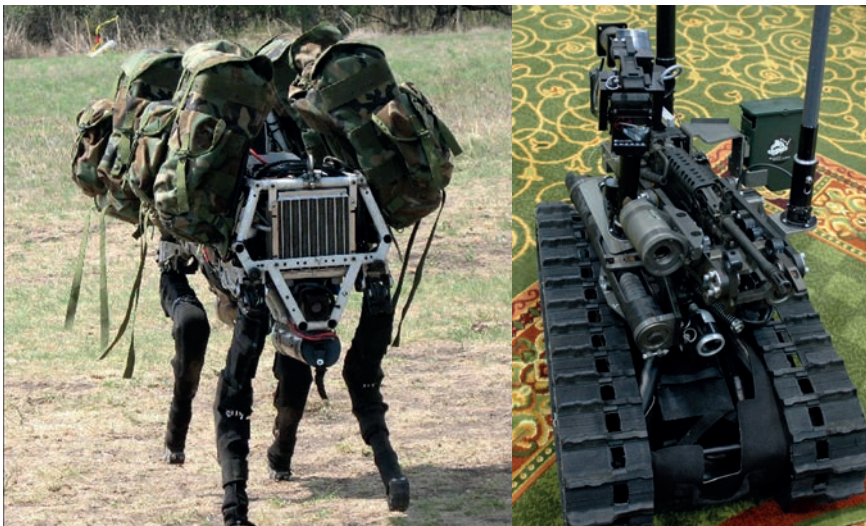


Figure 12 : BigDog.

Figure 13 : Robot de combat télécommandé SWORDS.



LES ROBOTS MILITAIRES DU FUTUR

Cette prospective s'inspire de l'étude [2].

Dans le domaine spatial, où le milieu est intrinsèquement homogène, mais hostile à l'homme, les robots ont toute leur place pour les missions militaires de télécommunication et d'observation/renseignement ou pour d'autres applications de combat si la militarisation de l'espace était amenée à se développer.

Rappelons l'importance du rôle déjà joué par les satellites militaires d'observation, de communication et de navigation, et par les robots spatiaux civils (bras manipulateurs, véhicules d'exploration planétaire, etc.). Les accords internationaux interdisent actuellement l'utilisation de robots armés dans l'espace.

Outre cette conquête du milieu spatial, de nombreuses perspectives sont offertes aux robots militaires. Donnons-en rapidement une idée pour clore cette section sur les exemples de robots, avant d'entrer dans plus de détails sur leur fonctionnement dans les sections suivantes.

Des évolutions importantes résulteront des progrès dans le domaine des microtechnologies et des nanotechnologies qui permettent d'imaginer des robots miniatures, ainsi que dans celui de la micro-informatique et des logiciels associés (au travers des sciences cognitives) qui pourront donner aux robots davantage d'intelligence artificielle ou, pour le moins, de véritables capacités de choix et de décision en fonction de l'environnement et des circonstances, ainsi que d'auto-apprentissage plus ou moins contrôlé, donc *in fine* plus d'autonomie.

La mise en réseau de robots interagissants et coopérants, robots de même nature ou même robots très différents les uns des autres, pourrait conduire à des « groupes armés » de robots. La théorie de ces « essaims » reste cependant à faire²².

La convergence des technologies électroniques et de l'information/communication, des neurosciences et des biotechnologie²³ ouvre des pistes (espoirs et

²² Il existe néanmoins déjà des concours interuniversitaires d'équipes de football robotisées...

²³ En France, on parle de NBIC (Nanotechnologies, biotechnologies, informatique, sciences cognitives). Aux États-Unis, la National Science Foundation (NSF) parle de « BANG » (Bits, Atoms, Neurons, Genes). On trouve également GRAIN (Genetics, Robotics, Artificial Intelligence, Nanotechnologies).



menaces] pour des applications en robotique²⁴.

Comme la plupart des systèmes d'armes, profitant des apports technologiques vus comme des avantages sur les champs de bataille, les robots auront tendance à devenir de plus en plus complexes, de manière intrinsèque et comme éléments d'un système de systèmes.

À moyen terme, on peut toutefois penser que chaque type de robot sera limité à un seul type de mission et que les robots ne seront donc pas polyvalents (contrairement aux humains). Initialement cantonnés à des fonctions opérationnelles passives comme le renseignement et la protection, l'avenir nous semble pourtant appartenir inexorablement aux robots actifs armés, qui posent des problèmes éthiques particuliers, comme il sera vu plus loin.

Les futurs champs de bataille verront vraisemblablement la multiplication et la diversification des robots, compte tenu des opportunités offertes par ces progrès technologiques.

ASPECTS À CONSIDÉRER

Pour dresser un état plus précis de la robotique militaire, dont nous avons donné quelques exemples, et avant de focaliser notre attention sur la notion de « conscience », plusieurs aspects doivent être considérés selon différents points de vue, allant des sciences physiques dites « dures » aux sciences humaines plus « douces²⁵ » qui s'avéreront souvent les plus essentielles dans le domaine abordé.

Aspect scientifique et technologique

Il s'agit ici de montrer comment le robot militaire remplit les quatre fonctions OODA signalées plus haut. Le robot militaire doit pour cela être capable de percevoir,

²⁴ Nous avons déjà dit que les créatures hybrides, faisant appel à la robotique et au vivant, n'étaient pas considérées ici.

²⁵ Terme utilisé par Michel Serres et sans doute préférable à « sciences molles », un peu péjoratif.



planifier, agir, traiter l'information, communiquer, apprendre, ce qui fait bien sûr appel à la fois à du *software* (algorithmes) et du *hardware* (calculateurs, capteurs, actuateurs, structure, énergie, charge utile, etc.).

(a) Perception

Le robot militaire doit à tout moment savoir dans quelle situation il se trouve (*situation awareness*), de façon à pouvoir planifier les actions ultérieures et agir.

Les moyens artificiels de perception du robot sont nombreux et variés. Ils sont souvent utilisables « tout temps²⁶ ». Ils surpassent généralement les moyens humains (nos « cinq sens »). D'ailleurs, le combattant humain a souvent recours à leur aide (exemple : lunettes infrarouges de vision nocturne).

Par fusion d'information, ces moyens permettent au robot d'élaborer une représentation précise de l'environnement (cible comprise). Par analogie, voir l'aide déjà apportée à un pilote d'avion de combat par les moyens artificiels mis à sa disposition pour améliorer sa conscience de la situation.

Détaillons un peu.

Capteurs / Fusion d'information

Il s'agit de l'ensemble des capteurs optiques, optroniques (figure 14), radars, sonars, etc., dont plusieurs peuvent équiper le même robot, ce qui contribue à la complexité, qui n'est pas seulement due à la composante informatique.

Les principes de détection peuvent être totalement différents les uns des autres et différents des sens humains (radar, laser, etc.). Les capteurs optiques fonctionnent dans des longueurs d'ondes différentes (ultraviolet, infrarouge) de celles de l'œil. Les capteurs acoustiques (sonar et autres) fonctionnent en dehors des fréquences audibles (infrasons et ultrasons). La représentation des objets et de l'environnement est donc « artificielle²⁷ » et dans le cas d'un robot télé-opéré, il faut apprendre à l'opérateur à piloter le robot sur la base d'images virtuelles. Pour un robot autonome, il faut créer une base de données d'un monde dont les

²⁶ Quelles que soient les conditions environnementales (jour/nuit, bonne/mauvaise visibilité, etc.).

²⁷ En ce sens que les signaux reçus doivent être transposés dans les bandes de fréquence de nos sens pour être exploitables par un opérateur.

caractéristiques correspondent à ces autres sens, soit à partir d'enregistrements (mais il paraît utopique de le faire pour tous les environnements et objets/cibles), soit par une simulation numérique et des modèles théoriques. Ce fonctionnement dans un monde virtuel²⁸ participe à l'accroissement de l'incertitude sur le comportement du robot dans des conditions réelles.



Figure 14 : Caméra infrarouge.

Exemples :

- ▶ Le drone SDTI dispose de caméras optiques dans le visible et en infrarouge pour assurer l'appui des troupes au sol et le réglage des tirs d'artillerie et d'un système de station portable de récupération des images (RVT : *Remote Video Transmission*) qui permet aux troupes à terre de recevoir les images au plus près de leurs objectifs.
- ▶ Le drone Predator, afin d'assurer sa mission de reconnaissance et d'observation, est équipé de différents capteurs :
 - ▷ capteur électro-optique Versatron Skyball Model I, opérant dans les bandes visible et infrarouge ; ce capteur est équipé d'une tête mobile pouvant regarder à 360° sous le fuselage ;
 - ▷ capteur radar Westinghouse 78R234 à ouverture synthétique pour lequel la transmission de données se fait en temps réel, par satellite.

²⁸ Différent en tous cas, dans son aspect, du monde réel tel que nous le voyons.



- Le drone Harfang dispose d'une charge de mission constituée d'une boule trisenseur (IAI) gyrostabilisée montée sous l'avant du fuselage, comportant les capteurs opto-électroniques ainsi que le désignateur laser, et d'un radar à synthèse d'ouverture (Elta) et à suppression d'échos fixes (SAR/MTI) à très haute résolution permettant de relever une image électronique du terrain et d'observer les mouvements de véhicules au sol quelles que soient les conditions météorologiques ; l'antenne de ce radar est montée dans un radôme ventral situé au centre du fuselage.

Fonctions assurées

L'ensemble de ces moyens permet d'assurer les fonctions de :

- *détection*, permettant d'attester que : « il y a quelque chose » ;
- *localisation*, conduisant à préciser que : « cette chose est à tel endroit » ;
- *identification*, permettant de garantir que : « il s'agit de telle chose ».

Soulignons que l'identification précise est une fonction particulièrement importante pour les robots militaires, pour notamment distinguer entre « ami » et « ennemi » (IFF : *Identification Friend or Foe*) – ce qui n'est pas toujours simple –, ou entre « militaire » et « civil » – ce qui est souvent encore plus compliqué ...

(b) Planification

Fixation d'objectif / Mission

Actuellement la mission est fixée par l'homme et la plus grande partie des drones, même programmés, sont contrôlés en permanence. Ce contrôle²⁹ peut-être plus ou moins lâche et, en contrepartie, le degré d'autonomie du drone aller du plus au moins. Il n'est pas exclu d'envisager une certaine autonomie du robot qui puisse prendre des initiatives dans la fixation de certains sous-objectifs (avec, évidemment, de prudentes limitations !). Dans le cas des torpilles marines,

²⁹ Au moins dans le sens où on parle de contrôle aérien : les contrôleurs au sol visualisent en permanence les trajectoires et donnent des consignes de route d'altitude et de vitesse en tant que de besoin. Dès aujourd'hui le système est double : liaison d'ordinateur à ordinateur, en plus de la liaison d'homme à homme.

que l'on peut qualifier de drones kamikazes, elles sont tirées avec comme consigne : attaquer une cible ayant telles ou telles caractéristiques, à trouver dans un volume marin déterminé...

Optimisation

Pour remplir « au mieux » la mission, diverses méthodes sont disponibles : théorie de l'automatique, commande optimale, réseaux neuronaux, théorie des jeux (« duels » entre adversaires ou « jeux coopératifs » au sein d'un ensemble de robots), etc.

(c) Action

Actionneurs / Mobilité

Comme les capteurs, les actionneurs permettant la mobilité sont très variés. Par exemple :

- ▶ PackBot : châssis mobile monté sur chenilles + moteur;
- ▶ BigDog : quadrupède articulé + moteurs électriques ; il peut marcher à 6 km/h sur des terrains difficiles ;
- ▶ SWORDS : peut atteindre la vitesse de 6,6 km/h, les chenilles permettent d'arpenter des terrains difficiles ;
- ▶ Drones : ils font appel à des configurations et des gouvernes classiques d'aéronefs (ailes fixes + gouvernes aérodynamiques + moteur, voilures tournantes + moteur) ou à des solutions plus originales, par mimétisme avec les oiseaux ou les insectes (ailes battantes).

Commande / Adaptation

Pour les robots terrestres, par exemple, une très bonne modélisation des systèmes mécaniques à grand nombre de degrés de liberté, sous les aspects théorique (géométrie, cinématique, dynamique, etc.) et physique (frottements, amortissement, etc.), est indispensable. La maîtrise de ces questions relatives au *hardware* est considérée comme aussi importante que celle relative au *software* informatique. Des progrès importants ont été accomplis récemment [6].

Pour la commande, sont utilisées les méthodes classiques de l'automatique, de la commande optimale, de la commande adaptative (pour faire face à la diversité des situations), etc. La navigation peut maintenant faire appel au GPS.



La qualité de la commande de l'action d'un robot (surtout s'il est doté d'une certaine autonomie) et de l'adaptation de cette commande aux conditions changeantes est un élément essentiel pour réduire l'imprévisibilité du robot, particulièrement dommageable pour un robot militaire (voir, plus loin, l'aspect éthique). L'imprévisibilité interne et externe du robot (grande difficulté à prévoir complètement son comportement) a deux causes fondamentalement distinctes : la complexité du robot lui-même, qui peut le rendre imprévisible même en environnement parfaitement connu, et les conséquences, sur son comportement, des modifications imprévues de son environnement.

Auto-reprogrammation

La capacité du robot de se reprogrammer en fonction de l'environnement, en fonction aussi, peut-être, des résultats des actions précédentes, induit un degré de complexité supplémentaire. On peut penser que ce n'est qu'un faux problème dans la mesure où toute auto-reprogrammation aura forcément été préalablement programmée. Ce ne serait donc qu'un cas particulier de la complexité initiale de la programmation du robot. Cependant, en multipliant les possibilités d'évolution du robot on multiplierait d'autant la difficulté de prévoir son comportement. Quelles seront les réactions d'un robot qui, compte tenu d'un nouvel environnement, se sera, « comme prévu », reprogrammé et qui constatera alors que l'environnement a de nouveau changé. Les boucles de réaction risquent de se produire à un niveau inattendu³⁰.

Quant à l'interaction entre robots amis et robots ennemis³¹, « robots bleus » et « robots rouges », elle risque de compliquer encore plus le problème.

³⁰ Dans les processus d'auto-organisation, Henri Atlan a montré que le stockage de l'information, relatif à des expériences produites dans un certain contexte et dans des configurations déterminées d'une « machine », était de nature à permettre l'identification de quasi-invariants qui peuvent constituer des « puits d'attraction » susceptibles de devenir des « buts émergents ». Cette affirmation, qui repose sur des expériences réalisées avec des automates et déjà rapportées par Varela, peut rendre prudent lorsqu'il s'agit de donner plus d'autonomie aux robots militaires. Il faut prévoir des capacités de veto qui peuvent entraîner des délais prohibitifs.

³¹ Et même entre robots amis de nationalités différentes (interopérabilité)! Mettre en place des procédures de veto par les contrôleurs humains peut dans certaines circonstances se révéler incompatible avec les délais de réaction nécessaires...

Exemples de commande

- ▶ Le robot démineur PackBot est commandé à distance à l'aide d'une manette ressemblant à un « *joystick* ».
- ▶ Le robot de transport BigDog est capable de gravir une pente enneigée et de conserver son équilibre sur tout terrain (dont la glace !), même après un bon coup de pied dans le flanc comme visible sur une vidéo très suggestive disponible sur Internet ! Une commande interne très efficace assure cette remarquable stabilité.
- ▶ Le drone SWORDS est piloté à distance (1 000 m) par un opérateur. Il a été testé de 2005 à 2007. On estime que dix-huit unités SWORDS ont été déployées en Irak. Il semble cependant qu'en 2007 ces machines n'avaient pas encore été placées dans des conditions d'affrontement réelles : officiellement, trois machines ont été mises à l'épreuve. Comme les SWORDS sont télécommandées, il semble que ces systèmes aient connu de fréquentes pertes de contrôle. Le problème semble avoir été résolu, car 80 nouvelles unités ont été commandées en août 2007. C'est sans doute à cette époque que leurs armes ont commencé à être utilisées, mais le feu devrait rester pour un temps sous contrôle total humain. Pour tenir compte de l'imprévisibilité résiduelle du robot, un système d'autodestruction est censé intervenir en cas de perte de contrôle.
- ▶ Le drone Harfang emporte une centrale de navigation inertielle (Sagem) recalée par GPS différentiel qui lui donne une capacité de décollage et d'atterrissage automatiques (ATOL : *Automatic Take-Off and Landing*). L'ensemble de commande et contrôle au sol est composé de quatre modules projetables sur théâtre extérieur : M1, préparation de la mission ; M2, commande proprement dite, par l'opérateur, essentiellement pour les phases de décollage et d'atterrissage, si nécessaire, puisque, une fois en vol, l'appareil suit une trajectoire programmée, avec cependant la possibilité pour l'opérateur de « reprendre la main » à tout instant ; M3, réception des informations des capteurs à bord du drone, transmises au sol par la liaison satellite ; M4, interprétation et diffusion des informations obtenues par le drone. L'appareil est programmé, en cas de perte de la liaison de commande et de contrôle, pour suivre une trajectoire lui permettant de revenir à son point de départ tout en essayant de rétablir la transmission.



Autonomie (d'action)

Nous avons vu que cette autonomie était plus ou moins grande et, actuellement, exclue (à notre connaissance) en ce qui concerne le feu³² (voir plus loin).

Par exemple, pour les drones [4], l'autonomie comportementale et, par suite, la capacité de décision, apparaissent comme des facteurs essentiels pour l'efficacité des missions pouvant leur être confiées, ainsi que pour l'extension du cadre de leur utilisation. Ces qualités permettent d'alléger, voire de s'affranchir dans certains cas, des contraintes opérationnelles telles que le maintien des liaisons au sol, la permanence du contrôle, la vigilance des opérateurs, et cela au profit d'un partage de l'autorité bien établi entre l'homme et la machine, dans un souci constant et évident de lutte contre l'imprévisibilité du drone.

Débordant ainsi largement leur rôle actuel d'observation et de surveillance, les drones pourraient être utilisés de façon efficace en contexte opérationnel, pour des missions d'intervention (sauvetage, tir, etc.).

Pour autant, il ne s'agit pas de couper toute relation entre l'outil à son utilisateur : l'opérateur devrait rester au cœur du système de décision, raison pour laquelle il faut autant étudier les interfaces opérateurs-systèmes, que les algorithmes de traitement de l'information et de décision qui sont embarqués ou, encore, que les principes de partage d'autorité.

Augmenter les capacités embarquées de perception et de décision apparaît donc comme un enjeu majeur, source de sécurité, de portée, de robustesse et de facilité d'emploi accrues pour les drones. Cela implique des progrès sur la chaîne d'acquisition et de traitement de l'information, jusqu'à la décision embarquée, et sur l'aide à l'opérateur. C'est ce qui a mobilisé l'Onera (Office national d'études et de recherches aérospatiales) dans le projet RESSAC (Recherche et sauvetage par système autonome coopérant) qui visait à démontrer la capacité d'un drone à prendre des initiatives et à réagir, sans l'aide de l'homme, face à des situations changeantes et des menaces imprévues.

Pour ce faire, le choix s'est porté sur un véhicule à voilure tournante (figure 15), formule jugée bien adaptée à la visée applicative du projet. La plate-forme R-Max de Yamaha est l'un des seuls hélicoptères téléopérés déjà vendu en série à quelque

³² Ceci bien que de nombreuses armes soient depuis plus d'un siècle entièrement autonomes (par exemple les mines terrestres à influence).

1 500 exemplaires ; il est employé de façon régulière pour l'épandage agricole, et déjà utilisé pour des recherches. La mission de base assignée au RESSAC est d'aller se poser à un endroit donné afin de recueillir une personne. Pour ce faire, il doit :

- ▶ rejoindre un point déterminé après une navigation autonome ;
- ▶ recueillir l'ensemble des données utiles et effectuer à bord leur traitement, afin de rendre compte de la situation à l'opérateur et lui « demander » l'autorisation d'atterrissage ;
- ▶ atterrir en cas de réponse positive ;
- ▶ exécuter une procédure de retour en sécurité (même en cas de panne), ou re-planifier sa mission en cas de non-réponse ou de réponse négative.



Figure 15 : Drone RESSAC en vol.

L'enjeu est évidemment de faire face en temps réel, grâce à des algorithmes intelligents et une puissance de calcul disponible à bord suffisante, à une multitude de combinaisons possibles et à une quantité d'informations pouvant être imprécises ou partielles.

L'interface « opérateur-système » [figure 16] est également étudiée pour donner à l'opérateur les moyens de déterminer comment réaliser la mission.



Ainsi le projet RESSAC doit aider à mieux spécifier le partage d'autorité entre le drone et l'opérateur, en fonction des évolutions technologiques des capteurs, des capacités de traitement embarqués et des missions. Selon ce concept, l'homme reste dans la boucle de décision, avec une véritable valeur ajoutée, mais une partie des contraintes opérationnelles existant jusqu'alors pourraient désormais être levées³³.

Le projet RESSAC a également pour but de déterminer les capteurs (notamment les radars) qui seront les plus utiles à différentes applications (par exemple la détection de câbles sur la zone d'atterrissage, ou la présence de glace). Cette recherche utilise une simulation de l'image que différents capteurs pourraient restituer dans un environnement donné.



Figure 16 : Camion station sol associé au drone RESSAC.

³³ Ou, à mission donnée, la gestion des risques améliorée.

(d) Traitement de l'information

Les précédentes fonctions de perception (avec fusion d'informations), planification et action demandent un important traitement d'information.

Ce dernier est rendu possible par les progrès de l'informatique et des calculateurs embarqués.

Cette évolution a commencé il y a environ cinquante ans (1965)³⁴ et devrait voir encore largement augmenter la puissance des ordinateurs avant que l'on atteigne une hypothétique saturation. On peut donc penser que les robots en service aujourd'hui, c'est-à-dire principalement des drones et des engins de déminage, ne sont que les ancêtres de robots beaucoup plus élaborés devant apparaître dans une à deux dizaines d'années.

Comme il a été vu rapidement plus haut, ces robots seront pourvus de capteurs multiples et d'une informatique complexe, ils seront destinés à évoluer dans un environnement mal connu. Les robots aériens ou navals bénéficieront, si l'on peut dire, d'un environnement plus ou moins isotrope et au sein duquel les principales inconnues seront les ennemis (et aussi les amis). Les robots terrestres auront, par contre, à se déplacer dans un environnement irrégulier (dans les trois dimensions), changeant, mal connu et aux modifications rapides et imprévisibles. Quel que soit le milieu, l'adversaire peut en outre essayer de perturber le fonctionnement du robot en modifiant l'environnement par des contre-mesures (camouflage, leurrage, brouillage...). Les robots autonomes sont moins sensibles que les robots télé-opérés aux contre-mesures de *brouillage* ou de *piratage*, d'où une partie de leur intérêt.

Pour les drones [4], la question de fond est : « *intelligence embarquée ou déportée ?* ». Les clés sont détenues par *les algorithmes de traitement de l'information* qui entendent remplacer tout ou partie de l'intervention humaine.

Au-delà d'une capacité d'analyse, ces algorithmes ont aussi comme objectif de donner l'autonomie comportementale aux systèmes de drones. Cet objectif se traduit par des enjeux techniques différents selon les classes de drones et de missions considérées. Ainsi, par exemple, un petit drone évoluant à très basse altitude au sein d'un milieu urbain aura des exigences en intelligence embarquée plus importantes qu'un système d'observation HALE.

³⁴ Date d'apparition sur le marché des premiers ordinateurs « germanium », puis « silicium ».



Ces exigences se traduisent prioritairement à travers deux fonctions primordiales des drones :

- ▶ la fonction navigation, liée au déplacement du drone, dès lors que celui-ci évolue en milieu inconnu ou imprécis, et que son cheminement dépend de l'environnement qu'il rencontre ;
- ▶ la fonction perception, lorsque le drone n'est pas seulement un vecteur de diffusion des données acquises par ses senseurs propres, et qu'une fonction d'analyse, voire de décision, fait partie des objectifs de sa mission ou constitue la condition d'une bonne probabilité de remplir correctement sa mission.

Concernant la fonction **navigation**, les développements récents en traitement de l'information ont contribué à définir de nouveaux concepts de missiles à imagerie qui sont déjà des prototypes de systèmes autonomes capables d'analyse et de décision :

- ▶ **analyse**, pour effectuer une navigation de précision par procédé de corrélation de terrain avec un modèle préparé ;
- ▶ **décision**, pour savoir choisir, en mode terminal, dans le champ de son auto-directeur, la cible qui doit être frappée.

Ainsi, dans ces deux cas, des algorithmes robustes de traitement de données ont été développés et appliqués à la définition du missile de croisière SCALP muni d'un guidage terminal de précision sur des scènes complexes. L'application aux systèmes de drones des techniques et méthodes mises au point, permet d'envisager des concepts autonomes de navigation ainsi que de guidage, particulièrement utiles dans le cas de la navigation de petits drones en milieu complexe urbain.

Pour naviguer, le drone doit être capable de percevoir son environnement et en particulier de le restituer. Cette restitution numérique 3D³⁵ peut être obtenue par :

- ▶ traitement stéréoscopique utilisant le défilement propre du capteur embarqué ;
- ▶ traitement de données issues de capteurs actifs, radar ou laser, voire acoustiques ;
- ▶ fusion de chacun de ces modes.

³⁵ On peut même dire 4D, en incorporant le temps si la « scène » comporte des objets mobiles dont il est important de modéliser et d'extrapoler la trajectoire.

Dans le cadre des missions d'observation et de surveillance, voire de désignation d'objectif (pour les drones de combat), des systèmes de drones, l'*analyse des scènes complexes* se traduit sous le vocable DRIL (Détection, reconnaissance, identification, localisation). Ces fonctions, assurées auparavant par des opérateurs humains, doivent maintenant être traitées, en tout ou partie, par des logiques algorithmiques compte tenu des flux de données, des contraintes de réactivité en contexte tactique et des concepts prévisibles de mise en réseau de l'information pour le renseignement.

Concevoir des algorithmes capables de traiter la grande variabilité des scènes, complexes et non coopératives, telles que celles susceptibles d'être survolées par un drone, débouche sur des problèmes très ardues en termes de modélisation, d'apprentissage, ainsi que d'optimisation.

Maîtriser l'information et le traitement des flux de données impose de savoir opérer la *fusion d'informations* parfois hétérogènes et, en particulier, de combiner l'utilisation de plusieurs capteurs embarqués (par exemple, une voie optique et une voie électromagnétique) ou de savoir gérer au mieux des informations ou des ressources distribuées (capteurs ou calculateurs). Un enjeu, dans ce contexte, est la conduite d'un système coopératif de drones en réseau qui assure la performance globale en répartissant les tâches et en accroissant la robustesse et la survivabilité de l'ensemble. On retrouve ici le concept NCW (*Network Centric Warfare*) d'architecture des systèmes de surveillance globale, qui traite les problématiques variées de fusion, de gestion et d'allocation de capteurs.

Enfin, cette information doit être diffusée ou restituée grâce à des *traitements de données* appropriés :

- ▶ le volume de données à transmettre imposera nécessairement l'utilisation d'algorithmes de compression intelligents ;
- ▶ il faudra se protéger des contre-mesures ;
- ▶ la restitution nécessitera une présentation du flot d'informations à la fois au bon format (technique de mosaïquage) avec une qualité d'image appropriée (stabilisation parfaite, « dérotation », super-résolution en utilisant l'intégration temporelle produite par le défilement).

(e) Communications

Les communications sont évidemment nécessaires pour la conduite du robot et/ou la transmission des informations. Elles peuvent maintenant faire appel à des



liaisons satellitaires. Elles intéressent non seulement les communications entre opérateur et robot, mais aussi entre robots, dans le cas de l'emploi « en essaim ».

Elles sont évidemment sensibles à la saturation et aux contre-mesures : brouillage, piratage³⁶.

Par exemple, pour le drone Harfang, la transmission se fait par une liaison directe (LoS : *Line of sight*) permettant la commande de l'appareil jusqu'à une portée de 150 à 200 km grâce à une antenne montée au-dessus du fuselage, et par une liaison satellitaire à haut débit (Satcom) permettant de s'affranchir de l'horizon radioélectrique. Les données sont envoyées vers un satellite géostationnaire grâce à une antenne directionnelle (InSec) pointée par des vérins et installée dans un « satdôme » à l'avant du drone. Enfin, l'appareil est doté d'un relais de communication (VHF/UHF) (Rohde & Schwarz) permettant de transmettre des informations à un centre de commandement de troupes au sol et de l'intégrer dans le trafic aérien militaire. Le véhicule aérien est également équipé d'un IFF (*Identification Friend or Foe*, identification ami / ennemi) et d'un enregistreur de vol. Le système permet la surveillance ininterrompue d'un théâtre d'opérations grâce à la transmission continue des informations et la mise en œuvre d'une procédure (*handshake*) de transfert des données entre les véhicules aériens lors d'un passage de relais entre drones (entrant et sortant).

(f) Apprentissage

Il faudrait préciser la part réservée à l'apprentissage dans la conception des robots actuels et futurs.

Plusieurs approches sont proposées, par exemple celle dite « *bottom-up* » (voir plus loin).

L'apprentissage du robot, s'il est mal maîtrisé par l'homme, peut être une source supplémentaire d'imprévisibilité ultérieure du robot. En cela, l'apprentissage par simulation, s'il est moins réaliste que l'apprentissage dans le contexte réel, peut être préférable à ce dernier, car l'homme garde la maîtrise de l'environnement dans lequel est plongé le robot.

³⁶ Des insurgés irakiens ont réussi à intercepter les flux vidéo de drones Predator en utilisant des logiciels destinés à capter des flux de données de satellites, les flux vidéo des Predator n'étant pas chiffrés !

(g) Simulation

Comme dans bien d'autres domaines, la simulation est, en effet, un outil indispensable dans la phase de conception. Elle peut également être utilisée pour la formation des opérateurs. Elle s'apparente alors à un « jeu vidéo » très perfectionné, mais (pour l'instant ?) sans l'aspect SF (science-fiction) que présentent la plupart des jeux. Comme il vient d'être vu, elle peut notamment être très utile pour l'apprentissage du robot lui-même (balayage de situations variées, maîtrise de l'apprentissage, etc.).

(h) Configurations/Structures

Ces considérations d'acquisition, de traitement et de diffusion d'information, bien qu'elles prennent une place de plus en plus importante pour les robots militaires, ne doivent pas faire perdre de vue l'aspect « véhicule » du robot. De ce point de vue, les configurations des robots militaires ainsi que les structures, les sources d'énergie, les propulsions et les charges utiles associées sont très variées.

Pour les robots terrestres, il n'a pas été fait appel (pour l'instant ?) à des formes humanoïdes (comme dans les films de SF !).

Sans doute pour privilégier la stabilité et la mobilité tout terrain, on a plutôt eu recours à des formes animaloïdes (BigDog, robot-quadrupède, à l'allure de gros chien, pour le transport ; Stickybot, à allure de gecko, figure 17, pour l'espionnage ; Snakebot, à allure de serpent, figure 18, pour la reconnaissance) ou à des véhicules classiques à chenilles (PackBot, Miniroc, SWORDS).

La question se pose de savoir si un robot armé et vaguement humanoïde serait envisageable dans l'avenir ? Nous avons écarté, pour l'instant, ces « robots de type humain ». Il est probable que la ressemblance plus ou moins grande à l'architecture de l'homme ne soit pas le moyen optimal de concevoir des « robots » destinés à une gamme de tâches données, sauf à vouloir faire peur aux ennemis en excitant leurs fantasmes ou à vouloir utiliser ces robots pour le leurrage³⁷. Dans les systèmes actuellement envisagés et qui pourraient ressortir de la notion de « robotique de combat » on voit plutôt le développement des blindés autonomes.

³⁷ Il est rappelé que, pendant la seconde guerre mondiale, de faux parachutistes (mannequins) ont été largués par les alliés pour tromper l'ennemi. Mais ils n'étaient pas (encore ?) de vrais robots !



Figure 17 : Stickybot.



Figure 18 : Snakebot.

Les robots sous-marins ont des formes de sous-marins ou de torpilles, moins profilés lorsque la vitesse n'est pas un paramètre essentiel.

Pour les robots aériens, on retrouve les configurations classiques des aéronefs, mais également des configurations animaloïdes (oiseaux, insectes) pour les mini et microdrones.

Comme en robotique générale, il est important de noter une tendance à la *miniaturisation*, surtout pour les microdrones, ce qui pose des problèmes originaux. Par rapport à l'approche macroscopique, cette approche « microscopique » demande la prise en considération de phénomènes physiques jusqu'alors négligés : par exemple, les forces de surface (capillarité et forces électrostatiques) deviennent importantes par rapport à la gravité (force de volume).

L'avenir est-il aux minirobots, microrobots et même nanorobots militaires ?

(i) Énergie / Propulsion

Les sources d'énergie, les systèmes de propulsion (moteurs, réacteurs) sont très divers. L'autonomie (énergétique) est un paramètre essentiel³⁸. Exemples :

³⁸ Un drone SDTI a battu un record dans sa catégorie en restant plus de 5 h sur zone en Afghanistan.

- ▶ SWORDS : puissantes batteries au lithium ; moteur électrique ; autonomie : 6 h (4 h en déplacement) ;
- ▶ drones : les solutions utilisées pour les grands drones sont généralement semblables à celles utilisées pour des aéronefs classiques : moteurs à piston³⁹ ou turbopropulseurs (pour les MALE), turboréacteurs (pour les HALE) ; pour les petits drones (moins de la dizaine de kilos), le « tout électrique » est viable ;
- ▶ de façon générale, la minirobotique fait appel à des moteurs piézoélectriques (exemple : « mouche-espion ») plutôt qu'électrostatiques (frottements). Il faut fabriquer les outils correspondants, à partir des techniques de la micro-électronique. L'énergie est fournie par des batteries, des microturbines en silicium fonctionnant à l'hydrogène, des super-batteries nanométriques, etc.

(j) Charge utile (CU)

La charge utile peut être constituée d'instruments embarqués et/ou d'armement. Exemples :

- ▶ PackBot : le véhicule est muni d'un bras sur lequel peuvent être montés différents capteurs (caméra, détecteur d'explosifs, etc.) ;
- ▶ BigDog : capable de porter jusqu'à 140 kg !
- ▶ SWORDS : les armes embarquées varient selon la mission ; mitrailleuses M240 et M249, deux mitrailleuses lourdes de calibre 50 (portée 1 000 m) pour des missions de reconnaissance, un fusil M16, un lance fusées 6 mm, 300 chargeurs ;
- ▶ Predator : doté de deux missiles AGM-114 Hellfire (version MQ-1).

Autres aspects

(a) Aspect sociologique

La société est-elle prête à accepter l'emploi généralisé des robots militaires ? Ne suscitent-ils pas des peurs ? Ne remettent-ils pas en question certaines carrières militaires ? (et quid des drones de surveillance de l'espace intérieur des États ?)

³⁹ Exemples : drone Predator : un moteur à piston Rotax 914 de 101 CV ; drone Harfang : un moteur turbocompressé Rotax 914F de 115 CV.



Intérêt / Acceptabilité

Il faut tout d'abord répéter cette évidence que nous rappelle chaque jour la lecture de nos journaux : des robots militaires existent et ont été utilisés de façon opérationnelle en Irak, en Afghanistan, dans la bande de Gaza, en Libye. Ils continuent à être utilisés quotidiennement, de manière routinière dans de nombreux conflits. L'intérêt et l'acceptabilité de ce nouveau type d'armement n'est donc plus vraiment à démontrer. Certes, il ne s'agit pas de robots humanoïdes marchant au pas et montant à l'assaut, baïonnette au canon ; il s'agit d'engins téléguidés ou, plus rarement, autoguidés, de drones armés télé-opérés, de drones d'observation ou d'engins de déminage. La révolution dans les affaires militaires, la RAM⁴⁰, a fait intervenir sur le champ de bataille non seulement des télécommunications immédiates et omniprésentes, mais aussi un degré d'automatisme qui tend à éloigner géographiquement la réaction sur le théâtre du combat de la décision hiérarchique. Les robots se prêtent bien à cette approche.

Depuis 2004, les robots ont donc fait leur entrée pour observer, pour déminer, mais aussi pour tuer (exemples : SWORDS, drone Predator avec missiles guidés par laser). Ils sont généralement télé-manipulés, mais peuvent également être autonomes (Phalanx CIWS de la marine américaine⁴¹, SGR-A1⁴² de Samsung Tech).

Il est reconnu par les utilisateurs militaires que le robot réagit généralement plus vite que l'homme. Gordon Johnson, du commandement interarmées du Pentagone (*Joint Forces Command*) confiait au *New York Times* en février 2005 : « Ils n'ont pas faim⁴³, ils n'ont pas peur, ils n'oublient pas les ordres, et la mort à côté d'eux les laisse indifférents », sans compter qu'un robot ne dort pas et n'a pas besoin de soins médicaux (mais il peut nécessiter d'importantes « réparations » !).

⁴⁰ Expression traditionnelle américaine qui résume l'introduction des nouvelles technologies de l'information et de la communication. En anglais il s'agit de la *Revolution in Military Affairs*, RMA.

⁴¹ Canon anti-aérien robotisé, susceptible de prendre lui-même la décision de tir.

⁴² Mitrailleuse fixe, équipée de capteurs de détection et de poursuite de cibles, le tir doit être autorisé par un opérateur distant. Cet équipement est utilisé le long de la ligne démilitarisée.

⁴³ Ils sont cependant limités par leur autonomie (énergétique) et ils sont, en outre, plus difficiles sur la qualité de leur nourriture que les humains !

La société, de son côté, paraît prête à accepter l'utilisation généralisée des robots militaires afin de limiter les pertes de vies humaines (du côté ami !) et à condition que cette utilisation reste toujours maîtrisée, car cette acceptation ne va pas sans quelque appréhension. Il faut aussi prendre en compte, c'est même sans doute encore plus important, les aspects psychologiques négatifs sur les populations civiles « victimes » ; l'emploi systématique des drones vaut aux Américains d'être honnis au Pakistan, ce qui favorise la pénétration de l'islam radical... (voir plus loin l'aspect « empathie »).

Réticences / Peurs

En effet, la tendance à donner de plus en plus d'autonomie au robot inquiète, surtout lorsqu'il s'agit de robots armés. Les romans et les films de science-fiction du genre *Terminator* ne sont pas étrangers à cette angoisse. Des robots mal maîtrisés ne pourraient-ils pas provoquer des dégâts collatéraux inacceptables chez l'ennemi ? voire retourner leurs armes contre les troupes amies ? L'opinion publique ne sera rassurée (?) que s'il lui est démontré que cette nouveauté ne conduira pas à une situation pire que celle antérieure.

En revanche, la peur de voir les robots remplacer progressivement l'homme dans certains secteurs du métier militaire, en réduisant les débouchés correspondants, ne semble pas s'être manifestée (pour l'instant ?), comme c'est souvent le cas⁴⁴. Il est vrai que le métier militaire est *a priori* dangereux et que, si le nombre de combattants était amené à diminuer – ce qui, de ce point de vue, serait plutôt favorable – le nombre d'opérateurs, de fabricants, voire de concepteurs, de robots devrait augmenter, ce qui permettrait de préserver globalement au moins une partie de l'emploi. Notons bien que cela n'est pas une fin en soi. Il faut espérer qu'un jour, la décroissance de la menace entraînera globalement celle des besoins de la défense (voire de ceux de la police). Mais là, il ne s'agit plus de la « conscience » du robot mais de la conscience (morale) de l'homme...

(b) Aspect économique

Combien coûtent les robots militaires ? Existe-t-il un marché suffisant ?

⁴⁴ Sans remonter aux « canuts de Lyon », il y a eu quelques réticences lors de l'introduction plus récente de certains automatismes et de l'utilisation d'autres types de robots (robots industriels, par exemple).



Coût / Prix

Les coûts de développement et de production, donc les prix des robots militaires, sont très variés. Il faut évidemment tenir compte aussi des coûts opérationnels d'utilisation.

Ces coûts globaux seraient à comparer avec les coûts des matériels militaires classiques, mais il est dès à présent possible de dire que, malgré leur complexité croissante, les robots remplaçant les systèmes d'arme avec présence humaine à bord ont le double avantage de ne pas avoir à satisfaire aux contraintes très sévères liées à cette présence (confort, sécurité et fiabilité d'un ordre supérieur, protection, prévention de la fatigue, etc.) et qu'ils servent en principe à économiser des vies humaines (du côté de l'utilisateur !), vies qui, on le sait, n'ont (en principe) pas de prix !

Il faudrait également analyser en détail l'intérêt (coût/efficacité) de la récupération (qui reste indispensable si le robot rapporte des informations non télétransmises).

Exemples de prix (acquisition, ce qui ne représente qu'une partie du coût de possession) :

- ▶ Packbot : 25 000 €. Déployer un soldat américain en Afghanistan pendant un an coûte environ l'équivalent de six Packbot [7] ;
- ▶ SWORDS : 230 000 \$ l'unité (150 000 à 200 000 \$ en production de masse) ;
- ▶ drones : la plate-forme (cellule + motorisation) représente seulement 15 à 25 % du coût du système complet ; la CU (Charge utile), les systèmes embarqués et les stations-sol sont la partie la plus onéreuse :
 - ▷ minidrone : quelque 1 000 \$;
 - ▷ drones TCP (très courte portée) : faible coût, permettant de supporter un taux d'attrition plus important ;
 - ▷ drone tactique : 0,5 à 3 M\$. Économique en personnel navigant, mais mobilise beaucoup de servants au sol !

Marché

Si, pour une utilisation en milieu hostile, le nucléaire est l'un des premiers secteurs à avoir eu recours à la robotisation, c'est dans l'armée que les robots sont aujourd'hui les plus nombreux (hors robots industriels) et leur nombre ne cesse d'augmenter. En 2007, 12 000 robots étaient utilisés pour des actions de défense, de sécurité ou de secours, dont 5 000 déployés en Irak et en

Afghanistan (150 en 2004). Le budget consacré par l'armée américaine aux seuls robots au sol a été de 100 M\$ en 2004 et de 1,7 G\$ entre 2006 et 2012 (triplément du budget annuel). Selon le ministère américain de la défense, un tiers des forces combattantes devraient être des robots d'ici à 2015 (aviation : un tiers d'UAV (drones de combat), armée de terre : un tiers de camions se conduisant tout seuls !).

Exemples :

- ▶ PackBot : l'armée américaine en a acheté plus d'un millier depuis le début du conflit en Irak ;
- ▶ SWORDS : prémices du *Future Combat System*. Étant donné que l'opinion publique américaine a largement été choquée par le nombre de soldats tués en Irak, l'hypothèse d'une généralisation des robots de combat lors des conflits à venir n'est pas à exclure ;
- ▶ drones aériens : très peu d'études de marché. Environ 2 G\$ au début des années 2000, et une estimation de 5 à 10 G\$ après 2010. Le marché des drones n'est pas encore parfaitement défini, mais on peut s'attendre à une large expansion.

Le marché des mini ou microdrones est à préciser, il pourrait être très prometteur. Ces drones permettent en effet d'observer une zone locale, souvent dans des conditions difficiles ou dangereuses. L'armée (comme la police) est intéressée par des systèmes d'observation à distance (jumelles volantes), souples, maniables et de moindre coût, évitant d'exposer inutilement des vies humaines. Tout laisse donc à penser que ces petits objets volants autonomes vont s'imposer durablement et apporter une révolution analogue à celle de la téléphonie mobile pour les télécommunications, bien que limitée aux applications professionnelles (y compris l'agriculture).

Actuellement, les États sont les principaux clients. L'absence de marché privé bien identifié et l'incertitude sur les futures réglementations ont jusqu'à présent retenu les grands constructeurs de développer des machines sur fonds propres, pour telle ou telle mission (contre-exemple : Yamaha avec le R-Max). À noter cependant que la réglementation est en train d'évoluer en Europe comme aux États-Unis pour permettre l'utilisation des drones de surveillance périmétriques.

De façon générale : 32 pays producteurs, 250 modèles, dont 80 exploités par 41 nations, essentiellement dans le domaine militaire.

Détaillons un peu, sur quelques exemples :

États-Unis

- ▶ Intégration des drones de combat dans les forces à l'horizon 2015. Reconnaissance, suppression des défenses aériennes ennemies, puis frappes par « tout temps ».
- ▶ Programmes de démonstrateurs d'UCAV par la DARPA (*Defense Advanced Projects Agency*) + USAF (*US Air Force*) + *US Navy*, regroupées en octobre 2003 en J-UCAS (*Joint Unmanned Combat Air System*).
- ▶ Prototypes X-45A (Boeing) et X-47A (Northrop Grumman).
- ▶ Programme de démonstration Block 2 : vol en formation, bombes à guidage GPS, reprogrammation de mission en vol, transfert du contrôle.
- ▶ X-45C et X-47B : dimensions d'un avion de combat.

Europe

- ▶ Coopération dans le cadre SCAFE (Système de combat aérien futur européen).
- ▶ UK : Watchkeeper (Thales), renseignement militaire.
- ▶ 5^e PCRD, projets civils : CAPECON, USICO, UAVNet.
- ▶ 6^e PCRD : rien n'est prévu.

France

À la mi-2004, un quart des investissements européens. Dans le cadre de « Horizon 2010 » : seulement 1 % du budget total d'équipement militaire. Deux groupes de travail : CGARm (Conseil général de l'armement) et CSD (Conseil scientifique de la défense) ont fait des recommandations et des propositions.

La situation est la suivante :

- ▶ armée de terre : drones tactiques CL-289 (Canadair + EADS, 2003) et Crécerelle (Sagem, 1995).
- ▶ armée de l'air : programmes intérimaires SDTI et SIDM ;
- ▶ minidrones : concours DGA d'idées universitaires (2005) ;
- ▶ microdrones : appel d'offres DRAC (Drone de reconnaissance au contact), sélection en 2004.

Le marché des drones militaires, s'il n'est pas encore florissant, est, par contre, en plein développement. Ce marché pourrait être complété par la satisfaction des

besoins de la police et ceux de la protection civile. Ces marchés sont également en voie de développement rapide.

(c) Aspect éthique

Du point de vue de l'éthique [2], la guerre serait évidemment à proscrire, mais le passé nous montre qu'elle est parfois difficilement évitable et qu'il faut alors essayer de la conduire en respectant certaines règles⁴⁵ dictées par des considérations d'éthique.

Après quelques réflexions générales sur l'éthique de la guerre, de l'armement et, plus précisément, de l'utilisation des robots militaires, nous mettrons l'accent sur deux points qui paraissent poser des problèmes d'éthique particulièrement aigus : l'imprévisibilité du robot et l'effet de l'éloignement de l'opérateur. Enfin, nous donnerons quelques exemples d'évolutions récentes pour les robots armés.

Éthique de la guerre, de l'armement et du robot

De façon générale, l'éthique de la guerre se préoccupe des conditions de l'entrée en guerre et du comportement des hommes en temps de guerre. Ce sont les *jus ad bellum* et *jus in bello* auxquels se réfèrent tous, ou presque tous, les articles, exposés ou livres traitant de l'éthique de la guerre.

L'éthique de l'armement, qui nous intéresse davantage ici, se préoccupe des questions éthiques que posent, d'une part l'emploi de certains genres d'armes dans les combats et, d'autre part, le fait de concevoir, fabriquer voire exporter de telles armes. Dans le passé, le groupe « Éthique de l'armement », créé en 1995 par l'ingénieur général de l'armement Olivier Legrand⁴⁶, s'est intéressé à diverses armes, des armes non létales aux armes nucléaires, et des mines antipersonnel aux armes biologiques. Il a plus récemment mené une réflexion sur l'éthique des robots [2], sous la conduite de l'ingénieur général de l'armement Alain Crémieux. Il y est fait largement appel ici.

⁴⁵ Pas toujours respectées ! Il ne faut pas privilégier notre perception « occidentale » de la question.

⁴⁶ Ce groupe comprend une quinzaine de membres civils ou militaires, se référant à des familles de pensée diverses.



Parmi les matériels ou systèmes que le langage commun qualifierait de « robots » et qui, dans les domaines de la défense et de l'armement, pourraient à terme poser des questions éthiques ou morales originales, on peut imaginer deux grandes catégories :

- ▶ le robot possédant des capacités de destruction⁴⁷, surtout s'il agit comme un agent autonome sans intervention humaine directe pour mener à bien sa mission, donc sans action humaine directe d'un opérateur terminal ;
- ▶ le système d'informations et de communications très autonome qui analyserait des situations et donnerait sans validation humaine au coup par coup des ordres (commandement tactique) ou des consignes (contrôle tactique) à des opérateurs de systèmes d'armes létaux⁴⁸.

On pensera essentiellement ici à la première catégorie, bien que l'autre puisse également poser des questions éthiques difficiles.

Le robot pose des problèmes d'éthique à deux niveaux : au niveau de la conception et à celui de l'utilisation. C'est en effet d'une part un simple objet⁴⁹, fait de métal

⁴⁷ Un tel robot militaire, s'il est habilité à tuer, viole les lois d'Asimov (voir [1]). Les trois lois de la robotique, énoncées par le scientifique et écrivain de science-fiction Isaac Asimov, sont des règles auxquelles tous les robots qui apparaissent dans sa fiction doivent, par construction, obéir. Exposées pour la première fois dans sa nouvelle intitulée *Cercle vicieux* (Runaround, *Astounding Science Fiction* 1942), mais annoncées dans quelques histoires plus anciennes, ces lois sont :

- un robot ne peut porter atteinte à un être humain ni, en restant passif, permettre qu'un être humain soit exposé au danger ;
- un robot doit obéir aux ordres que lui donne un être humain, sauf si de tels ordres entrent en conflit avec la première loi ;
- un robot doit protéger son existence tant que cette protection n'entre pas en conflit avec la première ou la seconde loi.

Lois auxquelles il a ajouté, plus tard, une quatrième loi :

- un robot ne doit pas porter atteinte à l'humanité ou, par inaction, laisser l'humanité porter atteinte à elle-même.

⁴⁸ C'est un peu le thème de *War Games*, un film de science-fiction réalisé par John Badham et sorti en 1983. En pleine guerre froide, un adolescent pirate sans le savoir le système informatique du NORAD. Ce système est géré par une intelligence artificielle et l'intervention mal contrôlée du pirate manque de déclencher une guerre thermonucléaire globale contre le bloc de l'Est.

⁴⁹ Mais tout le contraire d'un objet simple, comme il a été vu plus haut.

et de silicium, mais c'est, d'autre part, un objet auquel ses concepteurs ont donné la possibilité de réagir aux sollicitations de l'environnement au point de sembler avoir un comportement autonome. Il peut même ressembler plus ou moins à un animal (comme il a été vu, on réalise des robots expérimentaux à quatre pattes), voire à un homme. Ce n'est pas un combattant, mais il peut avoir une partie des apparences et des fonctions d'un combattant humain.

Deux réponses extrêmes et opposées sur l'éthique de la réalisation et de l'utilisation des robots pour le combat sont alors possibles :

- ▶ la première réponse consiste à nier sa spécificité. Malgré un degré élevé de sophistication, un robot, même armé et donc susceptible de tuer ou de blesser, ne serait que le prolongement de son concepteur et de son servant. Il ne ferait que renvoyer aux questions éthiques qui se posent en amont ;
- ▶ la deuxième réponse consiste à s'interdire l'utilisation de robots armés de crainte de voir leurs opérateurs, éventuellement très éloignés du champ de bataille, faire la guerre sans plus aucune contrainte morale, voire être incapables de maîtriser suffisamment bien un robot très imprévisible. Le robot, et surtout le robot armé, serait alors fondamentalement, en soi, éthiquement mauvais. C'est souvent la réaction actuelle dans les médias.

Enfin, on peut avoir des réponses intermédiaires entre l'une ou l'autre de ces deux interprétations qui, finalement, ne sont pas satisfaisantes et paraissent justifier une étude plus approfondie, ce que confirme l'existence d'une littérature sur le sujet qui commence à devenir importante.

Deux points que nous venons de citer semblent notamment mériter d'être développés du point de vue de l'éthique : l'effet de l'imprévisibilité du robot et l'effet de l'éloignement de l'opérateur.

Imprévisibilité du robot

Il nous faut insister quelque peu sur l'imprévisibilité du robot militaire, déjà signalée plus haut, car elle peut avoir des conséquences importantes sur le plan de l'éthique [2].

Les armées utilisent depuis toujours, depuis très longtemps en tous cas, des matériels présentant un degré d'imprécision ou d'automatisme leur donnant certains points communs avec ce que l'on appelle aujourd'hui des robots. Si les arbalètes



et les balistes ont été jadis interdites⁵⁰ (ce qui ne les a pas empêchées d'être utilisées !) c'était bien, du moins officiellement, parce que leurs effets n'étaient pas parfaitement prévisibles par ceux qui les utilisaient, compte tenu de leur portée. De même les dégâts causés par l'artillerie, puis par le bombardement aérien et surtout le bombardement stratégique, ne sont pas prévisibles avec précision par les artilleurs ou par les aviateurs. Ce n'est sans doute pas par hasard que les pilotes de chasse se sont vus attribuer le surnom de « chevaliers du ciel », alors que les pilotes de bombardier attendent toujours un surnom glorieux⁵¹.

D'autre part, nous avons vu que des matériels qui ne semblent pas poser en soi de problème d'éthique spécifique, comme les missiles, y compris des missiles autoguidés et donc non dépourvus d'une certaine « intelligence », pouvaient commencer à être assimilés à des robots rustiques. Ne parle-t-on pas, à propos des effets de tous ces matériels de « dommages collatéraux », qui peuvent être plus graves, par leur ampleur ou par leur nature, que ceux causés par certains robots, même armés.

Ne pourrait-on pas alors se contenter de dire (et d'écrire) que l'usage des robots, comme celui de tous les armements, n'est acceptable que dans la mesure où ils ne risquent pas de causer de dégâts autres que ceux voulus par leurs servants et, bien sûr aussi, à condition que ces dégâts respectent par ailleurs les règles éthiques communes à tous les armements ?

C'est bien la première réponse qu'il faut donner à la question de savoir si l'usage de robots est conforme à ce que nous pensons de l'éthique de la guerre. Mais est-ce une réponse suffisante ?

À la réflexion, il est apparu que les robots, de par leur complexité⁵², de par le degré d'« intelligence » qui leur est incorporé, et surtout de par celui qui pourra leur être incorporé dans l'avenir, méritaient l'attention particulière qui leur est accordée.

⁵⁰ Interdiction par le II^e concile de Latran en 1139, pour les combats entre chrétiens !

⁵¹ Cette remarque se rapporte aux aviateurs de la seconde guerre mondiale. Aujourd'hui on utilise le plus souvent les mêmes types d'avions pour la chasse et le bombardement (ainsi le Rafale est multimission) et donc les mêmes pilotes pour les missions de défense aérienne et de frappe dans la profondeur.

⁵² La « complication » extrême des robots (nombre de capteurs, nombre de lignes des programmes informatiques, etc.) peut en faire des systèmes très « complexes », au comportement difficilement prévisible, voire imprévisible.



Le robot n'est évidemment pas le premier armement à être « *complexe* ». Les missiles et bien d'autres armements le sont déjà. Le robot cependant allie le fait de disposer de capteurs multiples et d'une grande capacité de calcul au point qu'on puisse, quitte à commettre un abus de langage, le considérer comme doué d'une capacité de décision⁵³. Ce degré de complexité, auquel sont habitués les informaticiens depuis déjà un bon nombre d'années, peut en effet le rendre imprévisible. Du moins, à partir d'une certaine complexité, ne peut-on plus affirmer que, bien que déterministe, il soit parfaitement prévisible. Les lois de l'analyse combinatoire sont telles qu'à partir d'un certain degré de complexité il devient impossible d'examiner tous les cas possibles sauf à disposer d'un temps inaccessible. C'est déjà le cas de nos ordinateurs de bureau et c'est ce qui conduit de façon aujourd'hui devenue banale à les éteindre et à les rallumer faute de pouvoir analyser leurs pannes. Mais ils ne sont pas armés !

L'emploi éventuel de robots en *essaim*, c'est-à-dire le lancer simultané d'un grand nombre de robots, d'une « *salve* » en quelque sorte, pourrait avoir des conséquences difficiles à prévoir, dans la mesure où ces robots peuvent s'informer mutuellement et interagir : on peut alors voir apparaître des propriétés nouvelles issues des rétroactions collectives et ces propriétés peuvent être difficiles à prévoir. Leur analyse mettrait en jeu une combinatoire encore plus compliquée, alors que la maîtrise du comportement des ordinateurs en réseau est déjà problématique dans nos applications simples usuelles. On pourrait, par exemple, tenter d'expliquer les tirs fratricides entre combattants humains par des comportements et des interactions de ce type (rétroaction), qui pourraient donc avoir des conséquences semblables entre robots et entre robots et humains.

Éloignement de l'opérateur

Les Écoles de St-Cyr-Coëtquidan ont organisé en 2010 deux colloques sur les aspects éthiques et juridiques des systèmes d'armes robotisés [8]. Il a été notamment discuté de l'image troublante du guerrier *at home*, assis dans son fauteuil devant son écran d'ordinateur, pratiquant cette *joystick war*, guerre robotisée

⁵³ Ces apparences de décisions étant la conséquence inévitable, mais difficile ou impossible à prévoir, de stimuli extérieurs interprétés en fonction des caractéristiques du robot, caractéristiques autant logicielles que matérielles.



sans engagement physique, sans risques physiques (même pour le soldat de base !). Ceci peut se prolonger jusqu'à la fin de la guerre qu'il a toute chance de remporter⁵⁴, du moins dans le cas de conflits asymétriques auxquels les armées modernes sont de plus en plus souvent confrontées, car il y a peu de chance que ces conflits se fassent robots contre robots et que la riposte soit à la hauteur de l'attaque de haute technologie. Le choc produit par la très grande différence entre l'image de technologie « ludique » [jeu vidéo⁵⁵ ?] et la réalité morbide d'une action létale désormais routinière crée un trouble certain...

Le déclenchement du feu à partir d'un robot peut⁵⁶ ne pas être décidé par un opérateur proche et être décidé à distance, éventuellement à des milliers de kilomètres de distance, par un téléopérateur. Le fait que celui-ci soit complètement épargné par les risques du champ de bataille fait craindre à certains que le respect du droit de la guerre en devienne de plus en plus compromis⁵⁷. Continuera-t-on à distinguer le civil du combattant et à chercher à éviter ce qu'on nomme pudiquement les « dommages collatéraux » ? D'autres espèrent, au contraire, que l'on pourra faire appliquer par le robot des règles strictes d'engagement et que, justement parce qu'il est dénué d'émotivité et qu'il est parfaitement obéissant, il commettra moins de bavures que le combattant humain.

Les relations entre le robot et son servent, celui qui le contrôle, peuvent donc être délicates. L'éthique d'un téléopérateur situé à une distance éventuellement très grande du champ de bataille et placé dans des conditions beaucoup plus confortables peut être très différente de celle du combattant de terrain⁵⁸. C'est d'ailleurs

⁵⁴ Du moins en ce qui concerne la première phase « classique », qui peut être suivie de prolongements divers (actions terroristes, etc.) beaucoup moins maîtrisables.

⁵⁵ Où l'on sait que les enfants sont passés maîtres !

⁵⁶ C'est, semble-t-il, déjà le cas pour certaines missions de drones armés américains.

⁵⁷ La phylogenèse a développé des résistances au potentiel d'agression des animaux (Konrad Lorenz). Ceux-ci épargnent généralement les « vaincus », ce que ne fait pas toujours l'homme (malgré les conventions internationales sur les prisonniers !) et, curieusement, le rat ! Ces mécanismes de retrait inscrits dans les gènes semblent n'agir que par la proximité. Que restera-t-il, chez l'homme, de ces fonctionnalités animales, lorsqu'il sera de plus en plus éloigné du champ de bataille ?

⁵⁸ Il a été montré que les opérateurs, et *a fortiori* les téléopérateurs, étaient souvent plus dépressifs que les combattants sur le terrain ! Serait-ce par « mauvaise conscience » ?

déjà le cas entre l'aviateur et le terrien. On se trouve là à un point de convergence original entre l'éthique du combattant et celle de l'arme⁵⁹, en l'occurrence le robot. L'éloignement par rapport au concepteur est plus délicat à analyser. L'éthique du concepteur de robot est sans doute encore plus délicate que celle de l'opérateur.

Enfin, ces raisonnements, qui s'appliquent plus aux robots envisagés dans l'avenir qu'aux robots relativement simples en service ou même en développement aujourd'hui, dépendent beaucoup du degré « d'intelligence⁶⁰ » qu'on leur accorde ou qu'on envisage de leur accorder. Il est justifié d'escompter des progrès encore tout à fait extraordinaires pour les composants informatiques (matériels et logiciels) et, donc, pour les robots militaires, mais le risque du fantasme de toute puissance et de la confusion entre science et science-fiction est toujours présent et dangereux.

Il ne faut pas oublier que l'on fait généralement la guerre avec le ferme espoir de ramener la paix. Trop de technologie, dans un conflit très dissymétrique, peut conduire à une certaine déshumanisation (on ne se bat plus sur le « champ de bataille »), retarder le processus de la « table des négociations » et pousser le plus « faible » aux actions terroristes.

Quelques exemples d'évolution des robots militaires armés

SWORDS

L'automatisation des déplacements du véhicule est envisagée, mais le tir devrait encore rester, pour un temps, sous contrôle total humain. Il y a un système de sécurité censé détruire le robot en cas de perte de contrôle (pensé surtout pour éviter qu'il ne tombe aux mains de l'ennemi...).

Pour certains roboticiens, comme Noël Sharkey, la poursuite du processus aboutira à franchir la « ligne rouge » éthique de l'autonomisation du ciblage et de

⁵⁹ Il est clair qu'une arme, en tant qu'objet inanimé, n'est ni morale ni immorale. Nous appelons ici « arme immorale » une arme qui ne peut avoir que des applications immorales (exemple de la poupée piégée).

⁶⁰ Nous mettons des guillemets car l'utilisation du mot « intelligence » pour les robots ne signifie nullement « intelligence humaine » qu'on n' imagine pas sans conscience. Il s'agit d'une capacité de traitement de l'information pouvant donner l'illusion de l'intelligence à un observateur humain extérieur.



l'ouverture de feu (transgression des deux premières lois d'Asimov [1], puisque ici c'est alors le robot qui « décidera » !). Notons que cela semble déjà être le cas pour le déploiement expérimental, à la frontière sud-coréenne d'une nouvelle génération de SGR-A1. Dans l'avenir, il est donc plausible d'imaginer un ou plusieurs robots de combat recevoir l'ordre suivant : « Aller dans tel bâtiment et éliminer tous les humains non alliés s'y trouvant ». Mais le programme peut-il tenir compte des soldats ennemis s'étant rendus, voire de simples civils ou d'enfants se trouvant dans ce bâtiment ? Comment éviter les « bavures », les « dommages collatéraux » ? La guerre des drones au Waziristan en est une illustration.

Drones aériens

Les états-majors étudient l'hypothèse d'emploi d'un drone comme moyen d'identification avancée, sous contrôle d'un avion de combat ou d'un PC volant. Dans ce contexte, l'étape « tir » de missiles air-air embarqués sur le drone est envisageable. Mais, pour l'instant, l'homme reste toujours dans la boucle décisionnelle, depuis une station sol ou un PC volant (AWACS ou avion de combat), afin qu'il garde la décision de feu et puisse éventuellement annuler la mission.

(d) Aspect réglementaire

Seul le cas des drones aériens [4] sera considéré ici. La sécurité du vol des drones, face à l'absence de pilote à bord et à la perte de liaison possible (fortuite, ou volontaire par brouillage) avec un téléopérateur ou un contrôleur, est à l'évidence un problème critique. Il se pose sous des formes différentes selon la taille du drone (dégâts au sol pour les gros drones, criticité de la tenue au vent pour les mini ou microdrones), et selon son contexte d'emploi, civil ou militaire. Face à cette situation, ce qui va compter le plus, c'est l'optimisation du système complet dans lequel le drone lui-même n'est qu'un élément.

Intégrer les drones dans l'espace aérien est un problème qui se pose différemment dans le domaine civil⁶¹ et dans le domaine militaire, et là encore, selon qu'il y a ou non conflit.

⁶¹ Où, en France, la DGAC (Direction générale de l'aviation civile) joue un rôle essentiel. Comme déjà signalé, cette question est en voie de résolution tant aux États-Unis qu'en Europe.

C'est un problème complexe du fait de deux exigences :

- ▶ assurer la sécurité de l'environnement dès la conception : c'est l'aspect « navigabilité » ;
- ▶ assurer cette même sécurité pendant la mission : c'est l'aspect opérationnel du problème.

Par sécurité de l'environnement, on entend celle des populations et des installations survolées, ainsi que celle des autres aéronefs en vol.

Aspect navigabilité

Les préoccupations militaires sur la navigabilité sont très proches des préoccupations civiles, par l'obligation de sécurité au sol. En effet, un drone militaire est autant susceptible de « crash » qu'un drone civil, notamment dans ses phases de navigation vers le site d'opération et à son retour. Il sera d'autant plus concerné que son autonomie sera grande. La notion de fiabilité prend alors toute son importance. Les architectures de contrôle embarquées devront être certifiées au même titre que les équipements actuels des aéronefs pilotés.

Du côté militaire, un code de navigabilité d'origine française, écrit par le CEV (Centre d'essais en vol, mandaté par la DGA⁶²) et validé par un groupe de travail comprenant les industriels aéronautiques français majeurs et des organismes étatiques (dont l'Onera), est disponible depuis 2005. Désigné USAR (*UAV Systems Airworthiness Requirements*), il a été élaboré en faisant évoluer l'ancienne réglementation JAR 23, qui semblait la plus adaptée aux drones (notamment en termes de masse).

Au niveau européen, un groupe de travail sur l'insertion des drones dans l'espace aérien civil (incluant les auteurs du projet USICO d'adaptation de la réglementation actuelle aux drones), initialement mis en place par les JAA (*Joint Aviation Authorities*) en 2003, a rendu ses conclusions et recommandations à destination de l'AESA (Agence européenne de sécurité aérienne), qui a pour mission de concrétiser et finaliser le dossier.

Aux États-Unis, en 2003, la NASA s'est jointe à la FAA (*Federal Aviation Authority*) et au DoD (*Department of Defense*), en collaboration avec les six industriels les

⁶² DGA : Direction générale de l'armement.



plus impliqués dans les systèmes de drones, pour lancer un ambitieux programme dénommé « Access 5 » consacré aux drones HALE.

Aspect opérationnel

Le partage de l'espace aérien entre les drones et les aéronefs classiques pose de difficiles problèmes réglementaires, atténués lorsqu'il s'agit du théâtre d'un conflit.

La tendance actuelle est que l'introduction des drones n'entraîne pas de modification majeure de la réglementation internationale, bien établie, des aéronefs pilotés, notamment la ségrégation des zones et le rôle essentiel du contrôle aérien.

Mais une autre tendance voit le jour, où les drones susciteraient une modification de la réglementation appliquée aux avions pilotés, au bénéfice de tout le trafic aérien. Il n'est pas exclu qu'à terme, une règle nouvelle, telle que l'obligation d'emport par tous les aéronefs d'un dispositif coopératif signalant sa présence directement aux autres aéronefs, ne finisse par s'imposer. Elle est déjà largement appliquée. Ainsi, la sécurité des aéronefs pilotés serait améliorée et l'insertion des drones grandement facilitée par une substitution du fragile principe « voir et éviter » par un principe plus robuste « détecter et éviter⁶³ », qui ajoute au précédent une dimension supplémentaire dans la connaissance à bord, et à l'avance, du trafic environnant. Dans cette approche, une grande partie de la connaissance (« conscience » ? « *awareness* » ?) de la situation serait transférée du contrôleur au pilote d'avion ou au drone-robot. Un pas de plus vers l'avion sans pilote, dont l'acceptabilité dans le cas du transport de passagers n'est pas établie ! Une raison de plus pour doter le robot d'une « conscience » aigüe de la situation dans laquelle il se trouve.

(e) Aspect juridique

Nous ne nous étendons pas ici sur les aspects juridiques classiques liés aux aspects réglementaires qui viennent d'être rappelés au paragraphe précédent (par exemple, responsabilité en cas de dommages au sol à la suite de la chute d'un drone).

⁶³ *Sense and avoid* dans la réglementation américaine.

Plus intéressante est la question suivante : Le robot militaire, notamment si on réussit à le doter d'un supplément de « conscience » (voir chapitre 3), est-il responsable ? Sinon, qui est responsable ? [2]

Responsabilités des robots ?

Savoir ce que signifie la « responsabilité » d'un robot ayant la possibilité de s'autoprogrammer en choisissant entre diverses stratégies, est une question trop vaste pour être traitée ici à fond. Cependant, on reconnaît déjà que lorsqu'un automatisme est à l'origine d'un accident, le subrogé responsable est le fabricant du robot. Ce point de vue sera-t-il amené à évoluer ? Détaillons un peu.

Les robots posent déjà des problèmes redoutables qui mettent en jeu la définition de la responsabilité associée aux conséquences souvent tragiques des actes commis en temps de guerre.

Le fait que des machines ou systèmes puissent avoir des comportements échappant au contrôle des hommes pour une durée suffisant à produire des dommages n'implique en rien qu'on puisse attacher une peine physique ou une condamnation morale à ces machines ou aux systèmes eux-mêmes.

Il convient donc – du moins pour l'instant ? – d'éviter d'appliquer à des robots des verbes ou des attributs spécifiquement humains comme sentiment, volonté, responsabilité, éthique, morale – ou, au moins, ne le faire qu'avec beaucoup de prudence, en spécifiant bien la signification particulière que l'on donne à ces mots (voir chapitre 2). Ce qu'on a coutume d'appeler un « robot de combat » peut avoir un grand degré d'autonomie et de réactivité aux conditions d'environnement s'il est ainsi conçu, et son action peut ne pas être suffisamment bien contrôlée en temps réel par un opérateur (voir plus haut). La question éthique se pose si cette action autonome peut avoir des conséquences, voulues ou non voulues, qui seraient insupportables ou inadmissibles si elles étaient le fait immédiat d'acteurs humains.

Si responsabilité et condamnation il y a, ce ne peut être, aussi difficile soit-il de les déterminer, que celles de ceux qui ont permis ces conséquences en les connaissant à l'avance ou en les pressentant.

Responsabilités « autour des robots »

En effet, l'autonomie accrue des robots de combat par rapport à des armements plus classiques peut compliquer l'établissement d'une chaîne de responsabilité, ou de culpabilité jusqu'aux niveaux les plus élevés de la chaîne de planification



des opérations militaires. Cela peut aller du niveau des chefs militaires qui auront prévu l'emploi de l'arme dans la planification de leurs opérations, aux responsables politiques qui auront autorisé son développement pour emploi par les militaires, aux concepteurs du robot, et aux responsables du planning des opérations : depuis ceux de la programmation jusqu'à ceux de la définition de la mission.

Pour le TPI (Tribunal pénal international) qui instruit les crimes de guerre, si un robot autonome produisait des effets qu'il serait possible de classer dans cette catégorie, c'est la chaîne complète des décideurs qui risquerait d'être citée devant lui. Il serait alors vain d'invoquer le cas de force majeure ou les circonstances atténuantes dues à l'imprévisibilité du robot. En effet, l'imprévisibilité du robot peut et doit être prise en compte, tout au moins en termes de probabilité d'occurrence fatale.

Comme le montrent les paragraphes suivants deux catégories de décideurs sont impliquées :

Décisions liées à l'existence du robot de combat (aspect politique)

On peut explorer la chaîne classique des programmes d'armement.

On laissera de côté les stades de recherche fondamentale et appliquée à la robotique en général⁶⁴, car ces activités ne semblent pas spécifiques du robot de combat. Il est d'ailleurs probable que les applications civiles éventuelles soient souvent plus motrices que les applications militaires pour de tels programmes de recherche.

On peut commencer à se poser des questions sur les responsabilités lors du lancement de développements exploratoires qui, cependant, serviront surtout à éclairer des décisions prises ultérieurement.

Les questions éthiques commencent vraiment à se poser avec la décision de lancement du développement d'un robot de combat. Elle implique alors les responsables opérationnels qui établissent le besoin militaire et les spécifications opérationnelles en se fondant déjà sur un embryon de doctrine d'emploi. Elle implique aussi les responsables techniques pour les spécifications techniques et l'éclairage des opérationnels sur la faisabilité de diverses solutions.

Il conviendra aussi que les points clés de décision soient portés au niveau politique adéquat, en fonction du système envisagé.

⁶⁴ Et l'enseignement, réputé suffisamment « général » !

Il conviendra enfin d'avoir, dès ce stade, une vision claire de ce qui est admissible ou non en matière d'autonomie et en matière de confinement de l'imprévisibilité d'un système largement autonome et à capacité autonome de reprogrammation. Il s'agira ensuite de vérifier que l'on peut garder la maîtrise de ces aspects tout au long de la suite du programme.

Les considérations à prendre en compte peuvent être, entre autres :

- **techniques** : comment réduire la marge d'imprévisibilité de manière suffisante ? Que veut dire précisément « suffisante » ?
- **déontologiques** : dans quelle mesure des professionnels peuvent-ils considérer qu'il est éthique de mettre en danger la vie d'ennemis – et même de populations civiles – de façon incontrôlée ? C'est pourtant le cas avec l'artillerie, le bombardement et les mines – particulièrement les mines marines. Il y a peut-être quand même une différence dans la mesure où le robot choisit sa victime. En effet, il semble que la responsabilité des auteurs d'un bombardement décidé est bien de nature collective et que cela est entré, de fait, dans les lois de la guerre, mais que le choix de la victime est d'une autre nature et viole le principe de réciprocité du combat individuel ;
- **morales** : provoquer, par un processus automatique, la mort d'un être humain, c'est le considérer comme un objet, une chose. C'est le même problème que celui des bombardements de masse, ou que celui posé par l'usage de mines terrestres non destructibles à distance et non balisées ;
- **opérationnelles** : comment planifier et contrôler l'emploi d'un robot autonome dont on ne connaît pas avec une certitude et une précision suffisantes le comportement final ? Quelles peuvent être les conséquences finales sur l'intégrité psychique de ceux qui l'ont initié, lancé et utilisé ?

Les décisions ultérieures de lancement de la fabrication et de mise en service font appel aux mêmes considérations, qui prendront en compte les résultats des essais que l'on aura pris soin de prévoir et de réaliser pour éclairer la décision.

Décisions liées à la mise en œuvre du robot de combat

L'emploi dans un cadre militaire d'un robot de combat implique de façon classique toute la chaîne de commandement et de contrôle, sur les plans opérationnel et tactique.



Là aussi, les questions d'éthique peuvent se poser, d'autant plus difficiles que les systèmes sont capables de se reconfigurer, par modification de leurs paramètres ou de leurs algorithmes, indépendamment d'une intervention humaine directe, et présentent ainsi un risque accru de comportements imprévus et dangereux.

Sans minimiser l'importance du jugement de chaque échelon responsable, on doit considérer que la doctrine d'emploi d'un tel système sera établie à l'avance ainsi que les différents degrés de règles d'engagement.

La responsabilité des différents acteurs en cas de mise en cause pour comportement aberrant ou abusif des drones armés sera à établir en fonction de la bonne élaboration et du bon respect de ces règles. On ne doit pas sous-estimer, lorsqu'il s'agit de mettre en œuvre des robots, la concentration de responsabilité qui en découle. Les effets de la volonté d'un seul homme, celle de l'opérateur ou du décideur de l'emploi, peuvent se trouver amplifiés sans que puissent jouer les interventions modératrices des chaînes de commandement aujourd'hui habituelles dans les armées. Il ne paraît pas excessif de dire que l'emploi actuel de drones armés pourrait fort bien conduire d'ici peu à la mise en cause par le TPI ou, du moins, par des médias ou par des personnalités ou des associations cherchant à faire pression sur le TPI, des responsables d'une bavure plus grave ou plus médiatique que celles qui se produisent déjà.

Conclusion sur la question des responsabilités

Des considérations ci-dessus, il ressort que dans un pays où les responsables politiques, techniques et opérationnels liés à la défense et à l'armement sont organisés pour réfléchir de façon approfondie aux décisions qu'ils ont la responsabilité de prendre, la question du mode de prise en compte des questions éthiques dans le cas des robots armés s'apparente beaucoup, au niveau des principes, à celui des autres systèmes d'armes. Cependant, des aspects nouveaux sont à prendre en compte, liés d'une part à la question de la complexité et aux risques liés au degré d'autonomie et de reconfiguration des systèmes et, d'autre part, au jugement politique et moral lié à l'emploi de systèmes capables de détruire, de blesser et de tuer avec un certain degré d'autonomie et d'éloignement des opérateurs.

Ces questions seront à traiter au cas par cas pour chaque système envisagé.

À propos de l'éloignement des opérateurs (voir plus haut), rappelons que *l'exonération de la responsabilité pénale* des militaires dans l'emploi de la force armée

est justifiée par un cadre éthique et juridique rigoureux [8]. Ce cadre autorise dans des conditions bien précises – y compris sur le territoire national et en temps de paix – l'ouverture du feu *hors des cas de légitime défense* (ce n'est pas le cas pour la police). Dans une action militaire, une invocation de légitime défense trouve son assise dans l'article 51 de la Charte des Nations unies ; or la légitime défense est aujourd'hui de plus en plus fréquemment élargie à des interventions par anticipation d'agressions non imminentes. On peut s'interroger dès lors sur le maintien d'un droit « exorbitant du droit commun⁶⁵ » pour l'usage des systèmes d'armes robotisés, dans la mesure où l'on étendrait et banaliserait la logique policière (impliquant une responsabilité pénale) à une pratique militaire (sans responsabilité pénale). La question est tout aussi juridique qu'éthique, car ce « droit exorbitant » trouve sa justification morale dans une spécificité littéralement « extraordinaire » de l'acceptation d'un « esprit de sacrifice pouvant aller jusqu'au sacrifice suprême⁶⁶ », *qu'une guerre à distance tendrait à relativiser* (pas de risque, donc pas de « privilège » !).

Toutes ces considérations sont d'actualité.

Le Rapporteur spécial de l'ONU sur les exécutions extrajudiciaires, sommaires et arbitraires, Christof Heyns, qui dépend du Haut-commissariat aux droits de l'homme, a rendu son rapport annuel 2013 sur les robots autonomes munis d'armes létales lors de la deuxième session du Conseil des droits de l'homme des Nations unies à Genève, commencée le 27 mai 2013. Ce rapport contient des recommandations à l'adresse des gouvernements pour qu'ils agissent à l'égard des robots complètement autonomes⁶⁷.

Le 19 novembre 2012, *Human Rights Watch* et la Clinique des droits humains internationaux de la faculté de droit de l'Université de Harvard (*Harvard Law School International Human Rights Clinic*) ont publié *Losing Humanity: The Case Against Killer Robots* (Une arme inhumaine : les arguments contre les robots tueurs), un rapport de 50 pages qui donne un aperçu des nombreuses préoccupations suscitées

⁶⁵ C'est-à-dire ne relevant pas du droit commun.

⁶⁶ Y compris pour les missions de bombardement qui, malgré un certain éloignement de l'objectif, ne sont pas sans danger (DCA, chasse adverse...).

⁶⁷ Document A/HCR/23/47 du 9 avril 2013, *Report of the Special Rapporteur on extrajudicial, summary or arbitrary executions*, Cristof Heyns, disponible à l'adresse : http://ohcr.org/HRBodies/HRCouncil/RegularSession/Session23/A-HRC-23-47__en



par les armes complètement autonomes, notamment sur les plans juridique, éthique et politique. Ce rapport établissait que les armes totalement autonomes ne pourraient probablement pas satisfaire les principaux critères imposés par le droit international humanitaire, dans les situations rencontrées le plus communément sur un champ de bataille contemporain, et que leur utilisation créerait un vide juridique en matière de responsabilité, car il serait très difficile d'établir clairement qui serait légalement responsable des actes d'un robot.



Chapitre 2

LES ROBOTS MILITAIRES ONT-ILS DÉJÀ UNE CERTAINE « CONSCIENCE » ?

Maintenant que nous connaissons mieux le robot militaire sous ses différents aspects, abordons le thème de la conscience⁶⁸. Nous venons de voir l'importance de l'éthique en robotique militaire, surtout pour les robots armés qui, dans l'avenir, pourront être dotés d'une plus grande autonomie, y compris éventuellement pour le feu. Pour l'instant, les actions des robots militaires sont contrôlées, en principe « en toute conscience » (notamment⁶⁹

⁶⁸ Jean-Paul Laumond [9], comme bien d'autres roboticiens, répugne à parler de conscience à propos des robots car il craint les abus de langage. Pour lui, la conscience est déjà difficile à définir chez l'homme [1], malgré les progrès récents accomplis, notamment en neurosciences. Elle est inexistante chez le robot et même indigne d'étude et de soutien financier. Il admet cependant que le robot peut, par la complexité croissante de ses boucles de perception-décision-action, donner l'apparence d'avoir une certaine « conscience », car quelques « fonctionnalités » de la conscience humaine sont plus ou moins présentes. C'est bien l'approche suivie par notre groupe de travail et, notamment, ici où il a été distingué entre la conscience humaine (sans guillemets) et la « conscience » du robot (avec guillemets).

⁶⁹ La conscience est une caractéristique quasi physique de l'être qui se « voit » vivre. Il ne peut y avoir de morale sans conscience, mais la morale est beaucoup plus relative. Il s'agit de comparer ses actes à une norme sociétale, qui dépend de la société en question.



« morale », il faut l'espérer !), par un opérateur humain. À l'avenir, sera-t-il possible de transférer, avec le supplément d'autonomie envisagé, au moins quelques caractéristiques de cette conscience « humaine » au robot ? Sera-t-il possible d'implanter des règles morales intangibles chez un robot ?

Et, dès à présent, le robot n'est-il pas doté d'une certaine « conscience » ?

Pour répondre à cette question, nous suivrons l'approche adoptée dans la communication générale [1] et qui consiste à regarder quelles sont les *fonctionnalités*⁷⁰ de la conscience humaine qui sont présentes, au moins en partie, chez un robot, ou qui pourraient y être introduites à court, moyen ou long terme. Dans un deuxième temps (voir chapitre 3) nous essayerons d'identifier les fonctionnalités les plus intéressantes à développer.

On utilise pour cela la classification en trois niveaux de conscience humaine de Nayla Farouki [10], du plus élémentaire au plus complexe. Les fonctionnalités correspondant aux « axiomes » d'Aleksander & Dunmall [11] sont notés avec un astérisque (*).

Pour chaque fonctionnalité, on rappelle généralement sa définition pour l'homme et on s'interroge sur sa présence, ou la possibilité et l'intérêt de son introduction, chez le robot. Cette approche systématique peut paraître un peu fastidieuse, mais ce balayage semble indispensable pour ne pas oublier un élément essentiel.

CONSCIENCE DE NIVEAU I

Conscience de l'environnement* / Description*

Il s'agit, pour l'homme, de l'interprétation et de l'unification des données des sens, de la représentation et de l'interprétation de l'environnement par rapport à soi.

Pour le robot, cela est déjà relativement bien réalisé par la fusion d'information des données des capteurs et l'élaboration d'une information pertinente dans une situation donnée (voir plus haut). Cela permet au robot d'avoir, à chaque

⁷⁰ En se limitant aux principales : certains dénombrent jusqu'à 120 fonctionnalités !



Les robots militaires ont-ils déjà une certaine « conscience » ?

instant, la meilleure connaissance (awareness) possible de la situation dans laquelle il se trouve. À rapprocher des aides au pilotage pour un pilote d'avion de combat, dans le cadre de l'IHM (Interaction homme-machine)⁷¹.

La fonction *identification* précise de la cible, matérielle ou humaine, malgré la présence possible de camouflage ou de leurres, est évidemment essentielle.

Interrelation, autorégulation et survie

Il s'agit, pour l'homme, de l'interaction avec son environnement (au sens large) qui assure sa survie. Cette interaction est exploitée par des processus d'autorégulation aboutissant au maintien de la vie. Cette fonctionnalité est une caractéristique essentielle des systèmes vivants. Les processus impliqués sont de complexité croissante de la bactérie à l'homme.

Elle peut être programmée pour un robot autonome, autosuffisant. C'est d'ailleurs la 3^e loi d'Asimov (voir plus haut) : « Un robot doit protéger son existence, tant que cette protection n'entre pas en conflit avec la première ou la deuxième loi » [qui, rappelons-le, ne sont pas respectées, vis-à-vis de l'ennemi, par un robot militaire armé !]. La durée d'opérabilité est évidemment conditionnée par la réserve d'énergie.

En effet, on peut programmer une fonctionnalité de maintien en vie ou de survie pour un robot. Pour le moment, on l'utilise principalement dans des contextes d'ateliers flexibles ou d'applications de services où le robot mobile détecte le niveau de charge de ses batteries et applique alors à bon escient un programme de parcours vers une prise de courant où il peut se connecter tout seul et où il se maintient jusqu'à ce qu'il détecte que ses batteries sont rechargées. Il reprend alors son activité. Ce cas de recherche de survie est évidemment le plus simple.

⁷¹ La conception des aides dans les avions de ligne est très comparable, seules changent les priorités des informations affichées. De même, l'automobile se dirige résolument vers des aides importantes à la conduite. Les voitures de haut de gamme sont d'ores et déjà munies de « viseurs » tête haute, il y a encore peu réservés aux avions de combat.



On peut inclure dans cette fonctionnalité l'auto-maintenance programmable en s'appuyant, soit sur des durées d'usage, soit sur des signaux de capteurs. Est également concernée l'auto-réparation, surtout pour les circuits informatiques. Enfin, au niveau mécanique, les reconfigurations automatiques permettent de compenser des pannes et d'achever des tâches en dépit de leur occurrence. L'exemple, cité dans [7], du robot démineur à pattes qui en perd une à chaque explosion pourrait entrer dans cette catégorie.

CONSCIENCE DE NIVEAU II

Conscience de soi

Il s'agit, pour l'homme, de la conscience du « Je », ou du « Moi », en allant jusqu'à la « conscience de la conscience ».

Cela paraît complexe à mettre en œuvre dans un robot. Il est déjà difficile de reconnaître cette fonctionnalité chez les animaux (tentative du « test du miroir »). En revanche, il paraît possible de donner à une machine les attributs « apparents » de cette conscience de soi. Par exemple, le robot peut avoir « conscience » de ses pannes et procéder automatiquement à des reconfigurations. Le modèle proposé dans [1] précise cette problématique, mais il n'y a pas d'implémentation.

Mémoire

Il s'agit, pour l'homme, de l'ensemble du « Savoir », ce qui correspond à : « Je sais » (et, plus important, le niveau « méta » : « Je sais que je sais » ou « Je sais que je ne sais pas »).

La communication générale [1] distingue plusieurs types de mémoires : court / long terme, sémantique / des épisodes, implicite / explicite, motrice, mémoire des informations intérieures à l'individu (émotions), « inconscient », etc. et insiste sur les relations étroites entre mémoire et apprentissage.



Les robots militaires ont-ils déjà une certaine « conscience » ?

Le robot peut disposer d'une grande capacité de mémoire, très fiable. Exemple : cartographie de terrain. C'est un domaine où l'informatique du robot peut avantageusement concurrencer le cerveau humain.

Il s'agit non seulement de mémoire sémantique et explicite, mais encore de mémoire épisodique liée à l'apprentissage (déjà « Google » ou certains appareils photos s'adaptent à l'usage qu'on en fait).

Doit-on doter le robot d'un « inconscient » ? Les travaux de Gérard Sabah sur le traitement automatique des langues montrent la nécessité de processus « inconscients » (automatiques, irrépessibles), ainsi que l'utilité (si ce n'est la nécessité) d'une gestion « non rationnelle » (c'est-à-dire n'utilisant pas de règles uniquement logiques) de la mémoire pour permettre l'émergence automatique des éléments connus les plus pertinents dans le contexte.

CONSCIENCE DE NIVEAU III

Aspects individuels

Représentation de soi

Il s'agit, pour l'homme, d'avoir une « image de soi », faisant éventuellement appel à la dualité corps + esprit.

Le robot doit avoir une image partielle de lui-même et de ses capacités (au moins l'image géométrique de son corps pour planifier correctement ses déplacements).

Imagination*

C'est, pour l'homme, la possibilité de représentation d'éléments imaginés (reconstruits et ne figurant pas dans l'environnement courant), d'une scène virtuelle (à partir d'éléments mis en mémoire), pour comparaison éventuelle avec la scène réelle perçue.

Chez le robot, cela est déjà mis en œuvre, par exemple pour les besoins de recalage de navigation ou d'identification de cible.



Émotions*

Selon Damasio, un être humain ne peut satisfaire sa propre homéostasie s'il ne dispose pas des fonctionnalités cérébrales correspondant aux émotions.

■ *Ces fonctionnalités sont-elles utiles pour le robot ? Ne peuvent-elles pas être plutôt néfastes ? Cela est à analyser avec soin !*

Il est, d'une part, loisible de penser que les émotions sont indispensables à des raisonnements intelligents et à une adaptation efficace à un contexte changeant et imprévisible [1].

Mais, d'autre part, ne nuiraient-elles pas à l'« objectivité » du robot ? Dans la référence [12], signalée par Philippe Coiffet, il est mentionné que l'un des chercheurs qui ont été le plus loin dans la conception de robots éthiques est Ronald Arkin du *Georgia Institute of Technology* à Atlanta, qui travaille surtout pour la défense. Arkin dit que ce ne sont pas les limitations éthiques des robots dans la bataille qui inspirent son travail, mais les limitations éthiques des êtres humains. Il cite deux incidents (connus) en Irak, l'un dans lequel des pilotes d'hélicoptère sont supposés avoir achevé des combattants blessés, et un autre dans lequel des marines à Haditha ont tué des civils ; influencés peut-être par la peur ou la colère, les « marines » peuvent, dit-il, avoir « tiré d'abord, puis se [sont posé] des questions plus tard, et le résultat c'est que des femmes et des enfants sont morts ». *Dans le tumulte de la bataille, des robots ne seraient pas affectés par des émotions volatiles*. En conséquence, ils seraient probablement moins sujets à commettre des erreurs sous le feu, croit Arkin, et moins sujets à frapper des non-combattants. En bref, ils pourraient prendre de meilleures décisions éthiques que les hommes (voir plus loin).

Sentiments

Toujours selon Damasio, les sentiments correspondent à une prise de conscience des émotions, intervenant de manière décalée dans le temps.

■ *Pour le robot, sont-ils utiles ? Néfastes ? À analyser également avec soin.*

Il est possible de penser que les sentiments sont utiles, étant vus comme des émotions rendues conscientes [1]. *A contrario*, ne peuvent-ils pas nuire à l'objectivité du robot ? Le robot peut-il être passionné ?



Les robots militaires ont-ils déjà une certaine « conscience » ?

Pouvoir

Au sens, pour l'homme, de « avoir la capacité de ... ». Permet d'affirmer : « Je peux », au sens de « Je suis capable de ... ».

Dans la planification de l'action, le robot doit pouvoir juger si elle lui est possible ou impossible. Cela est déjà mis en œuvre en partie.

Liberté / Autonomie

C'est, pour l'homme, le « Je peux », au sens de « Je suis libre de ... ».

Le libre arbitre de l'homme doit se voir à l'aune de la capacité de veto, plus qu'à celle de l'intentionnalité. La plupart de nos actes sont déclenchés en fonction d'un aval autoréférent et non pas en fonction d'un amont planificateur. Cela pose la question de la formation des mécanismes de veto.

Le robot dispose d'une certaine capacité de décision qui ne relève pas du libre-arbitre, apanage de l'homme, ou du libre choix dont disposent déjà beaucoup d'animaux, mais seulement de l'existence d'une variété de comportements apparaissant de façon déterministe, ce qui ne veut pas dire maîtrisée, en fonction de l'environnement.

La tendance est de donner le plus d'autonomie possible au robot militaire (pour éloigner l'opérateur humain du danger⁷² et se soustraire aux contre-mesures comme le brouillage ou le piratage) sans lui laisser trop de liberté pour des raisons éthiques (*maîtrise de la situation* par l'homme) et parce que le robot, comme tout bon soldat, doit avant tout obéir. Il faut donc concilier liberté et obéissance.

Volonté

C'est, pour l'homme, le « Je veux ».

Pour le robot, c'est l'opérateur qui « veut » pour le robot, dans la « commande » du robot ou, au moins, dans la définition de sa mission, si on laisse au robot une certaine autonomie. Dans ce cas, le robot peut être amené à « vouloir » pour définir certains sous-objectifs.

⁷² Bien que, nous l'avons vu, la téléopération à grande distance soit maintenant possible.



Attention*

Permet à l'homme de sélectionner les informations pertinentes.

La sélection et la présentation des informations pertinentes « à l'instant t » sont déjà mises en œuvre pour le pilotage des avions (IHM). Elles peuvent être étendues aux drones (soit pour envoi au sol à l'opérateur, soit pour le fonctionnement autonome du robot).

Jugement/Évaluation*

Pour le robot, comme pour l'homme, le jugement doit intervenir notamment dans la planification de l'action (possible ? impossible ? voir plus haut) et la comparaison entre l'action effectuée et l'action souhaitée (jugement « de valeur », évaluation), notamment à des fins d'apprentissage.

Planification*

Cette fonctionnalité est à rapprocher de « pouvoir ». Il est essentiel de fixer le « terme » de l'action (l'« horizon », au sens des automaticiens). De distinguer entre le court, le moyen et le long terme.

Pour un robot, la planification est limitée, pour l'instant, au court / moyen terme (planification d'une action / d'une mission), mais on est encore loin d'un « projet d'existence » (qui n'est sans doute pas souhaitable !).

Décision

Pour l'homme, Daniel Kahneman⁷³ [13] rappelle que nos décisions résultent de jugements. Notre premier jugement est toujours intuitif (et facile). Si on fait un effort, on accepte de le modifier ou de le compléter, dans un second temps, avec un jugement plus rationnel, c'est-à-dire faisant appel aux connaissances disponibles qu'on a négligées dans le premier jugement intuitif. La plupart du temps on refuse cet effort, d'où nos erreurs et pérégrinations dans nos décisions d'actions.

⁷³ Prix Nobel d'économie en 2002, spécialiste des systèmes de décision.



Les robots militaires ont-ils déjà une certaine « conscience » ?

Pour le robot, cette analyse s'applique particulièrement bien à la décision de feu évoquée ici. Le fait que cette décision relève de l'opérateur n'apporte pas de garantie particulière à sa qualité (par rapport à celle que pourrait prendre un robot) si l'opérateur s'en tient au jugement intuitif. D'où la nécessité de règles d'autorisation de feu extrêmement réfléchies et probablement transposables pour l'essentiel sur un robot. Dans les deux cas on ne pourra évidemment faire face à « l'impondérable ». Mais ce point de vue semble riche d'exploitation possible.

Commande⁷⁴

Aspect très important et bien développé pour les robots. Il est même possible de noter que cette commande (lorsqu'elle est automatique) est à l'abri de certaines perturbations ou « bruits » liés, chez les humains, aux émotions et aux sentiments !

Cependant, la complexité peut rendre ce contrôle difficile et conduire à une certaine imprévisibilité du comportement (voir plus haut).

Adaptation

L'adaptation permet à l'homme de réagir efficacement face à l'imprévu.

Cette capacité est essentielle pour le robot compte tenu de la variété des conditions d'emploi et des théâtres d'opération. Fort heureusement, des théories implémentables sont disponibles : commande robuste, commande adaptative, etc.

Apprentissage

Fonctionnalité classique chez l'homme.

Elle est mise en œuvre chez certains robots militaires (ce qui les distingue alors encore plus nettement d'autres types d'armements comme les missiles) et il est essentiel que l'homme en garde la maîtrise.

Voir par exemple, plus loin, la méthode dite *bottom-up* (le robot se forge sa propre expérience).

⁷⁴ *Control*, en anglais. La commande assure l'accomplissement correct du processus planifié. Elle met en jeu la rétroaction (bouclage).



Intelligence

Cette fonctionnalité, bien qu'essentielle, est citée en dernier car elle regroupe plusieurs des fonctionnalités précédentes et l'accent a été mis ici sur la conscience (artificielle) et non l'intelligence (artificielle), maintenant plus classique.

Les progrès de l'informatique et de quelques autres sciences (micromécanique, nanomécanique, technologie des sources d'énergie et, depuis peu, biologie) sont rapides et leurs applications aux robots sont spectaculaires, même si la conquête de l'intelligence humaine (ou même de son apparence) par le robot reste encore bien lointaine et, même, incertaine.

Aspects collectifs

Perception des autres

Pour l'homme, il s'agit d'identifier les autres, de reconnaître leurs postures et leur langage, d'attribuer des désirs, des intentions, des motivations aux autres, de prédire leur comportement.

Pour le robot militaire, la fonction identification des autres (robots ou humains ? – amis ou ennemis ?) est essentielle. La perception correcte de l'existence et la catégorisation des autres est loin d'être maîtrisée. Cependant, il est dit que le petit robot (civil !) Nao est déjà capable de reconnaître l'« humeur » des personnes qui l'entourent !

Communication

Pour l'homme, il s'agit d'une fonctionnalité élémentaire (interactions non nécessairement symboliques avec les autres, en deçà du langage), qu'il partage avec bien d'autres êtres vivants.

Pour le robot, il peut s'agir de communication simple avec l'opérateur ou éventuellement avec d'autres robots. Cet aspect ne paraît pas soulever de gros problèmes, d'autant plus que l'utilisation de liaisons satellitaires⁷⁵ pourrait se généraliser.

⁷⁵ Il faut être prudent sur ce point. Les « bandes satellites » disponibles sont limitées, les opérations militaires les ont toujours saturées, elles ne sont pas discrètes et sont tout aussi vulnérables aux contre-mesures, aux brouillages, aux altérations d'intégrité, etc. que les liaisons plus « locales » (utilisant, pour les communications au-delà de l'horizon, des drones relais tournant en rond, décalés par rapport au théâtre d'opérations).



Langage

Pour l'homme, c'est une forme évoluée de communication (interactions symboliques).

L'utilisation d'un véritable langage entre le robot et l'opérateur, d'autres humains ou d'autre robots, est beaucoup plus ambitieuse. Mais est-elle indispensable ou même souhaitable ? Dans certaines situations, il peut être bien utile que le robot militaire sache dire au moins : « Mot de passe ? » ou « Haut les mains ! » dans plusieurs langues. Mais cela ne va pas très loin.

En fait, le problème de la pertinence d'un langage oral (lequel ?) entre l'homme et le robot n'est pas résolu. Le robot doit-il paraître intelligent aux interlocuteurs ou, au contraire, borné ? On ne le sait pas, car cela dépend des situations qu'il faut d'abord identifier, classer, etc. Seules les recherches et les expériences permettront de savoir là où l'on doit aller.

Comportement collectif

Pour l'homme, il s'agit des comportements qui relèvent de la sociologie.

Pour le robot, ce comportement est à l'étude car, comme il a été vu, il est maintenant question de groupes de robots, d'escadrilles de drones, d'essaims de minirobots (par exemple pour retrouver des victimes sous les décombres), de groupes de robots dissemblables, etc. L'utilisation de la théorie des jeux coopératifs peut alors avoir de l'intérêt.

Par exemple, une escadrille de drones doit pouvoir s'autogérer pour satisfaire globalement la contrainte de navigation, tout en évitant les collisions.

Empathie

Pour l'homme, Serge Tisseron rappelle dans [7] que l'empathie n'est ni la sympathie (partage des mêmes émotions, valeurs, objectifs), ni la compassion (accent sur la souffrance). Elle peut être représentée sous la forme d'une pyramide constituée de trois étages superposés, correspondant à des relations de plus en plus riches, partagées avec un nombre de plus en plus réduits de gens :

- (a) empathie directe ou identification (se mettre à la place de l'autre), avec ses composantes cognitive et émotionnelle ;



- (b) empathie réciproque (désir d'une reconnaissance mutuelle), qui peut s'étendre au monde non humain (animaux, plantes, objets) et qui a trois facettes :
 - (b.1) reconnaître à l'autre la possibilité de s'estimer lui-même, comme je le fais pour moi (narcissisme) ;
 - (b.2) lui reconnaître la possibilité d'aimer et d'être aimé (relations d'objet) ;
 - (b.3) lui reconnaître la qualité de sujet de droit (relation au groupe) ;
- (c) intersubjectivité (reconnaître à l'autre la possibilité de m'éclairer sur des aspects de moi-même que j'ignore).

L'intérêt de l'implémentation de cette fonctionnalité d'empathie chez le robot dépend du type de robot considéré. Elle paraît d'autant plus difficile que le niveau visé de la pyramide est plus élevé.

Le niveau (a) est essentiel pour le « robot de compagnie », qui doit prévenir la plupart des désirs de la personne dont il a la charge. Mais le robot militaire ne devrait-il pas également savoir se « mettre à la place » des civils impliqués malgré eux dans un conflit ?

Le niveau (b.3) est important pour le fonctionnement en groupe, soit de robots, soit même de robots et d'humains.

Le niveau (c) paraît pour l'instant relever de la science-fiction. Il peut être considéré comme lié à l'apprentissage, mais à présent ce dernier est plus imposé par l'homme que véritablement « accepté » par le robot. Le robot n'est heureusement pas encore suffisamment évolué pour être en mesure de refuser cet « éclairage » de la part de l'homme sur les aspects encore imparfaits de lui-même, comme le fait brutalement l'ordinateur révolté dans le film L'odyssée de l'espace.

Notons que, *a contrario*, dans cette intersubjectivité, l'homme peut déjà reconnaître au robot la possibilité de l'éclairer sur des aspects de lui-même qu'il ignore. Par exemple, la réflexion approfondie sur la modélisation du comportement du robot fait progresser notre connaissance des processus mentaux chez l'homme. Mais ce n'est pas (encore ?) le robot qui le dit à l'homme, c'est la robotique !

La fonctionnalité d'empathie est donc, pour l'instant, peu présente chez le robot. Mais l'empathie est, de façon générale, une notion importante en robotique militaire comme nous le montrera plus loin Serge Tisseron.



Chapitre 3

UN SUPPLÉMENT DE « CONSCIENCE » POUR LES ROBOTS MILITAIRES ?

Faut-il doter les robots militaires d'un supplément de « conscience » ? Est-ce possible ? Dans quels domaines préférentiels ?

Compte tenu des perspectives offertes par le développement de la robotique militaire avec une tendance forte vers une plus grande autonomie des robots, y compris pour le feu (voir plus haut), le degré de « conscience » actuellement présent chez le robot militaire (voir la section précédente) paraît très insuffisant pour faire face, notamment, aux problèmes d'éthique qui ne manqueront pas de se poser. Des efforts doivent être faits pour améliorer certaines fonctionnalités de la conscience intéressant plus spécifiquement les robots militaires. Quelles sont les fonctionnalités à améliorer en priorité, compte tenu du contexte de guerre ? Comment procéder ?

FONCTIONNALITÉS PRIORITAIRES

L'opinion publique d'un pays tolère la guerre, lorsqu'elle est politiquement inévitable, mais l'opinion publique occidentale admet de plus en plus difficilement qu'un conflit fasse de trop nombreuses victimes dans son propre camp (concept de « zéro mort » ; cela dépend de l'importance de l'enjeu) et – souvent plus par



crainte de l'opinion publique mondiale que par altruisme ! – trop de « bavures » (par exemple, dommages collatéraux sur les populations civiles) dans le camp adverse.

Si, pour satisfaire au premier objectif et limiter les risques, des robots militaires sont utilisés pour éloigner le combattant du champ de bataille, nous avons vu que, pour satisfaire au second objectif, il fallait faire un effort tout particulier dans le domaine de l'*identification des cibles* (d'autant plus que l'ennemi peut utiliser des civils comme boucliers humains). Cela peut être facilité par le fait que le robot peut s'approcher (sans peur, si ce n'est sans risque !) plus près de la cible. C'est ce qui a été tenté récemment en Libye en utilisant des drones téléopérés plutôt que des avions pour des attaques au sol. Cette identification précise des cibles peut, dans certains cas, nécessiter un effort particulier dans le domaine de la *communication*, voire du *langage*. Cela permet d'éviter également les bavures dans le camp ami, encore plus inacceptables.

Pour les robots disposant d'une certaine autonomie (d'action), il faut également s'efforcer de *concilier au mieux autonomie et obéissance*, afin que l'Homme (chaîne de commandement) puisse toujours garder la *maîtrise de la situation*.

Enfin, les perspectives offertes par l'utilisation de groupes ou essaims de robots demandent un complément d'étude sur leur *comportement collectif*.

Il a été vu plus haut que certaines composantes de la fonctionnalité empathie [7] mériteraient d'être développées.

COMMENT AMÉLIORER LA « CONSCIENCE » DES ROBOTS ?

L'étude [1] propose une méthode générale pour doter les robots d'un supplément de conscience (modèle CAMEL de Gérard Sabah, avec ceux de Cardon et Pitrat). L'application de cette méthode au cas particulier des robots militaires, pose des problèmes plus spécifiques ; elle doit être rendue possible en mettant l'accent (*pondération*) sur les fonctionnalités prioritaires qui les caractérisent. Nous en avons souligné quelques-unes : identification, commande, adaptation, apprentissage, etc.

D'autres approches ont été proposées qui mettent l'accent sur l'éthique, aspect particulièrement important pour les robots militaires. Elles partent de la constatation qu'un robot autonome décide lui-même ce qu'il doit faire. Il doit donc avoir une éthique qui guide sa conduite. Mais comment programmer des valeurs abstraites ?



Une *première méthode*, dite *top-down*, consiste à choisir des règles auxquelles le robot se réfère pour déterminer si l'action qu'il s'apprête à faire est éthiquement acceptable. Mais comment s'assurer que le robot a accès à toute l'information dont il a besoin ? De plus, ces règles exposent souvent le robot (comme les hommes !) à des choix cornéliens.

Pour trancher, l'approche utilitariste consiste à calculer les conséquences des actions possibles pour sélectionner celles qui bénéficieront au plus grand nombre. Mais elle n'est guère opérationnelle, car le robot ne peut pas toutes les calculer, même en se limitant au futur proche voire quasi immédiat, dans le court laps de temps dont il dispose généralement pour agir.

Dans une *deuxième méthode*, dite *bottom-up*, le robot se forge sa propre « morale »⁷⁶. Pour son apprentissage, on crée un environnement dans lequel on essaie différents comportements et le robot est « récompensé » si son action correspond à ce qu'on attend de lui. Les principes moraux sont alors découverts peu à peu.

Bien sûr, face à une situation nouvelle, un tel robot ne pourra se fier qu'à son expérience, qui risque de se révéler insuffisante. De plus, on ne peut prévoir ce qui va « émerger » d'un tel processus et cela peut se révéler dangereux.

Une *troisième méthode* consiste à rendre le robot intrinsèquement vertueux en définissant plutôt le « caractère » qu'il doit avoir. La logique est alors de dire que les actions d'un agent ne constituent pas une moralité mais la révèlent. La question n'est plus « quelle règle suivre ? » mais « qu'est-ce que cette action révélerait que je suis ? ». On s'affranchit dès lors du contexte. Au concepteur d'intégrer un ensemble de vertus, à définir pour chaque type de robot.

⁷⁶ Sans oublier que c'est l'homme qui a défini le programme. Cette vision est à rapprocher de la thèse suivante, développée (pour l'homme) par Francisco Varela, dans *Quel savoir pour l'éthique ? Action, sagesse et cognition* – La découverte, 1996: plutôt que de rechercher ou d'édicter des normes du juste ou du bien, une éthique pragmatique doit retrouver nos capacités d'action incarnées et les cultiver à partir du quotidien jusqu'au niveau d'une sagesse. L'auteur confronte cette approche aux grandes traditions de sagesse orientale: le confucianisme, le taoïsme et le bouddhisme. Dans ces traditions, l'homme vertueux, l'expert en éthique, n'agit pas d'après un ensemble de règles morales, mais incarne plutôt un « savoir-faire ». Ainsi, si la question de l'éthique doit être posée, il n'est pas dit qu'il suffise de faire référence au bien et au mal (lesquels, nous l'avons vu, font référence à une civilisation particulière), mais bien plus de chercher une sagesse pratique.



Mais comment le robot va-t-il savoir à quelle vertu faire appel dans une situation donnée et quelle action lui correspond ? En outre, chez l'homme, les émotions jouent un rôle clé pour établir cette correspondance. Faudra-t-il introduire des pseudo-émotions chez les robots ? Cela entraînera-t-il l'introduction de sentiments ? (voir plus haut).

Une *quatrième approche* est due à Arkin [12]. Nous avons vu plus haut que la « non-émotivité » du robot pouvait constituer un avantage. Dans le système d'Arkin, un robot essayant de déterminer s'il doit ou non faire feu serait guidé par un « gouverneur éthique » implanté dans son logiciel. Quand un robot se trouve face à une cible potentielle et l'a en poursuite, le gouverneur vérifierait un ensemble de contraintes préprogrammées basées sur les règles de l'engagement et les lois de la guerre. Un tank ennemi situé dans une zone large, par exemple, obtiendrait tout à fait vraisemblablement le feu vert (*go ahead*) ; un enterrement suivi par des hommes armés, dans un cimetière, serait en dehors des limites autorisées comme une violation des règles d'engagement.

Un second composant, un « adaptateur éthique », restreindrait les choix des armes du robot. Si une arme trop puissante pouvait causer des dégâts non désirés ou non prévus (par exemple un missile pourrait détruire un bâtiment avec des appartements, en sus du tank), l'ordre de tir serait annulé jusqu'à ce que le système soit ajusté. Arkin dit que ceci serait comparable à un modèle robotique de culpabilité.

Il laisse la place en dernier ressort à un jugement humain à travers un « conseiller en responsabilité », un composant qui permet à une personne de surpasser (*override*) le gouverneur éthique programmé de manière conservatoire, si la personne décide que le robot est trop hésitant ou dépasse l'autorité qui lui a été accordée. Le système n'est pas encore opérationnel, admet Arkin, mais ce dernier travaille sur une telle approche « afin d'obtenir que les militaires regardent les implications éthiques aussi bien que la communauté internationale ».

En conclusion, ce qui semble intéressant dans cette approche, c'est :

- ▶ le fait qu'un robot puisse faire moins d'erreurs qu'un homme parce qu'il n'a pas d'affect. Cela relance la discussion sur le problème décisionnel (voir Daniel Kahneman [13]) ;
- ▶ le fait que, *in fine*, malgré la sophistication du « gouverneur éthique » et du « conseiller éthique », c'est quand même le militaire « homme » qui décide quand il y a ambiguïté.



Un supplément de « conscience » pour les robots militaires ?

Ainsi, ce système a un grand intérêt pratique ; il ne doit cependant être considéré que comme une assistance sophistiquée au militaire, lui évitant de se disperser dans les décisions faciles, mais le laissant largement responsable des décisions de haut niveau.

Aucune approche ne pourra sans doute garantir une éthique parfaite chez le robot⁷⁷. Mais celle des humains n'est pas parfaite non plus ! Et l'objectif, plus modeste, n'est-il pas de faire juste aussi bien, voire peut-être un peu ou même beaucoup mieux (?), que l'homme (le combattant, bien sûr, et non pas le concepteur, puisque c'est ce dernier qui définit l'éthique du robot !).

⁷⁷ C'est plutôt une question d'implémentation et de validation, en vérifiant de plus que les valeurs mises en place chez le robot sont intangibles.





CONCLUSION – ASPECTS PRIORITAIRES

Les considérations précédentes ont tenté d'apporter des éléments de réponse à la question de savoir si les robots militaires (les robots de l'avenir lointain, évidemment) pourraient se voir dotés d'une certaine « conscience morale⁷⁸ ». Ce questionnement est aussi ancien que le concept même de robot (pensons aux œuvres d'Asimov).

Sauf à imaginer un lien entre robots et biotechnologies, il semble que la question pourrait avoir pour réponse que, quelle que soit la « morale » dont un robot donnerait l'apparence d'être pourvu, cette morale ne serait pas, pendant sans doute très longtemps, la sienne mais celle de son concepteur⁷⁹ ou de son utilisateur⁸⁰ et que ceux-ci devraient donc limiter le comportement du robot dans le cadre d'une morale acceptable. Sans vouloir trop faire dire à la réflexion

⁷⁸ Au plan militaire, il s'agit de traduire en règles de comportement le droit de la guerre (*Jus in bello*) et les règles d'engagement; ceci de façon nécessairement simplifiée.

⁷⁹ Ce qui amène certains à préconiser « l'amélioration des concepteurs », partant de la constatation que plus l'éthique des concepteurs est grande plus celle des robots l'est.

⁸⁰ Les règles peuvent être reprogrammées pour des missions spécifiques par le combattant à différents niveaux : stratégique (CEMA), opératif (commandant de théâtre) ou tactique (officier sur le terrain).



sur les robots ce qu'elle est manifestement incapable d'exprimer, il semble que cet aspect de l'éthique des robots conduirait à séparer encore plus difficilement demain qu'aujourd'hui l'éthique du concepteur d'armes de celle du combattant.

Il faut insister sur le fait que les robots actuels, déjà en service, mais encore peu nombreux, sont des robots simples qui ne présentent que peu de caractéristiques posant des problèmes spécifiques d'éthique, même si les dommages collatéraux, notamment sur des théâtres comme l'Afghanistan, semblent se multiplier en raison, essentiellement, des règles d'engagement utilisées.

Les conclusions qui suivent sont donc surtout orientées vers les robots de l'avenir. Un avenir à l'horizon de dix à vingt ans au cours duquel il est prévu un développement exponentiel de ces robots avec inclusion progressive d'une informatique de plus en plus puissante conduisant à des comportements de plus en plus complexes et difficiles à prévoir et à contrôler.

Ajoutons, ensuite, que les limites du sujet sont particulièrement floues et ceci à double titre :

- ▶ une définition complète, exhaustive et sans ambiguïté d'un « robot » est difficile à établir, comme on a pu le constater. C'est dire que la limite entre ce qui peut être considéré comme un robot et ce qui n'en est certainement pas n'est toujours discutable ; d'ailleurs de nombreuses armes, sans pouvoir être qualifiées de robots, possèdent des parties d'elles-mêmes qui y ressemblent beaucoup (exemples : missile de croisière, torpille) ;
- ▶ l'évolution des technologies est tellement rapide et tellement diversifiée qu'on ne peut pas avoir une vision complète et stable de la « population » des robots, encore moins de son évolution.

Ceci étant admis, deux caractéristiques des robots semblent devoir être prises particulièrement en considération d'un point de vue éthique :

- ▶ ce qui est robotisé dans un système d'armement, c'est le dispositif de « mise en œuvre » (y compris la « livraison ») et non la partie vulnérante. Ce qui doit être examiné du point de vue éthique, ce sont les possibilités d'emploi qu'il offre et les comportements qu'il peut favoriser. Pour faire simple, c'est davantage un « vecteur » qu'une arme proprement dite ;
- ▶ plus spécifique au robot est son imprévisibilité, qui peut être directement liée à sa conception, qui peut résulter d'interactions imprévues entre le robot et son environnement ou, encore, qui peut seulement résulter du fait



qu'aucun système informatique rendu très complexe par la multiplicité de ses capteurs et de ses logiciels n'est à coup sûr exempt de tout défaut⁸¹.

Enfin, il a été dit plus haut que, si la fonctionnalité empathie était, pour l'instant, peu présente chez le robot, la notion générale d'*empathie* était essentielle en robotique, notamment militaire. Serge Tisseron [7] en distingue quatre aspects :

Effort pour s'attirer le soutien des populations locales

Le robot ne doit pas être vécu comme le prolongement technologique d'une société qui aurait perdu son âme. Il doit y avoir des combattants humains sur le terrain pour prouver que le pays qui a décidé d'envoyer ses soldats a de bonnes raisons de mener cette guerre puisqu'il admet de risquer des vies humaines. Les habitants du pays où la force est déployée auront alors le sentiment d'être considérés comme des êtres humains.

Dans la même optique, il serait sage de laisser toujours la décision de feu à un opérateur humain.

Enfin, il faut que les combattants soient en nombre suffisant pour établir avec les populations locales des liens d'échange et de reconnaissance réciproque (empathie de niveau 2).

Tentation de transformer le combattant de terrain en robot

Avec les systèmes performants de transmission déployés, les officiers supérieurs, très éloignés du terrain de combat, ont accès en temps réel aux mêmes informations que les combattants de terrain et risquent d'abuser de cette situation pour commander les opérations dans un tel détail que les combattants de terrain peuvent avoir l'impression d'être traités... comme des robots ! Par exemple, l'autorisation de feu peut être suspendue à un lointain officier. C'est l'empathie des différents agents les uns pour les autres qui risque d'en souffrir, avec, à terme, un problème de cohésion entre ces différents « frères d'armes ».

⁸¹ Les fameux « bugs » ou « bogues » dont tous les utilisateurs d'ordinateurs personnels sont familiers. Il existe cependant des méthodes formelles permettant de garantir l'absence d'erreur dans un programme informatique, mais jusqu'à quel niveau de complexité ?



C'est pourquoi, il pourrait être opportun de fixer comme règle que celui qui se trouve sur place, dans le feu de l'action, soit le décideur et le responsable légitime, sa présence sur le terrain primant sur le grade hiérarchique⁸².

Échanger sans se voir

Les ordinateurs ont banalisé les communications sur les forums et par *chat*. Rien d'étonnant donc si les pilotes de drones qui commandent leurs engins depuis leur bureau communiquent entre eux par ces moyens. Comme dans les jeux vidéo en réseau où les « combattants » agissent très souvent sans se connaître et ne s'être jamais rencontrés, le problème de la confiance à accorder à un autre combattant dont on ne connaît rien est identique.

Il serait donc opportun d'organiser régulièrement, comme cela se fait dans certaines guildes de joueurs, des rencontres IRL (*In Real Life*) des combattants de bureau amenés à combattre ensemble par écrans et *chats* interposés.

De même, il serait utile que les combattants de bureau (opérateurs de drones par exemple, éloignés du champ de bataille) aient eu, à un moment ou à un autre, une expérience de terrain. La capacité qu'a chaque soldat de s'imaginer « à la place » de ses compagnons de combat (empathie de niveau 1) est en effet un élément fort de la qualité et de l'efficacité de leur collaboration.

Empathie homme-robot

Il a déjà été vu plus haut, à propos de l'empathie réciproque (niveau 2), que cette empathie humaine pouvait s'exercer non seulement vis-à-vis des humains, mais également vis-à-vis des animaux, des plantes et même des objets, car nous avons tendance à projeter sur eux toutes sortes de pensées, d'émotions et de sentiments. Plus nous nous projetons en eux, plus nous nous sentons en confiance avec eux⁸³.

Les pilotes de chasse de la dernière guerre ne peignaient-ils pas des effigies ou des noms sur leur avion. Les pilotes de bombardiers inscrivaient souvent un nom

⁸² Dans le film *Les sentiers de la guerre*, l'artilleur qui se voit demander par radio par son supérieur de tirer sur ses propres fantassins pour les faire sortir des tranchées exige un ordre écrit... qui ne lui est pas donné. Dans ce domaine le grand changement a été l'invention du téléphone.

⁸³ Cette empathie homme-robot est très différente en Occident et en Extrême-Orient (Japon notamment) [9].



de baptême sur les bombes (même nucléaires !) qu'ils allaient larguer !

L'empathie des combattants pour un robot militaire paraît devoir être d'autant plus forte que ce dernier a une apparence humaine (robot humanoïde), car ces combattants, qui vivent des situations très stressantes et émotionnellement très fortes, pourraient créditer volontiers le robot qui participe aux opérations avec eux, de partager aussi les émotions ambiantes, surtout s'il avait un jour des mimiques semblables à celles d'un être humain.

Mais il apparaît que cette ressemblance à l'homme ne doit pas être poussée trop loin, pour au moins deux raisons :

- ▶ il a été montré que lorsque la ressemblance devient trop grande, notre confiance chute brutalement : le robot devient angoissant. Il est donc recommandé de préférer un robot ayant une vague apparence humaine, mais des attitudes et des mouvements rassurants (pour le combattant ami !), comme par exemple les robots du film *La guerre des étoiles*, dont l'original R2-D2⁸⁴ ;
- ▶ il faut éviter une trop grande empathie du combattant envers le robot, pouvant aller jusqu'à ce que le soldat risque sa vie pour « sauver » le robot⁸⁵, qui perdrait ainsi sa raison d'être qui est d'économiser la vie des soldats !

Il est préconisé d'éviter une relation trop personnalisée du soldat à un robot privilégié, avec lequel il pourrait croire partager les mêmes expériences de combat. Il semble ainsi préférable d'affecter un robot à une équipe, plutôt qu'à un seul individu. Il est à noter que cela est différent de ce qui est le cas pour le couple « maître-chien », mais il est généralement moins exposé.

Une autre solution est d'utiliser de préférence des robots « animaliers », et notamment à forme d'insectes (plutôt que d'animaux domestiques, mieux adaptés

⁸⁴ Ces considérations sont également valables pour les « robots de compagnie ». Notons au passage que, pour eux, une certaine souplesse structurale est recherchée (nouveaux matériaux) [9], vraisemblablement moins importante pour les robots militaires.

⁸⁵ Ce cas est à distinguer de celui d'un individu cupide, prêt à risquer sa vie pour acquérir de l'argent ou quelque trésor supposé, et donc à sauver son robot considéré comme un outil indispensable pour parvenir à ses fins. Ce ne serait manifestement pas par empathie pour le robot !



aux robots de compagnie où une grande empathie envers eux est recherchée). Mark Tilden cite cependant l'exemple d'un colonel qui avait trouvé « inhumain » le test d'un robot démineur, en forme de phasme, déjà cité plus haut, se faisant exploser une patte après l'autre en parcourant un champ de mines !

Mais les considérations précédentes sur l'empathie de l'homme pour le robot concernent le combattant ami. Pour le combattant ennemi, le robot ne doit-il pas paraître plutôt « antipathique ». Quelle apparence alors lui donner ? Celle d'un humanoïde aux mimiques terrifiantes ? ou d'un animaloïde à la forme et au comportement effrayants ? Quel impact cela peut-il avoir sur les populations civiles non combattantes, dont on peut souhaiter se rapprocher ?

À partir de ces constatations, il convient de relever quatre aspects prioritaires à prendre en compte. Les trois premiers sont empruntés à [2], le quatrième découle de ce qui a été dit sur l'empathie [7].

RÉDUIRE L'IMPRÉVISIBILITÉ DU ROBOT MILITAIRE

Le degré d'imprévisibilité d'un robot, même s'il n'est pas complètement mesurable ni estimable, doit faire l'objet d'une attention critique soutenue. Depuis toujours, c'est une attitude de bon sens que d'exiger de connaître le plus précisément possible les effets d'une arme avant de l'adopter et, *a fortiori*, de l'employer : on fait tout, dans la construction du canon et dans son emploi, pour savoir au mieux où va tomber l'obus ! Dans le même souci de maîtrise de l'action, on entraîne la troupe pour que ses réactions sur le terrain soient bien celles que l'on souhaite.

Ce qu'il faut souligner, c'est que dans le cas des robots le sujet est particulièrement grave ; au point que si l'imprévisibilité d'un robot semble excessive (d'où la nécessité de disposer d'une norme, fût-elle en partie intuitive), ce robot devient non opérationnel avant même d'être non éthique. Le fait de doter un robot autonome d'une certaine « morale⁸⁶ », d'abord par la transcription des règles d'engagement, outre la difficulté technique de sa réalisation, est aussi une question de principe :

⁸⁶ C'est-à-dire d'un comportement résultant de la prise en compte par ses concepteurs de contraintes morales.



est-ce acceptable éthiquement ? L'obéissance aux règles d'engagement peut-elle être sous-traitée à un automate, aussi sophistiqué soit-il ?

Nous avons vu que l'une des sources d'imprévisibilité est une mauvaise *conscience (représentation) de la situation* dans laquelle se trouve le robot. Une autre est l'*identification* défectueuse des cibles, qui peut conduire à des « bavures » désastreuses dans le camp adverse (et même quelquefois dans son propre camp !). Ces fonctionnalités de la « conscience » du robot méritent une attention toute particulière.

GARDER LE SENS DES RESPONSABILITÉS, MALGRÉ LA FACILITÉ D'EMPLOI

Comme on l'a vu, l'introduction des robots est susceptible de modifier la hiérarchie et la répartition des responsabilités. Notre perception de ces responsabilités peut s'en trouver brouillée, avec toutes les conséquences éthiques que cela comporte.

En particulier, avec l'emploi massif de robots, des opérations de guerre pourraient être menées sans mettre aucun combattant ami en danger. Certes, c'est en soi une bonne chose. Mais cela doit aussi nous inciter à rester vigilants sur le risque que cela puisse conduire à consentir trop facilement à la violence la plus extrême. On retrouve ici, mais en beaucoup plus grave, une observation faite au sujet des armes non létales. Il faut toujours veiller à apporter une réponse adaptée.

L'emploi généralisé des robots pourrait même conduire à une révision de la « Convention de Genève ».

MAÎTRISER LA SITUATION, FACE À UNE COMPLEXIFICATION CROISSANTE

Tout milite ainsi pour souligner le danger particulier qui guette les acteurs de l'armement dans le domaine des robots : celui d'être dépassés par les conséquences non voulues de la complexification des systèmes robotisés. Qu'elle soit le fait des robots utilisés, ou celui de leur mise en œuvre, par exemple en essais, le pire serait une abdication de la volonté raisonnée de l'utilisateur ; accepter de ne plus



maîtriser son armement c'est de toute façon une faute professionnelle, c'est aussi une faute contre l'éthique. Une défaillance de la raison serait alors, en elle-même aussi bien que par ses conséquences possibles, le premier degré de l'immoralité.

TENIR COMPTE DE L'EMPATHIE

Il a été vu plus haut que l'empathie était une notion essentielle en robotique et notamment en robotique militaire, que ce soit du point de vue de l'effort mené actuellement par les armées occidentales pour s'attirer le soutien des populations locales, de la surveillance accrue de la hiérarchie sur les combattants de terrain, des relations nouvelles créées entre combattants dans un statut identique et, enfin, des liens susceptibles d'apparaître entre combattants et robots engagés sur un même terrain d'opérations.

Pour ce dernier point, si l'on veut éviter un attachement excessif des soldats aux robots sous leur contrôle, il serait judicieux d'écarter ceux qui sont susceptibles de développer avec eux une relation empathique trop forte, par exemple en mettant au point un test mesurant ce risque d'attachement et ses conséquences, qu'on pourrait appeler « Test d'empathie pour les robots » (TEPR). Il ne faut retenir que le type de soldat qui est capable de considérer son robot comme un coéquipier quand il est protégé par lui et comme un ensemble de tôle et de silicium quand il le voit menacé et éprouve le désir de le protéger. Mais existera-t-il de tels soldats ?

Les réflexions ci-dessus doivent être considérées plus comme des mises en garde que comme des propositions précises et exécutables, qui seraient à élaborer.

En outre, les considérations précédentes sur le « robot militaire » ne représentent qu'une partie de l'approche *bottom-up* de la question générale de la conscience des robots. Il faudrait compléter cette étude par celle d'autres cas d'applications, dont les fonctionnalités prioritaires ne manqueront pas d'être très différentes. C'est la raison pour laquelle l'étude approfondie du « robot de compagnie », offrant un fort contraste avec le robot militaire, sera le thème central des réflexions du nouveau groupe de travail de l'Académie des technologies qui doit prendre la suite du groupe « Vers une technologie de la conscience ? ».



RÉFÉRENCES

- [1] **Gérard Sabah, Philippe Coiffet et al.** du Groupe de travail « Vers une technologie de la conscience ? » de l'Académie de technologies. *Vers une technologie de la conscience ?* EDP Sciences, 2013.
- [2] **Alain Crémieux et al.** du Groupe de travail « Éthique de l'armement » de l'AACHEAr. L'éthique des robots. In *Un monde multipolaire* – Documentation française, 2010.
- [3] **Philippe Coiffet**, *Les robots deviendront-ils des hommes ou les hommes des robots ?* À paraître.
- [4] Direction de la communication de l'Onera, *Les drones. Tome 1 : Mieux connaître les drones*, Onera (2004).
- [5] Direction de la communication de l'Onera, *Les drones. Tome 2 : La recherche au service des drones*, Onera (2005).
- [6] **Philippe Bidaud**, *Les robots et les hommes*, exposé du 07/03/13 à l'Onera/ Palaiseau.
- [7] **Serge Tisseron**, « Tester l'empathie des combattants pour les robots (TEPR), afin d'éviter les comportements inadaptés au combat », dans D. Danet, J.-P. Hanon, G. de Boisboisel, *La guerre robotisée*, Paris, Ed. Economica, 2012, p. 213-231.
- [8] **Éric Germain**, « 2010 : année zéro des guerres robotisées ». *Revue Défense Nationale*, N°740, mai 2011, p. 119-121.



- [9] **Jean-Paul Laumond**, Exposé à la réunion du 12/03/13 du Groupe de travail de l'Académie des technologies « Vers une technologie de la conscience ? ».
- [10] **Nayla Farouki**, *La conscience et le temps*, Le Pommier, 2000.
- [11] **Igor Aleksander et Barry Dunmall**, "Axioms and tests for the presence of minimal consciousness in agents". *Machine Consciousness, Journal of Consciousness Studies*, 10, 4-5 (2003).
- [12] **Ronald Arkin**, "Making robots human", *National Geographic*, août 2011, pp. 66-85.
- [13] **Daniel Kahneman**, *Système 1 / Système 2, les deux systèmes de pensée*, Flammarion, 2012.



SIGLES UTILISÉS

AAA	Analyse après action
AACHEAR	Association des anciens auditeurs du CHEAR
AESA	Agence européenne de sécurité aérienne
ATOL	Automatic Take-Off and Landing
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
AWACS	Airborne Warning And Control System
BANG	Bits, Atoms, Neurons, Genes
CAPECON	Civil UAV Applications & Potential Economic effectivity of CONfiguration solutions
CEMA	Chef d'état-major des armées
CEV	Centre d'essais en vol
CGA	Conseil général de l'armement
CHEAR	Centre des hautes études de l'armement
CSD	Conseil scientifique de la défense
CU	Charge utile
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DGA	Direction générale de l'armement
DGAC	Direction générale de l'aviation civile
DoD	Department of Defense
DRAC	Drone de reconnaissance au contact



EADS	European Aeronautic Defence and Space company
FAA	Federal Aviation Authority
FIAS	Force internationale d'assistance et de sécurité
GPS	Global Positioning System
GRAIN	Genetics, Robotics, Artificial Intelligence, Nanotechnologies
HALE	Haute altitude, longue endurance
IAI	Israel Aircraft Industries
IFF	Identification Friend or Foe
IHM	Interaction homme-machine
IRL	In Real Life
JAA	Joint Aviation Authorities
JAR	Joint Aviation Requirements
J-UCAS	Joint Unmanned Combat Air System
LoS	Line of Sight
MALE	Moyenne altitude, longue endurance
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBIC	Nanotechnologies, biotechnologies, informatique, sciences cognitives
NCW	Network Centric Warfare
NORAD	NORth American aerospace Defense command
NRBC	Nucléaire, radiologique, biologique, chimique
Onera	Office national d'études et de recherches aérospatiales
ONU	Organisation des Nations unies
OODA	Observation, orientation, décision, action
PC	Poste de commandement
PESTEL	Politique, économique, social, technologique, environnemental, légal
RAM	Révolution dans les affaires militaires
REMANTA	REsearch program on Microvehicle And New Technologies Applications
RESSAC	Recherche et sauvetage par système autonome coopérant
RETEX	Retour d'expérience
ROV	Remotely Operated Vehicle
RVT	Remote Video Transmission
SAR	Synthetic Aperture Radar



Sigles utilisés

SCAFE	Système de combat aérien futur européen
SCALP	Système conventionnel autonome à longue portée
SDTI	Système de drone tactique intérimaire
SF	Science-fiction
SIDM	Système intérimaire de drone MALE
SWORDS	Special Weapons Observation Reconnaissance Detection System
TCP	Très courte portée
TEPR	Test d'empathie pour les robots
TPI	Tribunal pénal international
UAV	Uninhabited / Unmanned Aerial Vehicle
UAVNet	Unmanned Aerial Vehicle Network
UCAV	Uninhabited / Unmanned Combat Aerial Vehicle
UHF	Ultra High Frequency
USAF	US Air Force
USAR	UAV Systems Airworthiness Requirements
USCG	US Coast Guards
USICO	UAV Safety Issues for Civil Operations
VHF	Very High Frequency



Crédits photographiques

FIGURE	CRÉDIT
1	Georges Seguin, licence GNU
2	Naval technology.com
3	US Air Force PD (photo by Lt Col Leslie Pratt)
4	United States Air Force PD (photo by Master Sergeant Steve Horton)
5	US Air Force PD (photo by Felicia Juenke)
6	US Air Force PD (photo by Bobbi Zapka)
7	DARPA PD
8	US Air Force/ PD (photo by Rob Densmore)
9	Aerolegende (licence creative Common)
10	Zil (licence creative Common)
11	Société iRobot
12	Boston Dynamics (DARPA PD)
13	US Army PD (photo by Lorie Jewell)
14	NASA PD (photo KSC-98PC-776)
15	Onera
16	Onera
17	Biomimetics and Dexterous Manipulation Lab Stanford university
18	©2013 Biorobotics Lab Carnegie Mellon University



PUBLICATIONS DE L'ACADÉMIE

Les travaux de l'Académie des technologies sont l'objet de publications réparties en quatre collections¹ :

- Les rapports de l'Académie : ce sont des textes rédigés par un groupe de l'Académie dans le cadre du programme décidé par l'Académie et suivi par le Comité des travaux. Ces textes sont soumis au Comité de la qualité, votés par l'Assemblée, puis rendus publics. On trouve dans la même collection les avis de l'Académie, également votés en Assemblée, et dont le conseil académique a décidé de la publication sous forme d'ouvrage papier. Cette collection est sous couverture bleue.

¹ - Les ouvrages de l'Académie des technologies publiés entre 2008 et 2012 peuvent être commandés aux Éditions Le Manuscrit (<http://www.manuscrit.com>). La plupart existent tant sous forme matérielle que sous forme électronique.
- Les titres publiés à partir de janvier 2013 sont disponibles en librairie et sous forme de ebook payant sur le site de EDP sciences (<http://www.edition-sciences.com>). À échéance de six mois ils sont téléchargeables directement et gratuitement sur le site de l'Académie.
- Les publications plus anciennes n'ont pas fait l'objet d'une diffusion commerciale, elles sont consultables et téléchargeables sur le site public de l'Académie www.academie-technologies.fr, dans la rubrique « Publications ». De plus, l'Académie dispose encore pour certaines d'entre elles d'exemplaires imprimés.



- Les communications à l'Académie sont rédigées par un ou plusieurs Académiciens. Elles sont soumises au Comité de la qualité et débattues en Assemblée. Non soumises à son vote elles n'engagent pas l'Académie. Elles sont rendues publiques comme telles, sur décision du Conseil académique. Cette collection est publiée sous couverture rouge.
- Les « Dix questions à ... et dix questions sur ... » : un auteur spécialiste d'un sujet est sélectionné par le Comité des travaux et propose dix à quinze pages au maximum, sous forme de réponses à dix questions qu'il a élaborées lui-même ou après discussion avec un journaliste de ses connaissances ou des collègues (Dix questions à ...). Ce type de document peut aussi être rédigé sur un thème défini par l'Académie par un académicien ou un groupe d'académiciens (Dix questions sur ...). Dans les deux cas ces textes sont écrits de manière à être accessibles à un public non-spécialisé. Cette collection est publiée sous une couverture verte.
- Les grandes aventures technologiques françaises : témoignages d'un membre de l'Académie ayant contribué à l'histoire industrielle. Cette collection est publiée sous couverture jaune.
- Par ailleurs, concernant les Avis, l'Académie des technologies est amenée, comme cela est spécifié dans ses missions, à remettre des Avis suite à la saisine d'une collectivité publique ou par auto saisine en réaction à l'actualité. Lorsqu'un avis ne fait pas l'objet d'une publication matérielle, il est, après accord de l'organisme demandeur, mis en ligne sur le site public de l'Académie.
- Enfin, l'Académie participe aussi à des co-études avec ses partenaires, notamment les Académies des sciences, de médecine, d'agriculture, de pharmacie ...

Tous les documents émis par l'Académie des technologies depuis sa création sont répertoriés sur le site www.academie-technologies.fr. La plupart sont peuvent être consultés sur ce site et ils sont pour beaucoup téléchargeables.

Dans la liste ci-dessous, les documents édités sous forme d'ouvrage imprimé commercialisé sont signalés par une astérisque. Les publications les plus récentes sont signalées sur le site des éditions. Toutes les publications existent aussi sous forme électronique au format pdf et pour les plus récentes au format ebook.

AVIS DE L'ACADÉMIE

1. Brevetabilité des inventions mises en œuvre par ordinateurs : avis au Premier ministre – juin 2001
2. Note complémentaire au premier avis transmis au Premier ministre – juin 2003
3. Quelles méthodologies doit-on mettre en œuvre pour définir les grandes orientations de la recherche française et comment, à partir de cette approche, donner plus de lisibilité à la politique engagée ? – décembre 2003
4. Les indicateurs pertinents permettant le suivi des flux de jeunes scientifiques et ingénieurs français vers d'autres pays, notamment les États-Unis – décembre 2003
5. Recenser les paramètres susceptibles de constituer une grille d'analyse commune à toutes les questions concernant l'énergie – décembre 2003
6. Commentaires sur le Livre Blanc sur les énergies – janvier 2004
7. Premières remarques à propos de la réflexion et de la concertation sur l'avenir de la recherche lancée par le ministère de la Recherche – mars 2004
8. Le système français de recherche et d'innovation (SFRI). Vue d'ensemble du système français de recherche et d'innovation – juin 2004
 - Annexe 1 – La gouvernance du système de recherche
 - Annexe 2 – Causes structurelles du déficit d'innovation technologique. Constat, analyse et proposition.
9. L'enseignement des technologies de l'école primaire aux lycées – septembre 2004
10. L'évaluation de la recherche – mars 2007
11. L'enseignement supérieur – juillet 2007
12. La structuration du CNRS – novembre 2008
13. La réforme du recrutement et de la formation des enseignants des lycées professionnels – Recommandation de l'Académie des technologies – avril 2009
14. La stratégie nationale de recherche et l'innovation (SNRI) – octobre 2009
15. Les crédits carbone – novembre 2009
16. Réduire l'exposition aux ondes des antennes-relais n'est pas justifié scientifiquement : mise au point de l'Académie nationale de médecine, de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies – décembre 2009
17. Les biotechnologies demain – juillet 2010
18. Les bons usages du Principe de précaution – octobre 2010

19. La validation de l'Acquis de l'expérience (VAE) – janvier 2012
20. Mise en œuvre de la directive des quotas pour la période 2013–2020 – mars 2011
21. Le devenir des IUT – mai 2011
22. Le financement des start-up de biotechnologies pharmaceutiques – septembre 2011
23. Recherche et innovation : Quelles politiques pour les régions ? – juillet 2012
24. La biologie de synthèse et les biotechnologies industrielles (blanches) – octobre 2012
25. Les produits chimiques dans notre environnement quotidien – octobre 2012
26. L'introduction de la technologie au lycée dans les filières d'enseignement général – décembre 2012
27. Évaluation de la recherche technologique publique – février 2013
28. L'usage de la langue anglaise dans l'enseignement supérieur – mai 2013
29. La réglementation thermique 2012, le réglementation bâtiment responsable 2020 et le climat; novembre 2014
30. Les réseaux de chaleur, décembre 2014

RAPPORTS DE L'ACADÉMIE

1. Analyse des cycles de vie – octobre 2002
2. Le gaz naturel – octobre 2002
3. Les nanotechnologies : enjeux et conditions de réussite d'un projet national de recherche – décembre 2002
4. Les progrès technologiques au sein des industries alimentaires – Impact sur la qualité des aliments / La filière lait – mai 2003
5. *Métrologie du futur – mai 2004
6. *Interaction Homme-Machine – octobre 2004
7. *Enquête sur les frontières de la simulation numérique – juin 2005
8. Progrès technologiques au sein des industries alimentaires – la filière laitière, rapport en commun avec l'Académie d'agriculture de France – 2006
9. *Le patient, les technologies et la médecine ambulatoire – avril 2008
10. *Le transport de marchandises – janvier 2009 (version anglaise au numéro 15)
11. *Efficacité énergétique dans l'habitat et les bâtiments – avril 2009 (version anglaise au numéro 17)

12. *L'enseignement professionnel – décembre 2010
13. *Vecteurs d'énergie – décembre 2011 (version anglaise au numéro 16)
14. *Le véhicule du futur – septembre 2012 (publication juin 2013)
15. *Freight systems (version anglaise du rapport 10 le transport de marchandises) – novembre 2012
16. *Energy vectors – novembre 2012 (version anglaise du numéro 13)
17. *Energy Efficiency in Buildings and Housing – novembre 2012 (version anglaise du numéro 11)
18. *Les grands systèmes socio-techniques / Large Socio-Technical Systems – ouvrage bilingue, juillet 2013
19. *Première contribution de l'Académie des technologies au débat national sur l'énergie / First contribution of the national academy of technologies of France to the national debate on the Future of energies supply – ouvrage bilingue, juillet 2013
20. Renaissance de l'industrie : construire des écosystèmes compétitifs fondés sur la confiance et favorisant l'innovation - juillet 2014
21. Le Méthane : d'où vient-il et quel est son impact sur le climat ? – novembre 2014
22. Biologies blanches et biologie de synthèse (à paraître, 2015)
23. Impact des TIC sur la consommation d'Énergie à travers le monde (à paraître, 2015)

COMMUNICATIONS DE L'ACADÉMIE

1. *Prospective sur l'énergie au XXI^e siècle, synthèse de la Commission énergie et environnement – avril 2004, MàJ décembre 2004
2. Rapports sectoriels dans le cadre de la Commission énergie et environnement et changement climatique :
3. Les émissions humaines – août 2003
 - Économies d'énergie dans l'habitat – août 2003
 - Le changement climatique et la lutte contre l'effet de serre – août 2003
 - Le cycle du carbone – août 2003
 - Charbon, quel avenir ? – décembre 2003
 - Gaz naturel – décembre 2003
 - Facteur 4 sur les émissions de CO₂ – mars 2005
 - Les filières nucléaires aujourd'hui et demain – mars 2005
 - Énergie hydraulique et énergie éolienne – novembre 2005

- La séquestration du CO₂ – décembre 2005
- Que penser de l'épuisement des réserves pétrolières et de l'évolution du prix du brut ? – mars 2007
- 4. Pour une politique audacieuse de recherche, développement et d'innovation de la France – juillet 2004
- 5. *Les TIC : un enjeu économique et sociétal pour la France – juillet 2005
- 6. *Perspectives de l'énergie solaire en France – juillet 2008
- 7. *Des relations entre entreprise et recherche extérieure – octobre 2008
- 8. *Prospective sur l'énergie au XXI^e siècle, synthèse de la Commission énergie et environnement, version française et anglaise, réactualisation – octobre 2008
- 9. *L'énergie hydro-électrique et l'énergie éolienne – janvier 2009
- 10. *Les Biocarburants – février 2010
- 11. *PME, technologies et développement – mars 2010.
- 12. *Biotechnologies et environnement – avril 2010
- 13. *Des bons usages du Principe de précaution – février 2011
- 14. L'exploration des réserves françaises d'hydrocarbures de roche mère (gaz et huile de schiste) – mai 2011
- 15. *Les ruptures technologiques et l'innovation – février 2012
- 16. *Risques liés aux nanoparticules manufacturées – février 2012
- 17. *Alimentation, innovation et consommateurs – juin 2012
- 18. Vers une technologie de la conscience – juin 2012
- 19. Les produits chimiques au quotidien – septembre 2012
- 20. Profiter des ruptures technologiques pour gagner en compétitivité et en capacité d'innovation – novembre 2012 (à paraître)
- 21. Dynamiser l'innovation par la recherche et la technologie – novembre 2012
- 22. La technologie, école d'intelligence innovante. Pour une introduction au lycée dans les filières de l'enseignement général – octobre 2012 (à paraître)
- 23. Le rôle de la technologie et de la pratique dans l'enseignement de l'informatique, mai 2014
- 24. Renaissance de l'industrie : recueil d'analyses spécifiques – juillet 2014
- 25. Réflexions sur la robotique militaire – février 2015
- 26. Le rôle de la technologie et de la pratique dans l'enseignement de l'informatique (à paraître, 2015)

DIX QUESTIONS POSÉES À...

1. *Les déchets nucléaires – 10 questions posées à Robert Guillaumont – décembre 2004
2. *L'avenir du charbon – 10 questions posées à Gilbert Ruelle – janvier 2005
3. *L'hydrogène – 10 questions posées à Jean Dhers – janvier 2005
4. *Relations entre la technologie, la croissance et l'emploi – 10 questions à Jacques Lesourne – mars 2007
5. *Stockage de l'énergie électrique – 10 questions posées à Jean Dhers – décembre 2007
6. *L'éolien, une énergie du xxi^e siècle – 10 questions posées à Gilbert Ruelle – octobre 2008
7. *La robotique – 10 questions posées à Philippe Coiffet, version franco-anglaise – septembre 2009
8. *L'intelligence artificielle – 10 questions posées à Gérard Sabah – septembre 2009
9. *La validation des acquis de l'expérience – 10 questions posées à Bernard Decomps – juillet 2012
10. Les OGM - 10 questions posées à Bernard Le Buanec – avril 2014

GRANDES AVENTURES TECHNOLOGIQUES

1. *Le Rilsan – par Pierre Castillon – octobre 2006
2. *Un siècle d'énergie nucléaire – par Michel Hug – novembre 2009

HORS COLLECTION

1. Actes de la journée en mémoire de Pierre Faure et Jacques-Louis Lions, membres fondateurs de l'Académie des technologies, sur les thèmes de l'informatique et de l'automatique – 9 avril 2002 avec le concours du CNES
2. Actes de la séance sur "Les technologies spatiales aujourd'hui et demain" en hommage à Hubert Curien, membre fondateur de l'Académie des technologies – 15 septembre 2005
3. Libérer Prométhée – mai 2011



CO-ÉTUDES

1. Progrès technologiques au sein des industries alimentaires – La filière laitière. Rapport en commun avec l'Académie d'agriculture de France – mai 2004
2. Influence de l'évolution des technologies de production et de transformation des grains et des graines sur la qualité des aliments. Rapport commun avec l'Académie d'agriculture de France – février 2006
3. *Longévité de l'information numérique – Jean-Charles Hourcade, Franck Laloë et Erich Spitz. Rapport commun avec l'Académie des sciences – mars 2010, EDP Sciences
4. *Créativité et Innovation dans les territoires – Michel Godet, Jean-Michel Charpin, Yves Farge et François Guinot. Rapport commun du Conseil d'analyse économique, de la Datar et de l'Académie des technologies – août 2010 à la Documentation française
5. *Libérer l'innovation dans les territoires. Synthèse du Rapport commun du Conseil d'analyse économique, de la Datar et de l'Académie des technologies. Créativité et Innovation dans les territoires Édition de poche – septembre 2010 – réédition novembre 2010 à la Documentation française
6. *La Métallurgie, science et ingénierie – André Pineau et Yves Quéré. Rapport commun avec l'Académie des sciences (RST) – décembre 2010, EDP Sciences.
7. Les cahiers de la ville décarbonée en liaison avec le pôle de compétitivité Advancity
8. Le brevet, outil de l'innovation et de la valorisation – Son devenir dans une économie mondialisée – Actes du colloque organisé conjointement avec l'Académie des sciences le 5 juillet 2012 éditions Tec & doc – Lavoisier
9. Quel avenir pour les biocarburants aéronautiques, rapport commun avec l'Académie de l'Air et de l'Espace (à paraître, 2015)