ÉTUDES DE L'IFRI

CENTRE DES ÉTUDES DE SÉCURITÉ FOCUS STRATÉGIQUE n° 110



MAI 2022

Deus ex machina

Les enjeux de l'autonomisation des systèmes d'armes

Laure DE ROCHEGONDE

L'Ifri est, en France, le principal centre indépendant de recherche, d'information et de débat sur les grandes questions internationales. Créé en 1979 par Thierry de Montbrial, l'Ifri est une association reconnue d'utilité publique (loi de 1901). Il n'est soumis à aucune tutelle administrative, définit librement ses activités et publie régulièrement ses travaux.

L'Ifri associe, au travers de ses études et de ses débats, dans une démarche interdisciplinaire, décideurs politiques et experts à l'échelle internationale.



En partenariat avec







L'Observatoire des conflits futurs est un contrat-cadre pluriannuel d'études mené par un consortium réunissant la Fondation pour la recherche stratégique et l'Institut français des relations internationales sous le pilotage des trois états-majors d'armée

Les opinions exprimées dans ce texte n'engagent que la responsabilité de l'auteure.

ISBN : 979-10-373-0543-5

© Tous droits réservés, Ifri, 2022

Comment citer cette publication :

Laure de Rochegonde, « *Deus ex machina* : les enjeux de l'autonomisation des systèmes d'armes », *Focus stratégique*, n° 110, Ifri, mai 2022.

Ifri

27 rue de la Procession 75740 Paris Cedex 15 – FRANCE

Tél. : +33 (0)1 40 61 60 00 – Fax : +33 (0)1 40 61 60 60

E-mail : accueil@ifri.org

Site Internet : Ifri.org

Focus stratégique

Les questions de sécurité exigent une approche intégrée, qui prenne en compte à la fois les aspects régionaux et globaux, les dynamiques technologiques et militaires mais aussi médiatiques et humaines, ou encore la dimension nouvelle acquise par le terrorisme ou la stabilisation post-conflit. Dans cette perspective, le Centre des études de sécurité se propose, par la collection ***Focus stratégique***, d'éclairer par des perspectives renouvelées toutes les problématiques actuelles de la sécurité.

Associant les chercheurs du centre des études de sécurité de l'Ifri et des experts extérieurs, ***Focus stratégique*** fait alterner travaux généralistes et analyses plus spécialisées, réalisées en particulier par l'équipe du Laboratoire de Recherche sur la Défense (LRD).

Comité de rédaction

Rédacteur en chef : Élie Tenenbaum

Rédactrice en chef adjointe : Amélie Férey

Assistant d'édition : Gaspard Stocker

Auteure

Laure de Rochegonde est chercheuse au Centre des études de sécurité de l'Ifri, où elle travaille sur la régulation des systèmes d'armes létales autonomes et les négociations internationales autour du contrôle des armements avancés. Elle est en parallèle doctorante en science politique au Centre de recherches internationales (CERI, Sciences Po/CNRS). Elle a rejoint l'Ifri en 2019 après une expérience de *junior editor* dans le cabinet de conseil en stratégie Roland Berger. En plus de ses activités de recherche, elle enseigne à Sciences Po. Elle est titulaire d'un master de politiques publiques et d'un *bachelor* de Sciences Po Paris, au cours duquel elle a passé une année au département de *War Studies* de King's College à Londres.

Synthèse

Si l'automatisation des machines s'inscrit dans une longue trajectoire historique, conceptuelle et technique, les systèmes d'armes pourraient désormais être rendus plus « autonomes » grâce aux progrès exponentiels des techniques d'intelligence artificielle et de la robotique.

Dans un premier temps, force est de constater que les débats sémantiques autour du terme « autonomie » constituent un frein au développement, à la classification et à la régulation des systèmes d'armes – plateformes et munitions – intégrant cette fonctionnalité. En réalité, les systèmes d'armes conservant un humain « dans la boucle » (*in the loop*) ou « sur la boucle » (*on the loop*) décisionnelle sont hétéronomes. Seuls ceux où l'humain se trouve entièrement « hors de la boucle » (*out of the loop*) pourraient être qualifiés d'autonomes, mais contrairement aux craintes populaires et dystopiques concernant l'arrivée d'un « Terminator » sur le champ de bataille, leur développement n'est ni souhaité ni possible à ce jour. Plus précisément, la doctrine française classe les systèmes d'armes selon le degré d'automatisation de leurs différentes fonctions (navigation, observation, analyse de la situation, pointage des armements, aide à la décision de tir, décision de tir, etc.). L'automatisation et l'autonomisation des systèmes d'armes doivent donc être envisagées au sein d'un continuum, dans lequel l'homme a toute sa place. Ainsi, la différence entre automatisation et autonomisation tient davantage à la nature des fonctions programmées informatiquement : un système capable de se déplacer seul d'un point à un autre est automatisé, mais il ne sera dit autonome que lorsque, rencontrant un obstacle sur son chemin, il saura l'éviter et retrouver son chemin, voire décider d'emprunter un nouvel itinéraire.

L'autonomisation irrigue désormais tous les projets militaires français et internationaux. De fait, les systèmes d'armes intégrant de l'autonomie permettent des gains capacitaires significatifs, dans des domaines d'application très variés. Il s'agit tant d'assister l'humain dans les tâches dangereuses, répétitives et fastidieuses, que de le protéger grâce à des capacités d'autoprotection ou de protection déportée améliorées. Dans le même temps, l'autonomisation permet d'améliorer le processus de prise de décision grâce à des techniques d'analyse plus pertinentes et rapides. L'entrée dans l'ère des systèmes d'armes « autonomes » devrait dès lors conduire à un changement essentiel dans l'emploi des forces. De la même manière que l'invention de la poudre a accompagné la colonisation et entraîné la domination de l'Occident et que l'apparition de l'arme nucléaire a structuré la conflictualité dans la seconde moitié du XX^{e} siècle, l'essor des

systèmes d'armes intégrant de l'autonomie façonnera la conflictualité dans les années à venir.

Les perspectives prometteuses offertes par les systèmes d'armes « autonomes » sont toutefois nuancées par leur vulnérabilité. Les systèmes reposant sur la programmation informatique, par exemple, présentent des risques liés à la convergence entre le monde cyber et celui de la guerre électronique puisqu'ils constituent une voie d'accès électromagnétique par laquelle des données peuvent être transmises pour mener une attaque. Les systèmes d'armes « autonomes » posent également des problèmes de confiance dans la machine. D'une part, du fait de l'effet « boîte noire », il est très difficile de saisir les processus de décision de certains algorithmes. À l'inverse, le manque de compréhension du fonctionnement des systèmes pourrait se traduire par une confiance excessive dans la machine, alors qu'il est indispensable de conserver des mécanismes de vérification humaine. En outre, le risque de prolifération et de dissémination auprès d'acteurs hostiles, éventuellement non étatiques, n'est pas à négliger dans un contexte géostratégique instable. La *Stratégie française sur l'intelligence artificielle au service de la défense* observe en effet que certaines puissances révisionnistes considèrent que le *statu quo* international peut être bousculé à leur avantage grâce aux technologies émergentes s'appuyant sur l'IA militaire. Ces dernières permettraient une forme de nivellement des positions stratégiques, car elles sont relativement peu coûteuses et aisées à maîtriser. Enfin, l'autonomisation des systèmes d'armes suscite de nombreuses préoccupations d'ordre éthique et juridique. Des doutes existent sur leur capacité à se conformer au droit international humanitaire – notamment aux principes de précaution, de distinction, et de proportionnalité – et sur leur compatibilité avec le droit à la vie et le respect de la dignité humaine.

Malgré des campagnes appelant à un moratoire sur les armes autonomes, une véritable course aux armements autonomes se profile, dominée par les États-Unis et la Chine – en grande partie grâce à une industrie civile du numérique importante, très avancée sur le plan technologique et capable d'irriguer le développement d'applications militaires. La Russie suit de près ces deux géants, grâce à de nombreux projets qu'elle n'hésite pas à expérimenter sur les théâtres d'opérations. L'observation de leurs investissements militaires en recherche et développement, de leurs déclarations publiques et de leurs présentations dans ce domaine démontre en effet l'attrait significatif de ces pays pour l'autonomisation des systèmes d'armes. Néanmoins, les annonces foisonnantes et les prototypes avancés en matière d'autonomisation des systèmes d'armes dans les quatre milieux dissimulent mal les sérieux blocages technologiques, qui restent encore à surmonter.

Par ailleurs, il est intéressant de noter que le nombre de systèmes intégrant de l'autonomie développés à l'échelle mondiale varie significativement selon les milieux : une dizaine de milliers de modèles de

drones aériens, quelques milliers pour le maritime (de surface et sous-marin) et environ un millier pour le terrestre, qui reste le parent pauvre. Les développements dans le milieu terrestre, principalement dominés par la Russie, sont entravés par les défis de mobilité. Le milieu aérien est sans conteste celui dans lequel les développements technologiques en matière de systèmes automatisés sont les plus avancés. En effet, les opportunités offertes par les *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) ont poussé certains États à investir massivement dans ce secteur, ce qui leur a permis d'acquérir une avance industrielle décisive. L'autonomisation des projets maritimes de surface est quant à elle plutôt centrée sur les systèmes de navigation. Enfin, les missions dévolues aux systèmes autonomes sous-marins sont actuellement la connaissance de l'environnement opérationnel, dont le besoin reste absolument déterminant, et la guerre des mines.

C'est dans ce contexte que les trois armées françaises entendent tirer profit de cette dynamique et ont lancé des programmes à effet majeur impliquant une automatisation accrue des systèmes d'armes. Trois initiatives vers le combat collaboratif peuvent être citées à cet égard : le système de combat aérien du futur (SCAF), le char de combat du futur (*Main Ground Combat System*, MGCS) et le système de lutte anti-mines du futur (SLAM-F).

Alors que pourraient bientôt arriver sur le champ de bataille de véritables *game changers* tels que les essaims de drones ou les systèmes d'armes létales autonomes (SALA), il est indispensable de penser les implications capacitaires et stratégiques que ces technologies auront pour les armées françaises. À cet égard, le besoin militaire, en réponse à la menace prospective, incite à une appropriation aussi rapide que possible des briques technologiques permettant l'autonomisation de certaines fonctions des systèmes d'armes. Si leurs apports pour le combat sont indéniables, le développement de systèmes d'armes intégrant de l'autonomie et l'acculturation à ces technologies représentent un défi de taille. À cet égard, plusieurs axes d'efforts doivent être poursuivis :

- accentuer les travaux de recherche en renforçant le lien avec les universités et les acteurs privés et en retenant les pépites nationales ;
- acculturer les forces à travers l'actualisation de la doctrine, de l'entraînement et de l'interaction homme-machine ;
- donner confiance en la machine chez les militaires et les populations ;
- faire émerger une véritable filière européenne.

Ces adaptations sont en effet nécessaires pour exploiter pleinement les possibilités offertes par ces avancées et éviter un déclassement stratégique, technologique et industriel. Finalement, l'objectif pour la France dans cette course à l'autonomisation des systèmes d'armes est de devenir le meilleur « *fast follower* », c'est-à-dire le plus rapide et le plus efficace – derrière les trois « champions » – à intégrer des fonctions autonomisées ainsi que des techniques d'intelligence artificielle dans les systèmes d'armes.

Executive Summary

While the automation of machines is part of a long historical, conceptual and technical path, weapon systems could now be made more "autonomous" thanks to exponential progress in artificial intelligence techniques and robotics.

Firstly, it must be noted that the semantic debates surrounding the term "autonomy" are an obstacle to the development, classification and regulation of weapon systems – platforms and ammunition – incorporating this functionality. In reality, weapon systems that keep a human "in the loop" or "on the loop" in decision-making are heteronomous. Only those where the human is entirely "out of the loop" could be called autonomous, but contrary to popular and dystopian fears of a "Terminator" arriving on the battlefield, their development is neither desired nor possible at this time. More specifically, French doctrine classifies weapon systems according to their various functions' degree of automation. The automation and autonomy of weapon systems must therefore be seen as part of a continuum, in which humans have their rightful place. Therefore, the difference between automation and autonomy lies more in the nature of the computer-programmed functions. A system capable of moving from one point to another on its own is automated, but it will only be considered autonomous if, when encountering an obstacle on its path, it knows how to avoid it and find its way back or even decides to take a new route.

Autonomization now permeates all French and international military projects. In fact, weapon systems integrating autonomy allow significant capacity gains in a wide range of applications. It is as much a question of assisting humans in dangerous, repetitive and tedious tasks as of protecting them thanks to improved self-protection or remote protection capabilities. At the same time, autonomization can improve the decision-making process through more relevant and rapid analysis techniques. Entering the era of "autonomous" weapon systems should thus lead to an essential change in the use of force. Just as the invention of gunpowder accompanied colonization and led to Western domination, and the advent of nuclear weapons structured conflict in the second half of the 20th century, the rise of autonomous weapon systems will shape conflict in the years to come.

The promising prospects offered by "autonomous" weapon systems are nuanced by their vulnerability however. Systems based on computer programming, for example, present risks associated with the convergence of the cyber and electronic warfare worlds as they provide an electromagnetic pathway through which data can be transmitted to conduct an attack. "Autonomous" weapon systems also pose problems pertaining to

trust in the machine. On the one hand, because of the "black box" effect, it is very difficult to understand the decision-making processes of some algorithms. Conversely, the lack of understanding of how the systems work could lead to an excessive reliance on the machine, whereas it is essential to maintain human verification mechanisms. Moreover, the risk of proliferation and dissemination to hostile, possibly non-state actors is not to be overlooked in an unstable geostrategic context. Indeed, the *French Strategy on Artificial Intelligence for Defence* declares that some revisionist powers consider that the international status quo can be disrupted to their advantage thanks to emerging technologies based on military Artificial Intelligence (AI). The latter would provide an opportunity of strategic positions' levelling, as they are relatively inexpensive and easy to control. Finally, the autonomization of weapon systems raises many ethical and legal concerns. There are doubts about their ability to comply with international humanitarian law – particularly the principles of precaution, distinction, and proportionality – and about their compatibility with the right to life and respect for human dignity.

Despite campaigns calling for a moratorium on autonomous weapons, a full-fledged autonomous arms race is emerging, dominated by the United States and China – largely due to a large, technologically advanced civilian digital industry capable of irrigating the development of military applications. Russia is closely following these two giants, thanks to numerous projects that it does not hesitate to experiment on theaters of operations. The review of their military investments in research and development, their public declarations and their presentations in this field demonstrates the significant attraction of these countries for the autonomization of weapon systems. Nevertheless, the abundant announcements and advanced prototypes regarding the autonomization of weapon systems in the four domains poorly conceal the serious technological obstacles that have yet to be overcome.

Moreover, it is interesting to note that the number of systems integrating autonomy developed on a global scale varies significantly depending on the environment: about ten thousand models for aerial drones, a few thousand for maritime (surface and submarine) and about a thousand for land. Developments in the land environment, mainly dominated by Russia, are hampered by mobility challenges. The air environment is undoubtedly the one in which technological developments in automated systems are the most advanced. Indeed, the opportunities offered by Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have led some countries to invest massively in this sector, thereby enabling them to acquire a decisive industrial lead. The autonomization of surface maritime projects, for its part, is more focused on navigation systems. Finally, the missions currently assigned to autonomous submarine systems are the mapping of the operational environment, for which the need remains decisive, and mine warfare.

It is within this context that the three French armed forces intend to take advantage of this dynamic and launch major impact programs involving increased automation of weapon systems. Three initiatives towards collaborative combat can be cited in this regard: the Future Air Combat System (SCAF), the Future Main Ground Combat System (MGCS) and the Future Mine Action System (SLAM-F).

While real game changers such as drone swarms or Lethal Autonomous Weapon Systems (LAWS) could soon arrive on the battlefield, it is essential to consider the capability and strategic implications that these technologies will have for the French armed forces. In this respect, the military need encourages the fastest appropriation possible of the technological building blocks allowing the autonomization of certain functions of weapon systems. While their contribution to combat is undeniable, the development of weapon systems integrating autonomy and their acculturation represent a major challenge. In this regard, several areas of effort must be pursued:

- to emphasize the research effort by reinforcing the link with the universities and the private actors;
- to acculturate the forces through updating the doctrine, training and man-machine interaction;
- to give confidence in the machine among the military and the population;
- to create a genuine European industry.

These adaptations are indeed necessary to fully exploit the possibilities offered by these advances and avoid a strategic, technological and industrial backwardness. Finally, France's objective in this race for the autonomization of weapon systems is to become the best "fast follower", i.e. the fastest and most efficient – behind the three "champions" – in integrating autonomous functions and artificial intelligence techniques in weapon systems.

Sommaire

INTRODUCTION 12

DE L'AUTOMATIQUE À L'AUTONOMIE 16

Petite histoire de la robotique militaire 16

La « récidive d'Héphaïstos » 16

L'ère de la robotique militaire 17

Hétéronomie, automatique et autonomie 19

Une confusion entre IA et autonomie 19

Un débat sémantique sur l'autonomie 21

Une nouvelle révolution des techniques de la guerre ? 24

Des avantages stratégiques et opérationnels évidents 25

Des vulnérabilités notables 27

VERS UNE COURSE AUX ARMEMENTS AUTONOMES ? 30

Les « champions » de l'autonomie des systèmes d'armes 31

Les États-Unis, leader incontestable 31

La Chine, une montée en puissance inexorable 34

La Russie, le pari du terrain 37

Des développements technologiques dans les quatre milieux 40

Milieu aérien 41

Milieu terrestre 47

Milieu maritime de surface 50

Milieu sous-marin 52

LES SYSTÈMES AUTONOMES DANS LE COMBAT DE DEMAIN 56

Les capacités déterminantes pour l'avenir 57

Les systèmes d'armes létales autonomes 57

Les essaims de drones 58

Les enjeux pour la France 60

Vers le combat aérien du futur 60

Vulcain et la robotisation du champ de bataille 61

Le combat naval futur 63

Les défis à relever 65
Accentuer les efforts de recherche 66
Acculturer les forces 68
Donner confiance en la machine 70
Faire émerger une véritable filière européenne 72
CONCLUSION 74

Introduction

Le 27 novembre 2020, les médias du monde entier annonçaient la mort d'un homme présenté comme le « père » du programme nucléaire iranien, le physicien Mohsen Fakhrizadeh, prétendument assassiné par un « robot tueur » israélien. L'enquête a révélé qu'il avait été abattu par une mitrailleuse automatique commandée à distance par un opérateur humain et assistée d'une intelligence artificielle afin d'améliorer le ciblage – en prenant en compte le délai de transmission des images, la vitesse du véhicule dans lequel se trouvait le scientifique et l'effet de recul provoqué par les tirs[1].

Cet exemple est emblématique des débats contemporains sur la robotique militaire. En effet, l'intégration croissante de l'autonomie aux systèmes d'armes donne lieu à de nombreuses spéculations et aux scénarios les plus dystopiques. Si, de manière générale, l'autonomie suggère qu'un agent « se gouverne par ses propres lois[2] », dans le domaine de la robotique il désigne plutôt la capacité à décider la manière et le moment d'accomplir une tâche sans supervision humaine, dans un environnement changeant.

La question de l'autonomisation des systèmes d'armes est intimement liée à l'essor des techniques d'intelligence artificielle de défense. Comme le soulignait le *Defense Science Board* du département de la Défense américain en 2016 : « le principal fondement intellectuel de l'autonomie découle de l'intelligence artificielle[3] ». Apparue en 1965, sous la plume du logicien John McCarthy, l'expression « intelligence artificielle » (IA) désigne l'ensemble des théories et les techniques visant à mieux comprendre les intelligences humaines et à les imiter à l'aide de programmes informatiques en simulant le fonctionnement. Plus généralement, l'IA qualifie la capacité de systèmes à accomplir des tâches requérant normalement une intelligence humaine.

Il convient par ailleurs de distinguer l'autonomie de l'automatisme, qui caractérise la réaction systématique d'un système préprogrammé pour un contexte spécifique. Néanmoins, ces deux catégories ne sont ni homogènes, ni exclusives mais correspondent à différents degrés d'un continuum – qui

L'auteure souhaite exprimer sa gratitude envers tous ceux qui ont rendu possible la publication de cette étude, lors des entretiens de recherche conduits à l'automne 2021 et à l'hiver 2022, ainsi que lors des diverses relectures. Elle remercie tout particulièrement Gaspard Stocker et Léo Péria-Peigné qui l'ont fidèlement assistée tout au long de la réalisation de ce rapport.

1. R. Bergman et F. Fassihi, « The Scientist and the AI-Assisted, Remote-Control Killing Machine », *The New York Times*, 18 septembre 2021.
2. C'est l'étymologie du mot grec *αὐτόνομος*, le préfixe *auto-* signifiant « soi-même » et *nomos* la loi.
3. Defense Science Board, « Summer Study on Autonomy », Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology and Logistics, Washington D.C., juin 2016.

dépendent du type de système, de ses fonctions et de sa capacité à élaborer ses propres critères de fonctionnement.

Si cette étude fait le choix de se concentrer sur les systèmes d'armes proprement dits, il convient de rappeler que l'implication des systèmes autonomes dans la réalisation d'effets militaires, y compris létaux, relève également des systèmes logistiques (robots mules), de maintenance et d'aide à la décision au sein des fonctions de Commandement et de Contrôle (C2) ainsi que de renseignement, de surveillance et de reconnaissance (ISR). Comprise ainsi, la notion de système d'armes regroupe l'ensemble des dispositifs mécaniques, électroniques et logiciels nécessaires à la réalisation d'une mission et à la mise en œuvre d'un armement – y compris en termes de capteurs, de systèmes d'information et de communication (SIC), de conduite de tir, de munitions et de guerre électronique (GE). Ils peuvent être fixes ou embarqués, coordonnés ou autonomes. Cette dernière catégorie suscite de nombreuses préoccupations, même au sein de la communauté de l'IA. Loin des fantasmes des militants dénonçant l'ouverture d'une boîte de Pandore et prédisent l'arrivée de robots « Terminator » sur le champ de bataille, ces systèmes sont définis par leur capacité à accomplir des missions spécifiques de manière indépendante ou avec une supervision minimale par un opérateur humain, dans des environnements complexes et imprévisibles[4].

Dans cette perspective, les systèmes d'armes « pleinement autonomes » n'existent pas encore et n'existeront pas dans un futur proche, la plupart des armes présentées comme telles étant, en fait, largement automatisées[5]. Par exemple, le robot sentinelle *SGR-A1*, développé par Samsung Techwin et déployé par la Corée du Sud sur la zone démilitarisée entre les deux Corées, souvent cité en exemple de « robot tueur », est plutôt un système d'armes intégrant un niveau élevé d'automatisation[6]. S'il est capable de repérer des cibles et de décider d'ouvrir le feu, il n'a jamais été utilisé de la sorte et n'est pas en mesure de se mouvoir seul ni de s'adapter à un nouvel environnement.

Toutefois, les progrès constants des techniques d'IA et de leurs applications militaires permettent d'entrevoir l'émergence de systèmes évoluant effectivement vers l'autonomie. Une véritable course à l'autonomie se fait jour, dominée par les États-Unis, la Chine et la Russie, qui sont les trois puissances affichant l'ambition la plus élevée, les capacités de développement les plus avancées et le plus haut niveau d'expertise en matière d'intelligence artificielle[7].

4. C. de Ganay, et F. Gouttefarde, *Rapport d'information sur les systèmes d'armes létaux autonomes*, Paris, Assemblée nationale, 22 juillet 2020.
5. P. Bezombes, « Autonomie et respect de la règle pour les robots militaires. Considérations sémantiques et point de vue de la doctrine interarmées », *Revue Défense Nationale*, hors-série, 2018, p. 23-35.
6. L. Lagneau, « Le ministère sud-coréen de la Défense lance le développement d'un blindé 6x6 robotisé », *Opex360*, 24 avril 2021, disponible sur : www.opex360.com.
7. V. Boulanin et M. Verbruggen, *Mapping the Development of Autonomy in Weapon Systems*, SIPRI, novembre 2017.

Les dépenses militaires mondiales dans les domaines de l'autonomie et de l'IA devraient respectivement atteindre 16 et 18 milliards de dollars d'ici à 2025. Aussi la conduite de la guerre devrait-elle en être considérablement transformée dans la décennie à venir. L'attrait pour l'autonomisation des systèmes d'armes est tel qu'elle est parfois envisagée comme une sorte de « *deus ex machina* », susceptible de remédier tant aux problèmes liés à la réduction du format des armées qu'à la moindre tolérance aux pertes humaines sur le champ de bataille. Cette locution latine renvoie au théâtre antique, dans lequel une divinité surgissait comme par magie dans une situation inextricable, qu'elle résolvait par sa simple apparition. De ce fait, le « *deus ex machina* » désigne à la fois à un personnage ou un événement dont l'intervention apporte un dénouement inespéré à une situation tragique, et au mécanisme[8] par lequel l'être surnaturel entre en scène.

Cette étude s'attache à démontrer que l'autonomisation des systèmes d'armes ne saurait être un dénouement miraculeux capable de pallier tous les problèmes auxquels sont confrontées les forces armées françaises. Si « *deus ex machina* » il y a, c'est uniquement du fait des apports de la technique aux systèmes d'armes émergents. Or ce progrès technologique ne tombe justement pas du ciel : il s'agit alors de demeurer pragmatique pour préparer le changement de paradigme induit par l'essor des systèmes autonomes. Comme le soulignait le député français Fabien Gouttefarde dans une tribune au *Monde* en février 2019 : « nous devons anticiper, pour ne pas les subir, les ruptures politiques et stratégiques[9] » liées à l'autonomisation des systèmes d'armes.

Deux débats parallèles se font jour sur la question de l'autonomisation des systèmes d'armes. Le premier, éthique et politique, semble diverger de plus en plus du second, technique, qui porte sur le degré d'autonomie fonctionnelle possible et souhaitable d'un point de vue militaire. Le débat politique emporte pourtant des conséquences bien réelles sur le chantier technologique, puisqu'il produit des régulations susceptibles d'inhiber les possibilités offertes par la recherche. Ainsi, l'accord conclu entre les institutions européennes sur le Fonds européen de défense en 2019 a exclu par principe le financement de systèmes d'armes autonomes. Le déficit de compréhension des aspects techniques par la sphère politico-diplomatique risque alors de créer des freins à l'innovation. Sortons le dieu de la machine, donc, afin d'éclairer les usages militaires des systèmes intégrant de l'autonomie, ainsi que leurs implications pour les armées françaises.

Dans un premier temps sera retracée la trajectoire historique et conceptuelle de l'autonomie des systèmes d'armes. Puis, en observant les investissements militaires en recherche et développement (R&D) des États-Unis, de la Russie et de la Chine dans ce domaine, la deuxième partie identifiera les principales évolutions technologiques et programmes en cours.

8. La *mèchanè*, une grue permettant de donner l'illusion d'un être surnaturel descendant du ciel.
9. F. Gouttefarde, « Robots tueurs : "Nous devons anticiper, pour ne pas les subir, les ruptures stratégiques et politiques liées à leur développement" », *Le Monde*, 22 février 2019.

Enfin, les implications capacitaires et stratégiques de ces derniers seront examinées dans la troisième partie, afin de formuler des recommandations pour la France.

De l'automatique à l'autonomie

« Robots », « drones », « intelligence artificielle », « systèmes d'armes létales autonomes » sont autant d'expressions associées à la question des armes autonomes mais dont la définition demeure vague. Cette première partie s'attache donc à éclairer le débat sur l'autonomisation des systèmes d'armes, en l'inscrivant dans une perspective historique et conceptuelle plus large. Elle lève également le voile sur les opportunités et les risques associés à ces technologies émergentes.

Petite histoire de la robotique militaire

La « récidive d'Héphaïstos »

À bien des égards, l'idée de déléguer des tâches à des supplétifs non-humains est aussi ancienne que le travail lui-même. Ainsi, il est dit dans l'*Iliade*, que le dieu Héphaïstos, parce qu'il était boiteux, avait fabriqué des créatures en or pour l'aider à se déplacer et à travailler. La mythologie grecque relate aussi la conception par le dieu du feu et de la forge d'un automate, le « géant de bronze » Talos, offert au roi Minos pour protéger la Crète. C'est la raison pour laquelle, dans sa leçon inaugurale au Collège de France en 2012, le roboticien français Jean-Paul Laumond, concevait sa discipline comme une « récidive d'Héphaïstos ».

Dans sa *Politique*, Aristote se figurait un monde dans lequel les tâches des esclaves seraient effectuées par « un instrument [...] capable sur une simple injonction, ou même pressentant ce qu'on va lui demander, d'accomplir le travail qui lui est propre[10] ». Dans la même veine, le mythe juif du Golem décrivait un être artificiel fait d'argile, conçu pour défendre son créateur[11]. Au XV^e^ siècle, Léonard de Vinci imaginait quant à lui un « chevalier mécanique » à vocation guerrière. L'inventeur américain d'origine serbe Nikola Tesla est toutefois considéré comme le véritable père de la robotique militaire. Ainsi, en 1898, il concevait le premier véhicule naval télécommandé sans fil[12]. Les automates ont donc en premier lieu été envisagés comme une manière de décharger l'humain des tâches risquées ou

10. Cité dans A. Damet, « Les automates antiques, précurseurs des robots », *Le Monde Histoire*, 3 mai 2021.
11. G. Meyrink, *Le Golem*, Paris, Flammarion, 1915. L'auteur remercie Amélie Férey pour cette référence.
12. Son prototype, bien que précurseur, fut raillé par ses contemporains.

pénibles[13]. Le terme « robot » est d'ailleurs une invention de l'écrivain tchèque Karel Čapek, qui l'a formé à partir du substantif *robota* (corvée) du verbe *robit* (œuvrer, fabriquer) dans les années 1920.

L'ère de la robotique militaire

Il faut néanmoins attendre le XXe siècle pour que ces inventions commencent à voir concrètement le jour. En effet, les efforts industriels des Première et Seconde Guerres mondiales et encore plus de la guerre froide permettent des progrès considérables dans les domaines de l'informatique (capacités algorithmiques des machines) et des télécommunications (transmission de données sans fil, systèmes de positionnement et de navigation par satellites, miniaturisation des systèmes, et renforcement des capacités optroniques). Les efforts sont d'abord déployés dans le domaine terrestre, avec l'élaboration des premiers véhicules terrestres sans pilotes. En 1915, deux Américains donnent ainsi naissance au « chien électrique », un véhicule destiné au ravitaillement dans les tranchées se guidant grâce à la lumière[14]. Premier robot militaire, il est plus largement considéré comme le premier robot de l'histoire puisque, se mouvant en fonction de son environnement, il marque le passage des automates, qui répétaient mécaniquement des tâches, aux robots capables de s'adapter à leur environnement grâce à des capteurs. Les premiers véhicules terrestres sans pilotes armés, ou « torpilles terrestres », voient également le jour durant la Première Guerre mondiale et prennent la forme de tracteurs blindés destinés à transporter des explosifs vers les tranchées ennemies. L'un des projets les plus célèbres en la matière est français : c'est le *Crocodile Schneider Torpille Terrestre*[15].

Dans le domaine aérien, les précurseurs des missiles de croisière apparaissent, notamment avec le *Kettering Bug* (1918), un engin américain préprogrammé pour suivre une trajectoire et atteindre une cible[16]. Dans le domaine naval, les premiers véhicules aquatiques sans équipage sont imaginés par les forces allemandes. Reprenant le prototype de Nikola Tesla, ils sont conçus pour transporter des explosifs et s'écraser contre les navires ennemis. Ils sont d'ailleurs les seuls systèmes de ce type à avoir été déployés opérationnellement durant la guerre, les autres n'ayant jamais été utilisés au combat[17].

13. Qui correspondent d'ailleurs au « 4D » de la robotique, qui permet d'assister l'homme pour les tâches répétitives, salissantes, dangereuses et coûteuses. Lire B. Marr, « The 4 Ds of Robotization: Dull, Dirty, Dangerous, and Dear », *Forbes*, 16 octobre 2017.
14. P. W. Singer, « Drones Don't Die – A History of Military Robotics », *History Net*, 5 mai 2011, disponible sur : www.historynet.com.
15. C. McFadden, « A Brief History of Military Robots Including Autonomous Systems », *Interesting Engineering,* 6 novembre 2018, disponible sur: https://interestingengineering.com.
16. P. W. Singer, « Drones Don't Die – A History of Military Robotics », *op. cit.*
17. *Ibid.*

C'est donc à cette période que sont conçus les premiers véhicules sans pilote, que certains, par anachronisme, qualifient de drones. En réalité, les véhicules aériens téléopérés sont apparus dans l'entre-deux-guerres et avaient initialement vocation à leurrer l'ennemi. Le plus fameux, surnommé *Queen Bee* en raison de son bruit similaire à celui des abeilles, a d'ailleurs inspiré le terme de « drone », qui signifie « faux-bourdon[18] ». Ce type d'aéronef téléopéré a été utilisé pour la première fois en opération par les Américains, pour des missions de surveillance et de renseignement lors de la guerre de Corée[19]. L'utilisation des drones s'est ensuite développée durant la guerre du Vietnam, qui a vu la « première utilisation militaire à grande échelle des drones[20] », marquée notamment par le premier déploiement opérationnel de drones de reconnaissance. Israël n'a pas tardé à investir ce nouveau champ et s'est illustré par un recours aux drones au cours de la guerre du Kippour (1973) et surtout au Liban lors de l'opération Paix en Galilée (1982).

Depuis les années 1990, les progrès de la robotique militaire semblent exponentiels, tant les grandes puissances militaires ont pris conscience des avantages et du potentiel qu'elle revêt. Le robot militaire présente des avantages déjà largement démontrés[21]. En effet, le déport en permanence des capteurs et des effecteurs permet une meilleure protection du soldat dans les zones à risque. Du fait de leur endurance (sous réserve de suffisance énergétique), les systèmes robotisés permettent également une persistance – à défaut d'une permanence – extrêmement utile aux consommateurs de l'effet qu'ils produisent. S'ils ont d'abord été utilisés pour des missions de reconnaissance, de surveillance et de renseignement, les robots terrestres présentent également un intérêt majeur dans les missions de déminage et de lutte contre les engins explosifs improvisés et les mines, ou sur les terrains dangereux pour l'homme, notamment dans le cas d'interventions en milieu présentant des risques de types nucléaire, radiologique, biologique ou chimique (NRBC).

La distinction entre drones et robots fait l'objet de débats récurrents entre spécialistes. En France, l'armée de Terre a proposé de cantonner le terme de drones aux plateformes aériennes et celui de robots aux systèmes terrestres. La Marine considère quant à elle que les drones sont avant tout des capteurs et les robots des effecteurs[22]. Pour certains ingénieurs en revanche, il serait préférable de parler de « drones » pour les systèmes pilotés à distance et de « robots » pour les systèmes suffisamment automatisés pour fonctionner sans être téléopérés[23]. Cette séparation est

18. P. W. Singer, « Drones Don't Die – A History of Military Robotics », *op. cit.*
19. S. Lefèvre, « La robotisation des armées occidentales modernes », *op. cit.*
20. P. Cazin « Drones », *Encyclopædia Universalis*, disponible sur : www.universalis.fr.
21. Voir par exemple R. Doaré, D. Danet et G. de Boisboissel (dir.), *Drones et Killer Robots : faut-il les interdire ?*, Rennes, Presses universitaires de Rennes, 2015.
22. Entretiens avec des officiers des états-majors de l'armée de Terre et de la Marine, le 19 janvier 2021.
23. T. Berthier, « Systèmes armés semi-automatiques : que peut apporter l'autonomie ? », *Revue Défense Nationale*, vol. 820, n° 5, mai 2019, p. 74-80.

toutefois ténue, puisqu'il est parfois question de « drones autonomes ». De fait, les drones sont des systèmes robotisés téléopérés. La typologie américaine, qui distingue les *Unmanned Vehicles* terrestres, aériens, de surface ou sous-marins, est à ce titre intéressante. Ceux-ci se sont démocratisés au sein des armées américaines durant la guerre du Golfe et les conflits en ex-Yougoslavie, puis pour des missions de renseignement et de frappes ciblées à partir de la « guerre contre le terrorisme » initiée au lendemain des attentats du 11 septembre 2001[24]. Ils sont désormais de plus en plus sophistiqués et répandus à travers le monde. Actuellement, plus de 100 États disposent de drones aériens militaires, dont 22 d'entre eux les ont armés, à l'image de la France en 2017[25].

Si ces avancées technologiques dans le domaine de la robotique militaire jusqu'à la fin du XXe siècle sont impressionnantes, elles ne relèvent pas encore de l'autonomie. Demain, les équipements aériens, terrestres, marins et sous-marins pourront s'intégrer dans des flottilles de systèmes de systèmes, dont certains pourraient mener un grand nombre de fonctions sans intervention humaine. Cependant, pour que ces dispositifs fonctionnent en temps réel et soient en mesure d'appréhender et de s'adapter à des environnements évolutifs, ils doivent encore franchir d'importants seuils technologiques.

Hétéronomie, automatique et autonomie

Une confusion entre IA et autonomie

Dans la mythologie grecque, pour concevoir ses automates, Héphaïstos s'appuie sur sa parfaite maîtrise de la mécanique et non sur la magie. Doué de *mètis* (l'intelligence de la ruse), à l'instar d'Athéna et d'Hermès, il sait donner à ses instruments une illusion troublante de réalité, grâce à l'assemblage méticuleux de pièces techniques. En effet, comme le soulignait l'auteur de science-fiction Arthur C. Clark en 1973 : « toute technologie suffisamment avancée est indiscernable de la magie[26] ». De la même manière, loin des fantasmes qu'elle suscite, l'autonomisation des systèmes d'armes repose sur des composantes techniques leur permettant de se passer, pour certaines tâches, d'une supervision humaine.

En effet, c'est à la faveur des progrès non seulement de la robotique mais aussi des technologies d'intelligence artificielle qu'émergent des systèmes de plus en plus autonomes. Ainsi, Mary L. Cummings, directrice du Humans and Autonomy Laboratory de Duke University, conçoit l'IA comme « la capacité d'un système informatique à accomplir des tâches qui

24. O. Zubeldia, *Histoire des drones de 1914 à nos jours*, Paris, Perrin, 2012.
25. C. Perrin, G. Roger, B. Sido et F. Bonneau, *Rapport d'information sur les drones dans les forces armées*, Commission des Affaires étrangères, de la Défense et des Forces armées, Sénat, 23 juin 2021.
26. A. C. Clark, *Profiles of the Future: An Inquiry into the Limits of the Possible*, Londres, Phoenix, 1973.

nécessitent normalement de l'intelligence humaine, telle que la perception visuelle, la reconnaissance de la parole et la prise de décision[27] ». Schématiquement, il est courant de distinguer deux grandes familles de techniques d'IA : la modélisation des connaissances et du raisonnement (IA symbolique), qui implique de formaliser des connaissances ensuite utilisées par les algorithmes pour produire des résultats ; et les méthodes reposant sur les données, en particulier l'apprentissage (IA connexionniste). L'IA reproduit donc les processus cognitifs du cerveau humain grâce à des programmes informatiques (algorithmes) et au traitement automatisé de données massives (*big data*). Dans le champ militaire, l'IA peut alors aider à la gestion et à la simulation de l'environnement opérationnel, à la détection des menaces, au traitement, à la simplification et à l'analyse de renseignements collectés en masse[28]. C'est donc par la programmation informatique de ces fonctions dites critiques que les systèmes d'armes sont rendus « autonomes ».

Les craintes suscitées par l'autonomisation des systèmes d'armes s'expliquent en partie par l'image d'une arme auto-apprenante, dont on ne comprendrait plus les prises de décision. Toutefois, l'autonomie ne doit pas être confondue avec l'apprentissage profond (*deep learning*). L'apprentissage automatique consiste à déterminer des corrélations, c'est-à-dire à calculer des probabilités. Or, depuis les années 1990, les ordinateurs ont considérablement gagné en puissance et sont désormais capables d'exploiter de très grandes masses de données. Actuellement, les chercheurs en IA ne savent cependant pas démontrer qu'un programme fondé sur l'apprentissage profond respecte toutes les propriétés pour lesquelles il a été programmé, ni fournir des explications du raisonnement par la machine – ce qu'ils sont capables de faire pour les techniques d'IA reposant sur la modélisation des connaissances. Par exemple, le taux de réussite de la « reconnaissance de forme » par apprentissage profond n'est pas assez élevé pour être utilisé dans un système d'armes, d'autant plus que les armées ne disposent pas d'une masse de données d'apprentissage suffisante pour que les algorithmes fonctionnent de manière optimale. C'est la raison pour laquelle l'apprentissage profond au cours de la mission est jugé trop incertain pour être appliqué aux fonctions critiques d'un système d'armes.

27. M. L. Cummings, *Artificial Intelligence and the Future of Warfare*, Chatham House, janvier 2017, p. 2.
28. J.-C. Noël, « Intelligence artificielle : vers une nouvelle révolution militaire ? », *Focus stratégique*, n° 84, Ifri, octobre 2018.

Un débat sémantique sur l'autonomie

S'il n'est pas question que les systèmes autonomes se régissent par leurs propres lois ou s'assignent eux-mêmes leur mission, comme le suggérerait l'étymologie du mot, trois niveaux d'autonomie sont communément distingués. Le niveau le plus répandu conserve un humain « dans la boucle » (*in the loop*) décisionnelle, comme c'est le cas par exemple pour les drones téléopérés. L'homme peut aussi se trouver seulement « sur la boucle » (*on the loop*) : le système agit alors seul, mais sous la surveillance d'un humain qui peut reprendre le contrôle à tout moment. Enfin, le niveau d'autonomie le plus élevé, où l'humain demeure « hors de la boucle » (*out of the loop*) signifie qu'aucun contrôle n'est maintenu. En réalité, tant que l'humain reste *dans* ou *sur* la boucle de décision, il s'agit d'hétéronomie et non d'autonomie[29].

D'autres approches de l'autonomie tentent d'en proposer une typologie plus fine. Dans une tentative de clarification, Jean-Baptiste Jeangène-Vilmer a distingué en 2013 trois catégories de systèmes d'armes : « semi-autonomes » qui peuvent se déplacer de manière autonome mais dont la fonction de tir dépend d'une décision humaine ; « autonomes supervisés » capables de désigner et traiter une cible de manière autonome mais sous la supervision d'un opérateur pouvant interrompre la mission à tout moment ; et « autonomes » pour lesquelles l'humain ne fait plus partie de la boucle de décision d'ouverture du feu[30]. La doctrine française classe pour sa part les systèmes d'armes selon le degré d'automatisation de leurs différentes fonctions (navigation, observation, analyse de la situation, pointage des armements, aide à la décision de tir, décision de tir, etc.). Thierry Berthier, chercheur au Centre de recherche des écoles de Saint-Cyr Coëtquidan, a quant à lui défini six niveaux d'automatisation des systèmes d'armes (voir Tableau 1 ci-après). Le concept exploratoire interarmées sur « l'emploi de l'intelligence artificielle et des systèmes automatisés » invite également à envisager l'automatisation et l'autonomisation des systèmes d'armes comme un continuum, dans lequel l'homme a toute sa place.

29. P. Bezombes, « Autonomie et respect de la règle pour les robots militaires. Considérations sémantiques et point de vue de la doctrine interarmées », *op. cit.*
30. J.-B. Jeangène-Vilmer, « Introduction : robotisation et transformations de la guerre », *Politique étrangère*, vol. 78, n° 3, 2013, p. 80-89.

Tableau 1 : Six niveaux d'automatisation des systèmes d'armes (d'après T. Berthier)

Niveaux d'automatisation du système	L0 Système armé pleinement téléopéré	L1 Système armé dupliquant automatique-ment l'action de l'opérateur	L2 Système semi-autonome en déplacement et en détection de cibles	L3 Système armé autonome soumis à autorisation de tir	L4 Système armé autonome sous tutelle humaine	L5 Système armé sans tutelle humaine
Opérateur humain associé au système	L'opérateur humain téléopère à distance le système à l'aide d'une interface de pilotage déportée	L'opérateur humain est augmenté par un système qui l'assiste en dupliquant automatiquement ses actions	L'opérateur humain supervise le système en lui fournissant un plan de route et des indications de cibles	L'opérateur humain n'intervient que pour donner l'autorisation d'ouvrir le feu sur une cible proposée par le système	L'opérateur humain peut désactiver et reprendre le contrôle du système pleinement autonome	L'opérateur humain n'a pas la possibilité de reprendre le contrôle du système pleinement autonome
Composante mobile-traction du système	Les déplacements du système sont strictement téléopérés par l'opérateur humain	La composante de traction peut suivre et reproduire les déplacements du superviseur humain via ses capteurs	Le système choisit le meilleur chemin en fonction des indications de localisation fournies par l'opérateur	Les déplacements sont décidés par le système en fonction de sa perception du terrain et de ses objectifs de mission		
Composante de détection du système	Les détecteurs du système renvoient des informations à l'opérateur	Les capteurs du système détectent les objets que l'opérateur a détectés	Les capteurs du système détectent automatiquement les objets cibles potentielles	Les capteurs détectent et reconnaissent les objets de manière autonome		
Composante de reconnaissance et d'acquisition de cibles	La reconnaissance et l'acquisition des cibles sont exclusivement réalisées par l'opérateur humain	L'acquisition des cibles est identique à celle de l'opérateur humain via le système de visée son arme connectée à celui du système	Le système suggère des objets comme cibles potentielles à l'opérateur humain qui définit les cibles à prendre en compte	L'acquisition de cibles s'effectue de manière automatique ou dirigée via les capteurs du système et ses capacités de reconnaissance	L'acquisition de cibles s'effectue de manière automatique via les capteurs du système et ses capacités de reconnaissance et d'analyse	
Composante armée du système	Les commandes de tirs du système sont exclusivement actionnées par l'opérateur humain	Le système ouvre le feu sur une cible si et seulement si l'opérateur ouvre le feu sur cette cible	Le système ouvre le feu sur la cible après autorisation du superviseur humain	Le système propose une cible et ouvre le feu après autorisation du superviseur humain	Le système décide de l'ouverture du feu sur la cible qu'il a sélectionné mais peut être désactivé par son superviseur	Le système décide de l'ouverture du feu sur la cible qu'il a sélectionnée sans désactivation possible (sauf destruction)

Source : C. de Ganay et F. Gouttefarde (rapporteurs), Rapport d'information en conclusion des travaux d'une mission d'information sur les systèmes d'armes létaux autonomes, Rapport n° 3248, Paris, Commission de la Défense nationale et des Forces armées, Assemblée nationale, juillet 2020.

Comme le souligne Thierry Berthier, les trois premiers niveaux s'appuient sur des technologies bien maîtrisées par l'ensemble des puissances militaires et même par certains acteurs non étatiques. Les niveaux supérieurs, cependant, se situent actuellement « à l'état de l'art des progrès en intelligence artificielle et en robotique et s'appliquent à des démonstrateurs développés dans le cadre de programmes de recherche[31] », excepté peut-être en ce qui concerne la fonction d'*Automated Target Recognition* (ATR) qui permettent à une munition d'acquérir une cible en s'appuyant sur des techniques d'IA.

Afin de clarifier le continuum entre automatisation et autonomisation, l'Organisation internationale de normalisation (ISO) travaille actuellement à une nouvelle norme internationale distinguant sept niveaux d'autonomie[32], dans laquelle les six premiers paliers correspondent à de l'hétéronomie et seul le dernier peut s'apparenter à de la pleine autonomie. Il convient toutefois de noter que, d'un point de vue technique, la distinction entre un système « automatisé », « semi-autonome » et « autonome » est moins évidente qu'il n'y paraît. Comme l'explique Catherine Tessier, chercheuse à l'Office national d'études et de recherches aérospatiale (ONERA), toutes ces caractéristiques reposent sur une seule et même technique : la programmation informatique. L'usage communément admis de l'adjectif « autonome » dans le langage technique de la robotique renvoie à un dispositif mobile doté de fonctions programmées informatiquement – notamment par l'utilisation de méthodes d'IA, de calcul et de perception d'actions – agissant dans un environnement complexe et dynamique afin de répondre à un cahier des charges. Dans cette perspective, un système est dit « autonome » s'il réalise sans intervention humaine les tâches pour lesquelles il a été programmé[33]. La différence entre l'automatisation et l'autonomisation tient à la nature des fonctions programmées informatiquement : un système capable de se déplacer seul d'un point à un autre est automatisé, mais il ne sera dit autonome que lorsque, rencontrant un obstacle sur son chemin, il saura l'éviter et retrouver son chemin, voire décider d'emprunter un nouvel itinéraire. Toutes les fonctions répondent cependant à un cahier des charges précis, qui empêche la perte de contrôle. L'autonomie totale n'est alors qu'un « leurre, une métaphore destinée à styliser un objet complexe[34] ».

31. T. Berthier, « Systèmes armés semi-autonomes : que peut apporter l'autonomie ? », *Revue Défense Nationale*, vol. 820, n° 5, 2019, p. 74-80.
32. Entretien avec un ingénieur général de l'armement le 10 décembre 2021. Cette classification part du niveau 0, c'est-à-dire l'absence d'automatisation, jusqu'au niveau 6 à savoir l'autonomie complète, en passant par l'assistance (niveau 1), l'automatisation partielle (niveau 2), l'automatisation conditionnelle (niveau 3), l'automatisation élevée (niveau 4) et l'automatisation complète (niveau 5).
33. CNPEN, *Le « véhicule autonome » : enjeux éthiques*, Avis du Comité national pilote d'éthique du numérique, 7 avril 2021.
34. CNIL, *Comment permettre à l'homme de garder la main ? Les enjeux éthiques des algorithmes et l'intelligence artificielle*, décembre 2017.

Néanmoins, le déploiement des systèmes d'armes autonomes véhicule une ambiguïté quant à leur statut et leurs capacités par rapport aux êtres humains, pour qui l'autonomie équivaut à la faculté de déterminer ses propres buts et de choisir librement ses actions. Cette ambiguïté est à l'origine de nombreuses craintes, dans la mesure où une entité « autonome » serait imprévisible par nature, prenant par elle-même des initiatives ou des décisions. Des récits suggèrent par exemple qu'un système d'arme autonome « choisirait lui-même » d'engager une cible plutôt qu'une autre et se fixerait sa propre mission en dehors de tout contrôle humain. Pourtant, aucun chef militaire n'accepterait d'être privé du contrôle sur la machine ou de la possibilité de décider et d'encadrer les objectifs qui lui sont assignés. Les militaires interrogés insistent sur le fait que les chefs et opérateurs détiendront, en toutes circonstances, l'autorité de développer, sélectionner, hiérarchiser et valider les cibles, d'y assigner les capacités et de diriger l'exécution. Ils conservent également à ce stade les autorités d'identification positive et d'engagement. C'est seulement lors de l'exécution de cet engagement, une fois autorisé, qu'apparaît la capacité d'un système d'arme intégrant de l'autonomie d'optimiser sa mission en sélectionnant une cible plutôt qu'une autre dans un groupe de cibles prédéterminées, ainsi que les points d'impact. Au regard de cette autonomie toute relative il serait donc judicieux d'employer, pour caractériser les capacités des systèmes informatiques fondés sur l'IA et la robotique, des termes explicitement différents de ceux utilisés pour qualifier les facultés humaines.

Une nouvelle révolution des techniques de la guerre ?

En 2015, le secrétaire adjoint à la Défense américain, Robert Work, estimait que l'autonomie serait l'un des « ingrédients technologiques » de la *Third Offset Strategy*[35]. Si l'expression n'est plus usitée, les axes de cette stratégie de compensation américaine restent bien présents et l'autonomie des systèmes d'armes demeure l'un des principaux « multiplicateurs de force[36] » sur lesquels misent les grandes puissances militaires. Elle est même parfois envisagée comme une nouvelle révolution des techniques de la guerre – au même titre qu'avant elle la poudre à canon ou l'arme atomique[37].

Selon son célèbre thuriféraire, le stratège Andrew Marshall, la « révolution dans les affaires militaires » désigne un bouleversement radical de l'art de la guerre et de la conduite des opérations, provoqué par

35. S. J. Freedberg Jr., « Centaur Army: Bob Work, Robotics, and the Third Offset Strategy », *Breaking Defense*, 9 novembre 2015, disponible sur : https://breakingdefense.com.
36. US Department of Defense, « Autonomy in Weapon Systems », Directive n° 3000.09, 2 novembre 2012.
37. « Autonomous Weapons: An Open Letter from AI & Robotics Researcher », Future of Life Institute, juillet 2015.

l'introduction de nouvelles technologies[38]. Dès lors, de la même manière que l'invention de la poudre a permis la colonisation et entraîné la domination de l'Occident et que l'apparition de l'arme atomique a structuré la conflictualité dans la seconde moitié du XXe siècle, il faut s'attendre à ce que l'essor des systèmes d'armes intégrant de l'autonomie façonne la conflictualité dans les années à venir.

Des avantages stratégiques et opérationnels évidents

Plusieurs éléments rendent d'ores et déjà nécessaire le recours à des systèmes d'armes largement automatisés. Le premier est d'ordre politique et lié à la réduction des pertes humaines. En effet, les systèmes d'armes intégrant de l'autonomie permettent de répondre à l'enjeu posé par la multiplication des opérations extérieures, dans un contexte où les opinions publiques occidentales tendent à être de plus en plus intolérantes à l'égard des pertes humaines[39]. Alors que la diminution des effectifs et la part des dépenses militaires se poursuivent dans les armées, tandis que le coût d'un soldat ne cesse d'augmenter, les systèmes d'armes autonomes sont particulièrement attractifs en matière d'acquisition de la masse, en même temps qu'ils ouvrent des perspectives de furtivité et de saturation accrues[40] tout en préservant l'homme dans des zones particulièrement inhospitalières.

Le second avantage est d'ordre économique. Les systèmes automatisés sont souvent présentés comme peu coûteux comparés aux plateformes habitées et requérant nettement moins de personnels[41]. Cette affirmation est toutefois à relativiser au regard des expérimentations, qui montrent que la maintenance s'avère onéreuse. En revanche, les économies en termes d'entraînement sont considérables, et les systèmes automatisés permettent en outre de décharger les opérateurs d'un pilotage chronophage et extrêmement consommateur d'attention[42].

Sur le plan opérationnel, les systèmes d'armes intégrant de l'autonomie s'avèrent par ailleurs plus rapides, précis, endurants et coordonnés sur le champ de bataille[43]. Dans le même temps, l'automatisation permet également de décupler les capacités de renseignement, de surveillance, d'acquisition d'objectifs et de reconnaissance (ISTAR) et donc d'accélérer la

38. T. Balzacq, « Bienvenue dans la guerre *high-tech* », *in* T. Balzacq et A. de Nève (dir.), *La Révolution dans les affaires militaires*, Paris, Economica, p. 15-29.
39. E. Weizman, *The Least of All Possible Evils: Humanitarian Violence from Arendt to Gaza*, Londres, Verso, 2012.
40. R. Briant, J.-B. Florant et M. Pesqueur, « La masse dans les armées françaises : un défi pour la haute intensité », *Focus stratégique*, n° 105, Ifri, juin 2021.
41. G. de Boisboissel, « Plaidoyer pour les systèmes d'armes létaux semi-autonomes », *Inflexions*, vol. 47, n° 2, 2021, p. 143-151.
42. *Ibid.*
43. J.-B. Jeangène Vilmer, « Terminator Ethics : faut-il interdire les "robots tueurs" ? », *Politique étrangère*, vol. 79, n° 4, 2014, p. 151-167.

boucle OODA (*Observe, Orient, Decide, Act*). L'autonomie est alors indispensable au regard de l'accélération du rythme des opérations, qui semble vouée à s'accentuer. Si l'on en croit les prédictions du Général John Allen en 2017 sur l'*hyperwar*[44], le conflit de haute intensité de demain sera fondé sur l'hyperréactivité des moyens technologiques déployés sur le champ de bataille. Dans le conflit symétrique du futur, il est ainsi probable que les puissances les plus avancées dans les technologies d'IA cherchent à s'imposer grâce à des systèmes d'armes de grande précision, réactifs et rapides, saturants et omniprésents. Il est tout à fait possible d'imaginer des affrontements de quelques dizaines de minutes visant à neutraliser les systèmes de défense, au moyen de missiles hypervéloces capables d'adapter leur trajectoire en temps réel ou de drones aériens et sous-marins saturant l'espace de bataille, notamment sous la forme d'essaims de robots autonomes. Or, une telle dynamique implique que le chef militaire délègue aux systèmes d'armes une certaine autonomie pour réagir à une vitesse dépassant de très loin le temps de réaction humain[45]. Comme l'indiquait la ministre des Armées Florence Parly dans son discours du 10 mai 2021 à Creil :

> « Quand on dispose de seulement quelques dizaines de minutes pour prendre une décision éclairée dont dépend la vie de milliers de personnes, on peut dire que même la plus grande intelligence humaine fait face à quelques difficultés. Nous savons que nous aurons un besoin impérieux de l'intelligence artificielle pour envisager tous les scénarios dans un temps record, analyser toutes les réponses possibles, et agir dans le bon tempo. » [46]

L'autonomie permet enfin de démultiplier les capacités de GE tout en améliorant la réponse aux vulnérabilités qu'elles engendrent. Le conflit survenu en Ukraine à l'été 2014 a démontré combien les drones étaient vulnérables aux techniques de brouillage de leurs moyens de communication, de localisation (GPS) et de renseignement[47]. Les modes opératoires de la lutte anti-drone sont ainsi en mesure de neutraliser les systèmes téléguidés ou téléopérés. L'autonomisation permet alors de pallier la perte de liaison entre un système d'armes et son opérateur et de poursuivre la mission dans un environnement électromagnétique contesté. Au regard du développement intense de capacités de déni d'accès et d'interdiction de zone (A2/AD) par des adversaires potentiels tels que la Chine ou la Russie[48], les systèmes d'armes intégrant de l'autonomie s'annoncent donc extrêmement avantageux.

44. J. R. Allen, « On Hypewar », U.S. Naval Institute, juillet 2017.
45. G. de Boisboissel, « Plaidoyer pour les systèmes d'armes létaux semi-autonomes », *op. cit.*
46. Discours de Florence Parly, ministre des Armées, sur l'intelligence artificielle de défense, Creil, 10 mai 2021.
47. O. Letertre, P. Justel, R. Lechâble et S. Dossé, « Regards croisés sur la guerre électronique », *Focus stratégique*, n° 90, Ifri, juillet 2019.
48. F. Lagrange, « L'*A2/AD* ou le défi stratégique de l'environnement contesté », *Revue Défense Nationale*, vol. 794, n° 9, 2016, p. 67-72.

Des vulnérabilités notables

Les perspectives prometteuses offertes par les systèmes d'armes autonomes s'accompagnent toutefois de nouvelles vulnérabilités, qu'il s'agit de ne pas sous-estimer. D'abord, les systèmes reposant sur la programmation informatique présentent des risques liés à la convergence entre le monde cyber et celui de la guerre électronique. En 2007, l'opération israélienne *Orchard* contre un site nucléaire en Syrie a démontré le rapprochement entre la lutte informatique offensive et les capacités de guerre électronique[49]. En effet, les moyens de GE peuvent permettre, localement et sous certaines conditions, d'accéder plus facilement aux systèmes d'information adverses peu connectés avec l'extérieur, voire protégés par des *air gaps*[50]. Or, un système d'armes autonomes étant un système d'information comme un autre, il constitue nécessairement une voie d'accès électromagnétique par laquelle des données peuvent être transmises pour mener une attaque. Leur généralisation risque donc d'étendre la surface d'attaque des systèmes et des réseaux dans lesquels ils évoluent. Dans le même temps, les systèmes d'armes fonctionnant avec des algorithmes sont vulnérables aux cyberattaques et au piratage informatique, qui pourraient donner lieu à des opérations de déception ou de sabotage – par exemple par l'intoxication des algorithmes grâce à des données altérées. Dans ce contexte, l'analyse technique des éventuels biais ou angles morts des algorithmes des systèmes d'armes autonomisés devrait aussi ouvrir la voie à des contre-mesures permettant de les tromper, parfois d'une manière très simple. Ainsi, les nombreuses méthodes utilisées par des particuliers pour contrer les systèmes de reconnaissance faciale ont montré qu'il suffit parfois d'un autocollant ludique pour les mettre en échec.

Les systèmes d'armes autonomes posent également des problèmes de confiance dans la machine. D'une part, du fait de l'effet « *boîte noire*[51] », il est très difficile de saisir les processus de décision de certains algorithmes. Appliqué aux systèmes d'armes, cela signifie qu'il serait impossible de suivre leurs raisonnements en temps réel et que les problèmes analysés et les solutions retenues ne pourraient pas être directement contrôlés[52]. Aussi les forces armées risquent-elles de faire preuve d'une certaine défiance à l'égard de systèmes autonomes susceptibles de produire des réactions en chaîne échappant à l'entendement humain. À l'inverse, le manque de compréhension du fonctionnement des systèmes pourrait se traduire par une confiance excessive dans la machine, alors qu'il est indispensable de

49. J.-B. Florant, « Cyberarmes : la lutte informatique offensive dans la manœuvre future », *Focus stratégique*, n° 100, Ifri, janvier 2021.
50. *Ibid.*
51. L'effet *black box* renvoie au fait que les techniques d'intelligence artificielle aboutissent parfois à des résultats sans que les programmeurs puissent expliquer comment la machine y est parvenue. Voir A. Holland Michel, « The Black Box, Unlocked: Predictability and Understandability in Military AI », UNIDIR, septembre 2020.
52. J.-C. Noël, « Intelligence artificielle : vers une nouvelle révolution militaire ? », *Focus stratégique*, n° 84, octobre 2018.

conserver des mécanismes de vérification humaine. En effet, les techniques d'IA ne sont pas exemptes de biais : il est estimé que pas moins de 85 % de tous les projets intégrant de l'intelligence artificielle provoqueront des erreurs dues aux biais des algorithmes, de leurs développeurs ou des données utilisées pour les faire fonctionner[53].

L'intégration d'une plus grande autonomie pose également le problème des cas non conformes et de « l'effet falaise », qui désigne l'altération brutale du comportement d'un système, en raison d'une modification – parfois très légère – du scénario envisagé pour un aléa, dont les conséquences sont alors fortement aggravées. En termes militaires, c'est un problème de taille qui interroge sur la manière de continuer d'exercer la mission si ces systèmes dysfonctionnent. En effet, avec des systèmes rendus plus autonomes, le « mode dégradé » est considérablement plus difficile à conserver.

Par ailleurs, l'émergence de systèmes d'armes de plus en plus autonomes dans un contexte géostratégique instable pose de nombreux défis au regard des risques de prolifération et de dissémination auprès d'acteurs hostiles, éventuellement non étatiques. En effet, parce que l'autonomie permet de réduire la taille, le coût des systèmes d'armes et les risques encourus par les forces, tout en améliorant la productivité et la sécurité, elle pourrait s'avérer particulièrement dangereuse si, par exemple, des groupes terroristes parvenaient à s'en doter. Ainsi, la S*tratégie française d'intelligence artificielle de défense* observe que certaines puissances dites révisionnistes telles que la Russie et la Chine considèrent que le *statu quo* international peut être bousculé à leur avantage grâce aux technologies émergentes s'appuyant sur l'IA militaire. Ces dernières permettent une forme de nivellement des positions stratégiques car elles sont relativement peu coûteuses et aisées à maîtriser[54]. Dans le même temps, d'autres acteurs pourraient « rentrer dans le jeu » en acquérant des technologies qui, bien que complexes, deviennent de moins en moins onéreuses et donc toujours plus accessibles.

Enfin, l'autonomisation des systèmes d'armes suscite de nombreuses préoccupations d'ordre éthique et juridique. À l'occasion du premier Forum de Paris sur la Paix, le secrétaire général de l'Organisation des Nations unies (ONU) António Guterres a appelé les États à « interdire ces armes politiquement inacceptables et moralement révoltantes[55] ». Aussi, l'émergence des systèmes d'armes autonomes donne-t-elle lieu à un vaste débat, initié par plusieurs organisations non gouvernementales (ONG) qui réclament la mise en œuvre d'un traité les interdisant de façon préventive. En effet, des doutes existent sur leur capacité à se conformer au droit international humanitaire – notamment aux principes de précaution, de distinction, et de proportionnalité – et sur leur compatibilité avec le droit à

53. « Gartner Says Nearly Half of CIOs Are Planning to Deploy Artificial Intelligence », Gartner Newsroom, 13 février 2018, disponible sur : www.gartner.com.
54. *Stratégie française sur l'intelligence artificielle au service de la défense*, Rapport de la Task Force IA, ministère des Armées, septembre 2019.
55. « Allocution du Secrétaire Général au Forum de Paris sur la Paix », Paris, 11 novembre 2018.

la vie et le respect de la dignité humaine. Par ailleurs, les opposants à l'autonomisation des systèmes d'armes craignent qu'elle n'abaisse le seuil d'entrée en conflit en diminuant le coût économique et politique de l'engagement de forces et qu'elle rende le rythme des opérations trop rapide pour l'entendement humain[56]. Force est cependant de constater que de telles craintes ont déjà été avancées lors des premiers déploiements de drones armés ou de la mise en réseau des forces, sans que la thèse de la transformation radicale de l'entrée en conflit par les nouvelles capacités militaires ne soit validée. Comme le souligne Colin Gray, les capacités militaires modifient les conditions et les options proposées aux chefs militaires, mais elles ne créent pas la conflictualité[57]. Enfin, des organisations non gouvernementales comme Human Rights Watch redoutent qu'il soit impossible de déterminer les responsabilités en cas d'exaction commise avec l'aide d'un système autonome[58], ce qui poserait des problèmes évident, en particulier dans le cas de stratégies intégrales hybrides sous le seuil.

Toutefois, toutes les approches juridiques et éthiques de la problématique n'aboutissent pas aux mêmes conclusions. Il existe de nombreux exemples de violations du droit des conflits armés commises par des humains en l'absence de systèmes autonomes. Certains auteurs opposent alors aux détracteurs des systèmes d'armes intégrant de l'autonomie qu'il suffit qu'ils soient d'une faillibilité inférieure ou égale à la faillibilité humaine (test d'Arkin[59]), pour que leur usage soit souhaitable. Selon le philosophe américain Bradley J. Strawser, il y aurait même une obligation morale à utiliser la technologie pour des raisons humanitaires, lorsqu'elle permet de minimiser les risques pour les soldats et de mieux respecter le droit de la guerre que les humains[60].

Le débat sur les armes autonomes a désormais dépassé le seul cercle des universitaires travaillant sur l'éthique de la guerre. En 2017, afin d'alerter les opinions publiques du monde entier sur les risques liés à l'autonomisation des systèmes d'armes, des dizaines de chercheurs et de chefs d'entreprise dans le domaine de l'IA ont adressé une lettre ouverte à l'ONU, l'exhortant à faire obstacle au développement des systèmes d'armes autonomes. Les signataires de ce texte, parmi lesquels des personnalités aussi éminentes que Stephen Hawking ou Elon Musk, s'y montraient particulièrement inquiets, allant jusqu'à affirmer qu'« une course aux armements est pratiquement inévitable [...] le dilemme pour l'humanité est soit d'entamer une telle course aux armements, soit d'empêcher qu'elle ne commence[61] ».

56. R. Sparrow, « Killer Robots », *Journal of Applied Philosophy*, vol. 24, n° 1, 2007, p. 62-77.
57. C. S. Gray, *Strategic Studies – A Critical Assessment,* Londres, Aldwych Press, 1981.
58. Human Rights Watch, « Mind the Gap: The Lack of Accountability for Killer Robots », 9 avril 2015.
59. Adapté du test de Turing par le roboticien Ronald Arkin, selon lequel le comportement du robot doit être indifférenciable de celui de l'homme dans un contexte donné. Lire R. C. Arkin, « The Case for Ethical Autonomy in Unmanned Systems », *Journal of Military Ethics*, vol. 9, n° 4, 2010, p. 332-341.
60. B. J. Strawser, « Moral Predators: The Duty to Employ Uninhabited Aerial Vehicles », *Journal of Military Ethics*, vol. 9, n° 4, 2010 p. 342-368.
61. « Autonomous Weapons: An Open Letter from AI & Robotics Researcher », *op. cit*.

Vers une course aux armements autonomes ?

En novembre 2020, le chef d'état-major des armées britanniques annonçait vouloir disposer de 30 000 « robots soldats » à l'horizon 2030 – soit un quart des effectifs prévus à cette date[62]. Il invitait ses forces à faire preuve d'ouverture d'esprit, « non pas pour savoir ce qu'elles doivent faire, mais pour comprendre ce qu'elles peuvent obtenir ». L'autonomisation des systèmes d'armes suscite également un intérêt croissant dans le secteur de l'industrie de défense. À ce jour, une trentaine d'entreprises et une dizaine de pays sont identifiés comme développant des systèmes d'armes intégrant de l'autonomie[63].

Bien que la majeure partie des données soient confidentielles, il est possible de déterminer quels sont les acteurs de premier plan à l'aune de leurs déclarations publiques, des programmes spécifiques qu'ils initient et de leur niveau d'expertise en IA militaire, évalué par le nombre de publications et de brevets déposés en la matière – trois éléments indispensables pour développer des systèmes d'armes autonomes[64].

Les applications militaires de l'autonomie, de l'IA et de la robotique sont envisagées comme des priorités stratégiques pour la Russie, les États-Unis et la Chine, qui sont incontestablement les leaders de cette nouvelle dynamique des armements. Ces trois « champions » sont suivis par un second cercle d'États investissant dans l'autonomisation des systèmes d'armes, dans lequel se trouvent Israël, la Corée du Sud, le Japon, l'Inde, la Turquie, l'Iran, le Pakistan, le Royaume-Uni et la France. La stratégie française sur l'intelligence artificielle au service de la défense estime que chacun de ces États dispose de « certains atouts mais sans masse critique suffisante[65] ». Tous se sont dotés de capacités technologiques et industrielles leur permettant de développer significativement l'autonomie de leurs armements, avec des constructeurs et des assembleurs de systèmes automatisés aériens, terrestres, marins et sous-marins.

62. L. Marchand, « Des milliers de "robots-soldats" pourraient bientôt rejoindre l'armée britannique », *Les Échos*, 9 novembre 2020.
63. V. Boulanin et M. Verbruggen, « Mapping the Development of Autonomy in Weapon Systems », *op. cit.*
64. J. Haner et D. Garcia, « The Intelligence Arms Race: Trends and World Leaders in Autonomous Weapons Development », *Global Policy*, vol. 10, n° 3, 2019, p. 331-337.
65. *Stratégie française sur l'intelligence artificielle au service de la défense*, Rapport de la Task Force IA, ministère des Armées, *op. cit.*

Tableau 2 : Les champions de l'intelligence artificielle

	Capacités			Expertise	
	Budget militaire 2022 en dollars	Investissements sur les drones 2018-2021 en dollars	Nombre d'entreprises en intelligence artificielle	Nombre de publications scientifiques liées à l'IA entre 1997 et 2017	Nombre de brevets liés à l'IA déposés jusqu'en mars 2019
États-Unis	768 Md $	17,5 Md $	2 028	369 588	279 145
Chine	209 Md $	4,5 Md $	1 011	327 034	66 508
Russie	65 Md $	3,9 Md $	17	52 175	69 158

Source : J. Haner et D. Garcia, « The Intelligence Arms Race: Trends and World Leaders in Autonomous Weapons Development », Global Policy, vol. 10, n° 3, septembre 2019.

À travers plusieurs études de cas, cette deuxième partie s'attache donc à analyser cette course aux armements autonomes, permise par l'écosystème de R&D militaire dans le domaine de l'autonomie des systèmes et sa traduction en matière de systèmes d'armes. Ainsi, sont présentés les principaux développements technologiques dans les quatre milieux.

Les « champions » de l'autonomie des systèmes d'armes

Bien qu'il soit difficile d'évaluer la sincérité des feuilles de route nationales publiées par les États en matière d'armements autonomes, de grandes tendances se dessinent. Les États-Unis et la Chine dominent cette nouvelle course aux armements, en grande partie grâce à une industrie privée du numérique importante, très avancée sur le plan technologique et capable d'irriguer le développement d'applications militaires. La Russie suit de près ces deux géants, grâce à de nombreux projets, qu'elle n'hésite pas à expérimenter sur les théâtres d'opérations.

Les États-Unis, leader incontestable

Forts d'une grande proximité entre les grands écosystèmes de recherche – tant universitaires que du secteur privé – et le département de la Défense, les États-Unis demeurent le chef de file en matière d'autonomisation des systèmes d'armes, d'ailleurs envisagée par le Pentagone comme un « multiplicateur de puissance[66] » et identifiée par le National

66. US Department of Defense, « Autonomy in Weapon Systems », *op. cit.*

Counterintelligence and Security Center parmi les technologies émergentes critiques pour la sécurité nationale américaine[67].

Les États-Unis ont été pionniers dans le domaine de l'automatisation des systèmes d'armes, comme en témoigne un document de l'Air Force de mai 2009 évoquant l'éventualité de passer pour certains systèmes du contrôle direct (*man in the loop*) à un mode moins supervisé (*man on the loop*)[68]. En 2010, les États-Unis avaient déjà investi 4 milliards de dollars dans la recherche sur les systèmes d'armes autonomes, auxquels se sont ajoutés 18 milliards de dollars jusqu'en 2020[69]. Ils ont également été les premiers à se doter, dès 2012, d'une directive ministérielle sur l'autonomie des systèmes d'armes, la Directive 3000.09 autorisant les systèmes d'armes semi-autonomes capables d'engager des cibles présélectionnées par un opérateur humain, mais aussi les systèmes pleinement autonomes pouvant sélectionner et engager des cibles après l'approbation d'un membre de haut niveau du département de la Défense[70]. Le Général Mark Milley, président du comité des chefs d'état-major, prédisait quant à lui dès 2017 que les systèmes armés autonomes déferleraient sur les théâtres d'opérations beaucoup plus rapidement qu'estimé et qu'ils étaient sur le point de « changer en profondeur le caractère fondamental de la guerre[71] ». De plus, le département de la Défense a indiqué qu'il était inconcevable d'envoyer au front des combattants américains face à des unités robotisées adverses, au risque qu'ils se fassent massacrer. Par conséquent, les États-Unis investissent massivement le champ de l'autonomie des systèmes d'armes.

La Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), l'agence du Pentagone dédiée à la recherche et au développement des technologies de rupture destinées à un usage militaire – dotée d'un budget de près de 3 milliards de dollars – ainsi que les centres de R&D des différents services (l'Air Force Research Lab, le Navy Research Lab et l'Army Research Lab) occupent une place centrale dans la stimulation de la recherche technologique et le soutien aux activités industrielles, au même titre que l'Intelligence Advanced Research Projects Activity (IARPA). Cet organe pour les projets de recherche avancée en renseignement, qui dépend du Director of National Intelligence (DNI) est chargé d'orienter la recherche pour les défis posés à la communauté du renseignement américain. L'IARPA a en effet pour mission d'« imaginer et diriger des recherches à fort risque et fort impact débouchant sur des technologies innovantes aux avantages futurs considérables pour le renseignement ». Par ailleurs, le département de la Défense américain s'est doté en 2015 d'une Defense Innovation Unit (DIU) devant permettre aux

67. *Protecting Critical and Emerging U.S. Technologies from Foreign Threats*, National Counterintelligence and Security Center, octobre 2021.
68. Cité dans C. de Ganay et F. Gouttefarde, *Rapport d'information sur les systèmes d'armes létaux autonomes, op. cit.*
69. V. Boulanin et M. Verbruggen, « Mapping the Development of Autonomy in Weapon Systems », *op. cit.*
70. U.S. Department of Defense, « Autonomy in Weapon Systems », Directive n° 3000.09, 2 novembre 2012.
71. Cité dans C. de Ganay et F. Gouttefarde, *Rapport d'information sur les systèmes d'armes létaux autonomes, op. cit.*

forces armées de se saisir plus rapidement des technologies émergentes imaginées par les *start-ups* de la Silicon Valley, de Boston ou encore d'Austin. La DIU dispose de cinq portefeuilles dédiés à la résolution de besoins de sécurité nationale dans les domaines de l'IA et de l'apprentissage automatique, de l'autonomie, du cyber, des systèmes et de l'espace.

Un an plus tard, en 2016, était constituée une instance de dialogue entre le Pentagone et les entreprises civiles du numérique, le Defense Innovation Board (DIB), ayant vocation à faciliter les échanges entre les mondes civils et militaires. En effet, l'IA et la robotique étant des technologies duales – c'est-à-dire qu'elles peuvent avoir des applications aussi bien civiles que militaires – les progrès réalisés par les grandes entreprises du Web en matière d'autonomisation bénéficient aux armées. Aux États-Unis, plus de 2 000 entreprises travaillent sur l'IA, ce qui a permis la publication de près de 400 000 articles académiques ces vingt dernières années et le dépôt de plus de 300 000 brevets en matière d'IA jusqu'à aujourd'hui[72]. De fait, le secteur privé est en première ligne en ce qui concerne le développement de technologies pertinentes, ce qui place les armées en position d'intégrateur et non plus d'inventeur[73]. En ce sens, les GAFAM[74] constituent de véritables moteurs d'innovation, sur lesquels le Pentagone tente de s'appuyer autant que possible.

Toutefois, des résistances culturelles se font parfois sentir. Ainsi, en 2018, des milliers d'employés de Google ont lancé une pétition contre le projet *Maven* porté par le Pentagone – qui reposait sur l'utilisation de techniques d'IA pour interpréter des images pour des missions de surveillance et des frappes par drone. La firme de Mountain View a été contrainte de mettre un terme à son partenariat avec le Pentagone, pourtant estimé à près de 250 millions de dollars[75]. Le problème semble résider dans l'opposition de principe à l'utilisation à des fins militaires d'une technologie d'abord civile et la mentalité tournée vers le « bien commun », couramment rencontrées dans cet écosystème qui voit la collaboration avec les armées d'un très mauvais œil. « Nous pensons que Google ne devrait pas être impliqué dans des activités guerrières », énonçaient ainsi les salariés dans une lettre adressée au président de la société, Sundar Pichai[76]. Pourtant le contrat, négocié fin septembre 2017, spécifiait que le nom de Google ne devait pas être communiqué sans le consentement de la firme. En effet, il n'est pas rare de voir des filiales des géants du Web, comme Amazon Web Services (AWS), apparaître sur les contrats noués avec le Pentagone pour contourner les pressions normatives pouvant peser sur les collaborations

72. J. Haner et D. Garcia, « The Intelligence Arms Race: Trends and World Leaders in Autonomous Weapons Development », *op. cit.*
73. C. Bômont, « Le *cloud* défense : défi opérationnel, impératif stratégique et enjeu de souveraineté », *Focus stratégique*, n° 107, novembre 2021.
74. Les cinq géants du Web américains : Google, Apple, Facebook, Amazon et Microsoft.
75. D. Wakabayashi et S. Shane, « Google Will Not Renew Pentagon Contract That Upset Employees », *The New York Times*, 1er juin 2018.
76. N. Rauline, « Le mystérieux projet Maven divise Google », *Les Échos*, 6 avril 2018.

avec le secteur de la défense. AWS s'est d'ailleurs positionné pour prendre la suite de Google dans le développement du projet *Maven*[77].

En juin 2018, le Pentagone a en outre créé en son sein une structure interarmées dédiée au développement de l'IA de défense, le Joint Artificial Intelligence Center (JAIC), qui vise à accélérer le développement des applications militaires reposant sur les techniques d'intelligence artificielle et l'autonomie. Depuis le 1er février 2022, le Pentagone est doté d'un Chief Digital and Artificial Intelligence Officer (CDAO), qui reporte directement au secrétaire à la Défense et a pour mission de « renforcer et intégrer la data, l'IA, et les solutions numériques ». Le CDAO succède ainsi au JAIC et chapeaute les deux autres services du Pentagone chargé des données et du développement de logiciels.

La Chine, une montée en puissance inexorable

Le président Xi Jinping a fixé comme objectif que la République populaire de Chine (RPC) devienne le premier centre d'innovations au monde en 2030 dans des domaines technologiques divers, notamment en matière d'IA militaire et de systèmes armés autonomes[78]. Le Conseil des affaires de l'État chinois estime ainsi que son industrie dans le domaine de l'IA devrait atteindre 59 milliards de dollars en 2025 et 150 milliards de dollars en 2030[79]. Grâce à d'importants investissements, à d'ambitieux plans de développement dans le domaine et au dynamisme des BATX[80], la Chine parvient donc à « couper dans les virages[81] » selon l'expression d'Éric Trappier, directeur de Dassault Aviation. Depuis 2014, l'IA et la robotique sont reconnus comme des domaines technologiques prioritaires par le gouvernement chinois, comme en témoignent deux plans publiés en 2016 : le *Robotics Industry Development Plan (2016–2025)* et le *Three-year Guidance for Internet Plus and Artificial Intelligence Plan (2016–2018)*[82]. Entre 2013 et 2018, les investissements chinois ont financé 60 % de l'ensemble des projets mondiaux en matière d'IA – soit deux fois plus que les États-Unis à la même période[83]. Cette croissance est également visible au niveau des brevets en matière d'apprentissage automatique et d'IA. En effet, la moitié des huits entreprises en détenant le plus grand nombre sont basées en Chine. Les entreprises Tencent et Baidu ont été particulièrement prolifiques en la matière entre 2015 et 2020, puisqu'elles ont respectivement multiplié par 9 et par 5 le nombre de familles de brevets de ce type en leur

77. Entretien avec une chercheuse du Center for Security and Emerging Technologies.
78. *A Next Generation Artificial Intelligence Development Plan*, China State Council, juillet 2017.
79. *Ibid.*
80. Équivalents chinois des GAFAM : Baidu, Alibaba, Tencent, et Xiaomi.
81. C. de Ganay et F. Gouttefarde, *Rapport d'information sur les systèmes d'armes létaux autonomes*, *op. cit.*
82. V. Boulanin et M. Verbruggen, *Mapping the Development of Autonomy in Weapon Systems*, *op. cit.*, p. 102.
83. J. Haner et D. Garcia, « The Intelligence Arms Race: Trends and World Leaders in Autonomous Weapons Development », *op. cit.*

possession[84]. Aussi la Chine inquiète-t-elle par la vitesse de ses progrès, d'autant qu'elle jouit de deux atouts majeurs.

D'abord, comme le révèle le document stratégique français sur l'intelligence artificielle de défense, « la Chine peut disposer d'une capacité de pilotage plus ferme des acteurs privés et leur prescrire de coopérer avec la sphère publique, y compris militaire[85] ». En effet, le Parti exerce un contrôle étroit sur les firmes numériques et sur le monde académique. Ce constat témoigne de la prégnance de la stratégie de « fusion civilo-militaire » théorisée par Xi Jinping et qui doit permettre le plus possible de transferts entre les différents acteurs (recherche, industrie, État, armées)[86]. En conséquence, les incitations à la collaboration entre ces secteurs devraient se poursuivre, voire augmenter[87]. Cette fusion complexifie le travail du système américain de contrôle des exportations car les frontières entre les entités militaires et civiles chinoises sont poreuses. En effet, plusieurs sociétés vendent à l'APL mais aussi à des entreprises civiles. C'est le secteur privé chinois – et non les entreprises publiques – qui finance majoritairement et fournit des équipements en matière d'IA à l'APL. Il reçoit en contrepartie des subventions importantes de l'État[88].

Plusieurs lois et programmes ont été votés, tels que la Loi sur la sécurité nationale (2015), la Loi sur le renseignement national (2017), le Plan de développement de l'intelligence artificielle de nouvelle génération et la fusion civilo-militaire, afin de garantir une conformité et une synchronisation entre toutes les agences et entreprises chinoises[89]. Par exemple, l'entrée en vigueur de la loi sur le renseignement impose à toutes les entreprises chinoises de partager leurs technologies et leurs informations avec les armées, le renseignement et les services de sécurité chinois.

En outre, la Chine peut tirer profit des données générées par les quelque 1,4 milliards de citoyens (dont environ 800 millions d'internautes actifs) et de son expérimentation du crédit social dans plus de 70 villes[90]. Cette manne de données explique en partie qu'elle avance plus rapidement que les autres États dans le domaine de l'apprentissage machine, qui requiert des volumes de données colossaux. Néanmoins, en ce qui concerne les missions militaires, la Chine dispose de moins de données que les États-Unis – typiquement en matière d'apprentissage machine fondé sur le renseignement de mesures et

84. T. Gaudiaut, « Qui mène la course à l'innovation dans l'IA ? », *Statista*, 3 juin 2021, disponible sur : https://fr.statista.com.
85. *Stratégie française sur l'intelligence artificielle au service de la défense*, Rapport de la Task Force IA, ministère des Armées, *op. cit.*
86. E. B. Kania et L. Laskai, « Myths and Realities of China's Military-Civil Fusion Strategy », Center for a New American Security, Janvier 2021.
87. Center for Naval Analyses (CNA), *China's Defense Exports: Small Volume, but Room for Growth*, 2021.
88. R Fedasiuk, « We Spent a Year Investigating What the Chinese Army Is Buying. Here's What We Learned », *Politico*, 11 octobre 2121, disponible sur : www.politico.com.
89. A. Banik, « How is China Planning to Use Artificial Intelligence in Warfare? », *Analytics Insight*, 3 février 2022, disponible sur : www.analyticsinsight.net.
90. S. Arsène, « China's Social Credit System: A Chimera with Real Claws », *Asie.Visions*, n° 110, Ifri, novembre 2019.

de signatures. La Chine pâtit en effet de son manque d'expérience opérationnelle et peine à élaborer une doctrine d'emploi des systèmes d'armes intégrant de l'autonomie[91], bien qu'une utilisation frontalière, voire sur le territoire national ne soit pas à exclure. Ainsi, lors du conflit frontalier qui l'a opposée à l'Inde au printemps 2020, la Chine aurait utilisé des systèmes chenillés armés sans pilotes pour faire face aux conditions climatiques et à la haute altitude de l'Himalaya.

La Chine souffre cependant d'une « fuite des cerveaux » et manque de main-d'œuvre qualifiée pour accomplir pleinement son dessein technologique. Comparé aux États-Unis, le principal facteur de retard réside dans la filière de formation Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM), surtout en matière de science et technologie[92]. Ainsi, en mars 2017, le pays ne comptait que 50 000 experts en IA, contre 850 000 aux États-Unis. Pékin a cependant conscience de cette pénurie de talent : le ministère chinois de l'Industrie estime qu'il faudra former 5 millions de professionnels de l'IA pour atteindre les objectifs officiels[93].

Dans cette perspective, un nouveau programme de l'Institut de technologie de Pékin (BIT) propose le recrutement de 31 étudiants à la sortie du lycée et les former pour qu'ils deviennent les plus jeunes scientifiques experts en IA militaire au monde. Le BIT est l'un des meilleurs instituts de recherche sur les armes à l'échelle nationale. Ainsi, le lancement de ce nouveau programme témoigne de l'importance que la Chine accorde au développement de la technologie de l'IA à usage militaire. Eleonore Pauwels, chercheuse sur les technologies émergentes au Center for Policy Research, s'est dite préoccupée par le lancement de ce programme : « il s'agit du premier programme universitaire au monde conçu pour encourager de manière agressive et stratégique la prochaine génération à penser, concevoir et déployer l'IA pour la recherche et l'utilisation militaires[94] ». Par ailleurs, en 2018, deux grands centres de recherche respectivement dédiés à l'étude de la robotique et de l'IA militaire ont été inaugurés au sein du ministère de la Défense[95]. Les salons militaires comme le Zhuhai Airshow, mais aussi la conférence mondiale sur l'IA, qui se tient annuellement à Shanghai depuis 2018 sont l'occasion de présenter des systèmes autonomes de plus en plus avancés, armés ou programmables pour des « attaques-suicides autonomes[96] ».

91. E. B. Kania, « "AI Weapons" in China Military Innovations », *Brookings Global China*, avril 2020.
92. En termes d'ingénierie industrielle en revanche, la Chine a déjà dépassé ses compétiteurs stratégiques.
93. *Ibid*.
94. S. Chen, « China's Brightest Children Are Being Recruited to Develop AI "Killer Bots" », *South China Morning Post*, 8 novembre 2018, disponible sur : www.scmp.com.
95. C. de Ganay et F. Gouttefarde, *Rapport d'information sur les systèmes d'armes létaux autonomes, op. cit.*
96. M. Tellier, « L'intelligence artificielle au service des ambitions de la Chine », *France Culture*, 29 août 2019, disponible sur : www.franceculture.fr.

La situation inquiète également le département de la Défense américain, comme en témoigne son rapport annuel sur la puissance militaire chinoise. Ce rapport relate que l'APL investit massivement dans la « guerre intelligente » – une stratégie fondée sur la mise en réseau et l'autonomie des systèmes d'armes et des opérations militaires. Il a été constaté que l'armée chinoise « intelligentise » la guerre en achetant des systèmes d'IA pour toutes sortes d'applications, y compris les véhicules autonomes, l'analyse du renseignement, l'aide à la décision, la guerre électronique et les cyberopérations[97]. L'APL semble par ailleurs se préparer à une utilisation accrue des drones sur les théâtres, comme en attestent les deux vidéos diffusées par son organisme, le China Military Video Net, en début d'année 2022, y compris de combat[98].

De fait, l'IA occupe une place significative dans la montée en puissance militaire de la Chine car elle offre à Pékin la possibilité de rivaliser avec Washington dans le domaine du développement de technologies émergentes. Les penseurs militaires chinois estiment que, dans les conditions de guerre informatisée et « intelligentisée », la stratégie pour vaincre un adversaire consiste à créer une perturbation ou une paralysie dans ses systèmes opérationnels et de C2. Dans ce contexte, la célérité est présentée comme un facteur critique et déterminant l'issue de la guerre. Or l'un des avantages de l'autonomisation est justement d'accélérer la prise de décision militaire.

D'autre part, selon le *2021 China Military Power Report,* l'APL finance de nombreux projets dans le domaine de l'IA, dont les applications militaires pourraient inclure la robotique avancée utilisée dans l'exploitation améliorée des données, l'aide à la décision, la fabrication, les systèmes sans pilote et le C4ISR (*Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance*)[99].

Enfin, Pékin soutient l'interdiction des systèmes d'armes entièrement autonomes tout en précisant qu'elle s'applique uniquement à leur utilisation sur le champ de bataille – pas à leur développement ni à leur production. Pour le chercheur américain Peter Singer, les Chinois « travaillent simultanément sur la technologie tout en essayant d'utiliser le droit international comme une limite contre leurs concurrents ».

La Russie, le pari du terrain

Si la plupart des spécialistes estiment qu'elle ne jouit pas de la même avance technologique que les États-Unis ou la Chine en matière d'autonomie[100], la Fédération de Russie se démarque par sa détermination à tester des systèmes

97. R Fedasiuk, « We Spent a Year Investigating What the Chinese Army Is Buying. Here's What We Learned », *op. cit.*
98. Center for Naval Analyses (CNA), *The China AI and Autonomy Report, Issue 10*, 2022.
99. L. Zhen, « Time to Set Global Rules for AI Warfare, China Tells UN Weapons Review », *South China Morning Post*, 14 décembre 2021, disponible sur **:** www.scmp.com.
100. V. Boulanin et M. Verbruggen, « Mapping the Development of Autonomy in Weapon Systems », *op. cit.*

très automatisés sur les théâtres d'opérations, notamment en Syrie, de façon à établir des retours d'expériences rapides[101]. Ces expérimentations sur le terrain, bien que parfois peu concluantes, lui permettent néanmoins de compenser ses moindres capacités d'investissement. Ainsi, si aucun système d'arme pleinement autonome ne semble avoir atteint la maturité nécessaire pour un déploiement en situation de combat, ces efforts d'expérimentation et de développement apportent à l'industrie russe une expérience de grande valeur pour des projets à moyen et long terme. L'exercice militaire *Zapad 2021* a d'ailleurs été l'occasion de faire une démonstration de force des capacités robotiques russes[102].

Le potentiel de l'autonomisation est d'abord envisagé par les Russes comme un moyen de renforcer leurs capacités ISR et ainsi corriger l'une des faiblesses structurelles de leur appareil de force. La Russie affiche en outre son ambition de retirer graduellement l'humain du champ de bataille aux niveaux tactiques et opératifs et disposer de « robots valets d'armes » pour les aspects logistiques. En avril 2020, le directeur de la Russian Foundation for Advanced Projects[103] (équivalent russe de la DARPA) a ainsi annoncé : « les combattants vont être progressivement remplacés par leurs "frères" robotiques, qui peuvent agir de manière plus rapide, précise et sélective que les humains[104] ». De fait, la Russie voit dans l'autonomisation des systèmes d'armes une utilité militaire immense, et prépare cette évolution en prônant depuis 2015 une doctrine d'exclusion de l'homme de la zone d'immédiate confrontation[105].

En septembre 2015, le ministère russe de la Défense avalisait un plan d'action destiné à robotiser 30 % des plateformes militaires jusqu'en 2025[106]. Puis en 2016, le général Valeri Guerassimov, chef d'état-major des forces armées, annonçait que la Fédération ambitionnait de développer des unités de combat robotisées qui soient en mesure d'intervenir sur tous les théâtres d'opérations[107]. En juillet 2017, soit seulement quelques mois plus tard, l'entreprise Kalachnikov déclarait s'engager dans la fabrication de drones de combat « autonomes », fonctionnant grâce à des techniques d'apprentissage par réseaux de neurones, capables de reconnaître des cibles et de prendre des décisions sans supervision humaine – dont celle de l'engagement.

101. I. Mandraud, « La Russie dit avoir "testé" 200 armes en Syrie, sans faire de victimes civiles », *Le Monde*, 3 octobre 2018.
102. A. Marrow et S. Louet, « Des robots combattants russes utilisés lors des exercices "Zapad-2021" », *La Tribune*, 12 septembre 2021.
103. Cette structure, dotée d'un budget d'environ 60 millions de dollars, a été créée en octobre 2012 sous l'impulsion de Sergueï Choïgou pour rattraper le retard technologique accumulé vis-à-vis des États-Unis. Elle axe depuis 2015 ses efforts sur la robotique militaire.
104. K. Atherton, « Robots Will Replace Soldiers in Combat, Says Russia », *Forbes*, 30 avril 2020.
105. J. Nocetti, « Un outsider paradoxal : la Russie dans la course à l'intelligence artificielle », *Russie.NEI.Reports,* n° 34, Ifri, décembre 2020.
106. *Ibid*.
107. T. Berthier, « Vers le combat robotisé… », *Revue Défense Nationale*, vol. 791, n° 6, 2016, p. 155-160.

Après un premier décret présidentiel de 2018, les progrès ont été rapides. La Fédération s'est dotée d'une feuille de route dans les domaines de l'IA et des neuro-technologies, a adopté une stratégie nationale pour le développement de l'IA à l'horizon 2030 et a surtout mis en œuvre un programme d'économie digitale devant faire passer les investissements en IA de 1,9 % du PIB à 5,1 % en 2024, le tout renforcé par le lancement en 2020 d'un projet fédéral en IA doté de 86,5 milliards de roubles (ce qui représente environ 1,1 milliard de dollars).

La recherche dans le domaine de l'autonomie en Russie s'organise autour des plusieurs grands axes. D'abord, les autorités russes ont entrepris de former des consortiums technologiques militaro-industriels d'IA et de *big data*. Par exemple, la technopole ERA, inaugurée en juin 2018, rassemble près de 600 chercheurs et douze entreprises près de Krasnodar. De cette manière, l'industrie russe espère rattraper son retard et dépasser sa nature centralisée et étatisée en lançant une multitude de projets et d'initiatives, visant autant à moderniser les systèmes conventionnels en les automatisant qu'à développer de nouveaux systèmes intégralement fondés sur l'autonomie. Cette logique incrémentale et industrielle vise à décupler l'efficacité des armements existants afin de parfaire le système de forces. Deux processus interviennent : la digitalisation puis « l'intelligentisation » des systèmes de combat. Le premier consiste à accroître la numérisation des systèmes d'armes existants (mise en données, interconnexion, etc.), tandis que le second repose sur l'introduction des techniques d'IA dans ces systèmes, du fait de leurs capacités à assurer des fonctions « créatives » traditionnellement considérées comme des prérogatives d'opérateurs humains.

Dans le même temps, la Fédération cherche à se doter d'une expertise de haut niveau en automatisation des systèmes. À cette fin, elle a créé un centre national de l'intelligence artificielle militaire qui organise des *wargames* en IA. La Russie ne dispose cependant pas, comme les États-Unis ou la Chine, d'un écosystème entrepreneurial dynamique, pourtant indispensable comme moteur d'innovation. En dépit de l'étatisme marqué de son approche de l'autonomie, la Fédération pâtit donc des mêmes faiblesses structurelles que dans la sphère numérique traditionnelle : manque d'investissements, piètre intégration dans les réseaux scientifiques et normatifs internationaux, forte pression politique sur le secteur industriel privé et dépendance à l'égard des chaînes de valeur technologiques mondiales et fuite des cerveaux[108].

Enfin, les efforts de coopération sino-russe dans la recherche sur l'IA et la robotique participent de la création d'un axe stratégique entre ces deux pays, contestant à l'international la prééminence des puissances occidentales. Les responsables chinois et russes tiennent ainsi à faire

108. J. Nocetti, « Un outsider paradoxal : la Russie dans la course à l'intelligence artificielle », *op. cit.*

connaître leur partenariat stratégique sur les technologies émergentes[109]. Les deux pays ont annoncé que 2020 et 2021 seraient des années clé de coopération en matière d'innovation scientifique et technologique, principalement en biotechnologie, en IA et en robotique[110].

Les effets d'annonces et les investissements dans l'autonomisation s'assortissent donc d'efforts programmatiques et doctrinaux significatifs de la part des trois États étudiés. Pourtant, ils ne permettent pas encore des développements technologiques aussi performants qu'escomptés.

Des développements technologiques dans les quatre milieux

De nombreux États développent des systèmes d'armes de plus en plus automatisés dans les cinq milieux (terre, air, mer, espace, cyber). Les milieux dits « homogènes », notamment aérien et sous-marin, sont particulièrement propices à l'autonomisation des systèmes d'armes : la mobilité y est plus aisée en raison de l'absence d'obstacles significatifs et les risques de dommages collatéraux y sont bien moindres. En revanche, le développement de systèmes autonomes est moins aisé dans les milieux terrestre et maritime de surface, du fait de leur plus grande hétérogénéité. Enfin, le spatial, encore en cours d'intégration pour la plupart des forces armées, est largement inhospitalier pour les systèmes habités et pourrait à ce titre constituer le premier champ principalement investi par des systèmes autonomes. En ce sens, il constitue un vecteur technologique essentiel, dont les avancées peuvent profiter aux autres milieux. Néanmoins, le traité sur les principes régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique empêche en principe d'y déployer des systèmes d'armes, raison pour laquelle ce milieu ne fait pas partie des cas étudiés.

Le nombre de systèmes intégrant de l'autonomie développés à l'échelle mondiale varie significativement selon les milieux : il existe une dizaine de milliers de modèles de drones aériens, quelques milliers pour le maritime (dont plusieurs centaines de modèles sous-marins) et environ un millier pour le terrestre, qui reste le parent pauvre. Sur ces milliers de systèmes, il est estimé que moins d'un sur cinq – pour le milieu terrestre – voire un sur dix parvient à entrer en service et à dépasser le statut de démonstrateur technologique. Sans prétendre à l'exhaustivité des développements à l'œuvre, cette section s'attache à présenter les systèmes les plus avancés en matière d'autonomisation. Il s'avère cependant difficile de faire la part des choses entre les effets d'annonce, surtout venant d'États adeptes des manipulations de l'information comme la Russie, et la réalité opérationnelle

109. M. Konaev *et al.*, « Headline or Trend Line? Evaluating China-Russia Cooperation in AI », Center for Security and Emerging Technologies, août 2021.
110. A. Muravyeva et V. Lemutov, « How Chinese Tech Companies Are Conquering Russia », Carnegie Moscow Center, 11 janvier 2021.

de ces innovations technologiques. En effet, l'autonomie fait l'objet d'une âpre compétition entre puissances, si bien que les projets les plus futuristes sont parfois mis en avant, sans que les briques technologiques ne soient suffisamment matures pour les réaliser. Ces effets d'annonce ou présentations lors de salon sont mobilisés dans la compétition stratégique pour leur dimension réputationnelle, sans nécessairement que les avancées technologiques présentées ne soient suivies de véritables mises en service.

Milieu aérien

Le milieu aérien est sans conteste celui dans lequel les développements technologiques en matière de systèmes automatisés sont les plus avancés. En effet, les opportunités offertes par les *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) ont poussé certains États à investir massivement dans ce secteur, ce qui leur a permis d'acquérir une avance industrielle décisive. La Turquie a par exemple bâti très tôt un programme ambitieux – bien que progressif – d'acquisition de talents et de développement de compétences dédiées, qui l'autorise désormais à produire des systèmes couvrant une large partie du spectre opératif et d'innover dans les usages[111]. Les efforts précoces d'Israël en la matière ont permis à ce pays d'innover et de développer des systèmes nouveaux qui inspirent une partie des efforts menés à l'international. De plus, la Turquie et Israël ont assez tôt collaboré en matière de drones, par exemple lors l'achat de systèmes Héron par Ankara dans le cadre de la coopération militaire établie en 1996[112]. De la même manière qu'Israël a rapidement vu dans les drones un moyen de compenser son infériorité numérique ainsi qu'un outil efficace de contre-insurrection, la Turquie a très vite saisi l'intérêt de ces systèmes dans sa lutte contre les insurrections internes. À ce titre, l'utilisation de drones turcs et israéliens par l'Azerbaïdjan durant le conflit du Haut-Karabagh est emblématique des progrès réalisés par les deux pays, qui proposent d'intéressantes capacités ISR et de frappe, à des coûts raisonnables pour des puissances secondaires[113].

Si Israël et la Turquie sont incontestablement les puissances les plus avancées dans le modèle de substitution partielle de la puissance aérienne habitée par les drones, il n'est pas dit que leur avancement en matière de drones téléopérés donne lieu à un processus d'autonomisation de ces systèmes – qui requiert des investissements considérables et l'acquisition de compétences différentes des seuls domaines aéronautique et électronique. Pour l'heure, il semble que la Turquie travaille avant tout à rendre

111. S. Lefeez, « L'industrie de défense turque : un modèle de développement basé sur une volonté d'autonomie stratégique », *Policy* Paper, IRIS, avril 2017.
112. « La Turquie et Israël relancent leur coopération militaire », *L'Orient – Le Jour*, 17 janvier 2010.
113. O. Cigolotti et M. A. Carlotti, « Haut-Karabagh : dix enseignements d'un conflit qui nous concerne », *Rapport d'information du Sénat*, 7 juillet 2021.

indépendante sa production nationale de drones, plutôt qu'à rendre autonomes les drones eux-mêmes[114].

Forts de l'expérience significative tirée des drones téléopérés, les États-Unis, la Chine et la Russie s'engagent en revanche dans l'autonomisation des systèmes d'armes aériens. L'autonomie est particulièrement attractive dans ce milieu, du fait des vulnérabilités liées par exemple à la coupure des communications dans le cadre d'opérations aériennes d'entrée en premier ou face à des stratégies A2/AD.

États-Unis

Les États-Unis disposent d'environ 400 drones à moyenne altitude et à longue endurance (MALE) armés *MQ-9 Reaper* (US Air Force) et *MQ-1C Gray Eagle* (US Army) mais ces systèmes restent largement téléopérés. Dans les années à venir, les drones *Reaper* devraient être adaptés aux environnements contestés avec la nacelle *Agile Condor*, qui dispose d'algorithmes lui permettant de poursuivre sa mission même en cas de rupture de transmissions et de GPS, grâce à une plus grande puissance de calcul.

L'Air Force entend se doter d'une nouvelle génération de drones de combat plus furtifs, plus autonomisés mais aussi de coût réduit, en mesure d'opérer en équipe (*loyal wingman* – ailier robotisé destiné à soutenir et protéger son leader) avec ses plateformes habitées – F-15, F-35, *Next Generation Air Dominance*, voire bombardier B-21 – face aux capacités A2/AD adverses. En ce qui concerne les systèmes proprement dits, les drones seront probablement issus des appareils développés par Kratos (drones tactiques *XQ-58 Valkyrie*, *UTAP-22 Mako*, etc.), General Atomics ou Boeing (*Airpower Teaming System*, ATS) ainsi que des mini-drones de Dynetics (*X-61 Gremlins*) comme effecteurs déportés. Ces systèmes *low cost* sont expérimentés dans le cadre du programme *Skyborg*, l'une des trois priorités de R&D et d'expérimentations de l'Air Force (les programmes *Vanguard*). La panoplie de plateformes et de charges utiles adoptée dépendra du concept d'emploi précis, qui n'est pas encore arrêté. Plus important encore, le projet *Skyborg* vise à développer un module de pilotage autonome de l'ensemble des fonctions de ces drones, l'*Autonomous Core System* (ACS), adaptable à tous ces systèmes. Le *service* espère passer le *Skyborg ACS* au stade de programme d'armement en 2023, si les budgets le permettent[115].

Golden Horde, un autre programme *Vanguard* concerne quant à lui l'autonomisation des munitions de précision, dans la lignée des réflexions sur le concept de *Networked Collaborative and Autonomous (NCA) weapons*. Il s'agit de conférer à ces munitions la capacité de mener des

114. E. Bouvier, « Turquie. L'industrie de l'armement à marche forcée vers l'autonomie », *Orient XXL*, 28 octobre 2021.
115. J. A. Tirpak, « Contracts Advance Skyborg Toward Becoming Program of Record on Time », *Air Force Magazine*, 16 août 2021 ; V. Insinna, « Here's What We Know about the Classified Drones the Air Force Wants to Buy in FY23 », *Breaking Defense*, 23 décembre 2021.

attaques complexes en essaim semi-autonome selon un schéma tactique (et des règles d'engagement) présélectionné par l'opérateur. Le succès réalisé en moins d'un an avec les nouvelles bombes *GBU-53 Stormbreaker* amène à l'ouverture du dispositif d'expérimentation à de multiples autres compétiteurs, grâce au concours de la DIU[116].

Enfin, l'Army s'affirme comme un opérateur et développeur à part entière de systèmes de drones aériens intégrant de plus en plus de fonctions autonomes. Les unités de l'Army Aviation pratiquent depuis environ 15 ans le *manned-unmanned teaming* (MUM-T) entre les hélicoptères *Apache* et les drones tactiques *Shadow RQ-7* et *MQ-1C Gray Eagle*. Dans le cadre de la refonte de son aviation légère (*Future Vertical Lift*), elle planifie la mise en œuvre par ses futures plateformes à voilure tournante – notamment le *Future Attack Reconnaissance Aircraft* – d'une famille de mini-drones, les *Air Launched Effects* (ALE) en mesure d'opérer à des distances d'au moins 350 kilomètres pour la catégorie la plus lourde, pour exercer des missions ISR mais aussi de guerre électronique (brouillage et leurrage afin de « simuler » les radars adverses) et de frappe létale.

Chine

Dans le domaine aérien, les drones armés et les essaims de drones font l'objet de nombreux efforts de développement et d'expérimentations de la part de la Chine. Ainsi, c'est en Chine que sont fabriqués les drones armés *Rainbow* et *Wing Loong*, les modèles les plus exportés au monde avec le *Reaper* américain. La China Aerospace Science and Technology Corporation (CASC) a également conçu le *CH-6*, un drone HALE (haute altitude longue endurance) de près de 8 tonnes destiné aux missions de reconnaissance et d'attaque grâce à une capacité d'emport de près de 500 kg à 15 km d'altitude. En matière d'essaims de drones chinois, peuvent également être cités le *150B Golden Eagle* produit par China North Industries Group et le *FH-97* de la CASC, supposément capable de déployer des essaims de drones depuis sa soute ventrale tout en menant des missions ISR ou d'attaque.

Présentés lors de la dernière biennale du Zhuhai Airshow, plusieurs systèmes aériens ont été mis en avant comme des avancées chinoises en matière d'autonomisation, tous produits par AVIC. Le HALE *WZ-7* est ainsi annoncé comme une évolution largement automatisée du *Wing Loong*, avec une meilleure capacité à s'intégrer au trafic commercial. Le *WZ-8* est constitué d'une aile volante dotée de moteur-fusée et d'un profil plus furtif. Il est destiné à remplir des missions de reconnaissance à des vitesses supersoniques en milieux contestés. Enfin, l'aile volante *GJ-11* a été exposée à l'état de maquette, avec un profil largement furtif destiné à des missions de frappe[117].

116. C. Sprague, « AFRL, Defense Innovation Unit Launch New Phase of Golden Horde Vanguard Program », *Air Force Research Laboratory*, 15 septembre 2021.
117. M. Yeo, « Chinese Airshow Offers Glimpse at Military's New Drones », *Defense News*, 30 octobre 2021.

Lors de l'exposition sur les systèmes sans pilote (UMEX) à Abou Dhabi du 21 au 23 février 2022, plusieurs entreprises de la défense chinoises ont présenté leurs derniers systèmes aériens. Parmi eux, NORINCO a proposé une démonstration du drone *BZK-005E* et de l'hélicoptère sans pilote *Golden Eagle CR500A*. Le stand de la China National Aero-Technology Import-Export Corporation (CATIC) comprenait quant à lui l'hélicoptère sans pilote *U8EA*. La *Shenzhen Smart Drone UAV* (SMD) a enfin exposé son drone à voilure fixe hybride gaz-électricité *V480*, connu sous le nom de *Thunderbird*[118].

Selon le site internet de son fabricant, le *Thunderbird-V480* est un drone à décollage et atterrissage verticaux (ADAV) qui peut être utilisé pour la surveillance, la reconnaissance et fonctionner en mode « entièrement autonome ». Son usage actuel inclut principalement des applications civiles, telles que la photogrammétrie aérienne, la surveillance et l'évaluation des catastrophes, la surveillance des événements d'urgence et la prévention des incendies forestiers et urbains.

Le *BZK-005E* est un drone multirôle (UAV MALE) qui dispose d'un système de contrôle de vol hautement autonomisé et qui est capable d'effectuer des opérations sur le plateau, l'océan et le désert. La plateforme de l'UAV est largement intégrée : elle peut réaliser la fonction de radar SAR, EO, communication et reconnaissance radar, et relais de communication. L'autonomie de l'UAV est de plus de 40 heures avec un plafond de 7 500-8 000 mètres, un poids maximum au décollage de 1 500 kg, une charge utile maximale de 370 kg et une vitesse de croisière qui varie entre 130 et 180 km/h. Sa conception modulaire permet le remplacement rapide de différentes charges utiles. Le premier drone *BZK-005E* a été assemblé à Taizhou, dans la province du Zhejiang, le 13 novembre 2017. Tous les tests en vol ont été effectués avec succès jusqu'à présent[119].

Le *CR500 Golden Eagle* est quant à lui un drone hélicoptère conçu pour de multiples missions, notamment la reconnaissance du champ de bataille, le positionnement et l'éclairage de cibles, le relais de communication et l'évaluation des dommages au combat. Selon un expert militaire, il peut faire partie d'un système intégré en fonctionnant avec des chars, des véhicules de combat d'infanterie et des artilleries automotrices. En conséquence, le drone élargira considérablement la connaissance et l'appréciation de la situation des soldats en leur permettant de savoir où se trouvent les ennemis et en les guidant pour attaquer. Équipé d'armes telles que des mitrailleuses et des missiles antichars, le drone hélicoptère pourrait également mener des missions de reconnaissance armée[120]. Les pylônes bilatéraux du drone peuvent transporter jusqu'à 8 missiles air-sol *Blue Sword 9*, lui procurant ainsi une puissance de feu équivalente à celle d'un hélicoptère armé. Il pèse

118. Center for Naval Analyses (CNA), *The China AI and Autonomy Report, Issue 10*, 2022.
119. « BZK-005E UAV multirôle à moyenne altitude et longue endurance », *China Military Drone Alliance*, disponible sur : https://fr.militarydrones.org.cn.
120. L. Xuanzun, « Chinese Arms Firm Ready to Deliver Indigenous Helicopter Drones », *Global Times*, 29 novembre 2020, disponible sur : www.globaltimes.cn.

500 kg, a une altitude de vol de 4 000 m, une vitesse maximale de 140 km/h et une autonomie de 5 heures. Pour le combat, le *CR500 Golden Eagle* peut transporter 150 kg d'armement, a un rayon de combat de 150 km et peut décoller et atterrir de manière autonome dans des conditions de vent à six niveaux. Il peut également être connecté à la liaison de données pour la mise en réseau, ce qui convient parfaitement aux nouvelles tactiques « en essaim[121] ».

Enfin, il est possible d'identifier le drone *Blowfish A2* du fabricant Ziyan, dont il affirme qu'il peut transporter une mitrailleuse, voler indépendamment en groupe sans opérateur humain et « d'engager la cible de manière autonome[122] ». Il s'agit d'un hélicoptère sans pilote polyvalent avec une capacité de levage de 15 kg et une conception de cabine de charge utile ouverte, permettant au système d'être équipé d'une grande variété d'équipements tels que des caméras EO/IR, des scanners LiDAR et des systèmes d'armes. Avec une résistance au vent élevée et la capacité de décoller et d'atterrir dans un très petit espace, le *Blowfish A2* est une plateforme ISR maritime idéale. Il peut être équipé d'un émetteur-récepteur AIS (identification automatique des navires) et a une zone de couverture plus large que les patrouilleurs. L'avion prend également en charge les liaisons vidéo HD longue portée et les modules de communication 4G pour la transmission d'images en temps réel[123].

Russie

Si la Fédération de Russie compte principalement sur *les Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) pour rattraper son retard en matière de capacités ISR, elle cherche également à se doter de drones de combat intégrant davantage d'autonomie. Ainsi, le drone de combat russe *S-70 Okhotnik* (chasseur), encore à l'état de prototype, serait capable d'étendre la portée radar et l'acquisition de cible du *Su-57 Felon*, dont 76 exemplaires ont été commandés par le ministère russe de la Défense. Il pourrait également effectuer des frappes dans des milieux fortement contestés, grâce à sa furtivité et sa capacité à emporter jusqu'à 2,8 tonnes de munitions.

De plus, une source industrielle a confié à l'agence Tass que le *S-70* se verrait confier d'autres missions : « selon le concept d'utilisation proposé par le ministère, l'*Okhotnik*, avec ses armes à longue portée, sera utilisé pour intercepter des avions ennemis. C'est-à-dire qu'il attaquera des cibles aériennes avant qu'elles ne s'approchent de la zone aérienne à défendre ». En outre, le drone devrait aussi être en mesure d'effectuer des missions de combat en mode autonome : « il est prévu qu'il ait aussi un mode de

121. « Chinese Drone "Golden Eagle" Comes Out, with 8 Missiles Comparable to Wuzhi, Can Be Used for Swarm Tactics », *iNews*, 3 mars 2022, disponible sur : https://inf.news.
122. M. K. Chan, « China and the U.S Are Fighting a Major Battle Over Killer Robots and the Future of AI », *op. cit.*
123. M. Ball, « Ziyan Develops High-Performance Electric Unmanned Helicopters & Avionics », *Unmanned Systems Technology*, 26 novembre 2020, disponible sur : www.unmannedsystemstechnology.com.

fonctionnement entièrement autonome et qu'il soit capable de rechercher certains types de cibles, d'en rendre compte et d'attaquer[124] ». Si son degré d'autonomisation reste sujet à caution, la production en série n'étant pas prévue avant 2024, les missions envisagées, en particulier la pénétration en milieu contesté, laissent supposer qu'il sera doté d'une automatisation très poussée pour poursuivre la mission même lorsque le spectre électromagnétique est contesté.

Soukhoï et l'armée de l'Air russe ont également fait des annonces sur la « dronisation » des chasseurs *Su-35* et *Su-57* (PAK-FA), grâce à l'utilisation poussée de techniques d'IA et de l'automatisation dans les systèmes de bord – notamment en matière d'acquisition de l'information et de combat afin d'alléger la tâche du pilote. Un prototype du *Su-57* a été testé dans une version sans pilote par le constructeur, mais l'armée de l'Air russe ne semble pas avoir manifesté d'intérêt particulier pour un système déjà coûteux dans sa version conventionnelle. Il semble néanmoins qu'une version soit effectivement destinée à mettre en œuvre le *S-70* comme effecteur déporté ou *loyal wingman*[125]. En effet, l'ambition affichée est que le pilote du *Su-57* ne soit pas distrait par le contrôle direct du drone, ce qui nécessite que l'*Okhotnik* maintienne seul la formation pendant les manœuvres, qu'il réponde automatiquement aux menaces et qu'il choisisse la direction optimale de l'attaque. Selon Evgeny Frolov, un pilote d'essai militaire, le pilote du *Su-57* n'a pas besoin de dire quoi que ce soit pour donner l'ordre au drone : le *Su-57* détermine qui doit engager quelle cible et l'*Okhotnik* est censé frapper avec les informations dérivées de l'avion[126].

Dans la même veine, le drone *Grom* (tonnerre) de Kronstadt pourrait être utilisé comme *loyal wingman* et remplir des missions de frappe et de surveillance. D'après les annonces, il serait capable de déployer et contrôler un essaim d'une dizaine de drones plus petits, par exemple de type *Molnya* (éclair) – une capacité dont le *S-70* ne semble pas bénéficier. D'après le constructeur, ces drones sont dotés d'un bon degré d'autonomie au sein de l'essaim tout en restant continuellement en contact les uns avec les autres. Dévoilés en 2020, aucune date d'entrée en production n'a été annoncée pour le moment.

L'industrie russe s'est également lancée dans les munitions rôdeuses, notamment avec les *KYB* et les *Lancet* de Zala Aero, capables d'engager une cible grâce à la reconnaissance automatique d'image. Extrêmement médiatisées lors du conflit au Haut-Karabakh à l'automne 2020, les munitions rôdeuses peuvent intégrer un niveau élevé d'autonomie – en fonction de leur sophistication. Une munition rôdeuse est un type de drone aérien « kamikaze » doté d'un certain niveau d'autonomie lui permettant

124. L. Lagneau, « Le drone de combat russe Su-70 "Okhotnik" pourrait être utilisé comme intercepteur de longue portée », *Opex360*, 5 septembre 2020.
125. J. Edmonds *et al.*, « Artifical Intelligence and Autonomy in Russia », *Center for Naval Analyses*, mai 2021.
126. *Ibid.*

d'identifier une cible sur un secteur donné, sur laquelle il se jette afin de la détruire. Alors qu'un drone conventionnel emporte une charge utile largable à cette fin, une munition rôdeuse s'appuie sur l'énergie cinétique ou sur une charge explosive intégrée à sa structure pour causer des dégâts.

Milieu terrestre

La mobilité constitue l'une des principales difficultés pour les systèmes d'armes automatisés terrestres, du fait des variations de terrain et de la diversité des obstacles rencontrés[127]. L'autonomie décisionnelle pose également problème, dans la mesure où l'environnement terrestre est extrêmement complexe. Les combats terrestres tendent aujourd'hui à se tenir dans des zones denses et habitées, où les civils côtoient les combattants, ce qui pose la question de l'accès au réseau en espace compartimenté. L'emploi de tactiques non linéaires complexifie encore la lecture de la situation pour des systèmes automatisés peinant à s'adapter à des situations nouvelles. Cette « rugosité » n'empêche pas de voir émerger des projets ambitieux, notamment en ce qui concerne les véhicules sans pilote. Ainsi, au Royaume-Uni, BAE Systems travaille depuis plusieurs années sur un concept de char du futur constitué d'un véhicule de combat automatisé (*Ironclad*) soutenu par des petits véhicules aériens et terrestres autonomes.

Russie

Parmi les différents programmes initiés par la Russie, la plateforme *Marker*, développée par la Fondation pour la recherche avancée et le Centre national pour le développement de la technologie robotique est sans doute le plus emblématique. Ce véhicule chenillé pouvant emporter mitrailleuse et missiles anti-char de taille moyenne fonctionne en mode *follow the leader* et est équipé de petits drones « kamikazes ». En d'autres termes, c'est un petit char qui suit le fantassin et reproduit l'usage que celui-ci fait du feu : s'il tire, le robot tire vers la même cible. Les vidéos de démonstration affichent également la possibilité pour l'infanterie de lui désigner une cible en pointant leur propre arme, ce qui ouvre de nouvelles possibilités de coopération homme-machine sur le terrain. Selon les informations recueillies par les rapporteurs de la mission d'information sur les systèmes d'armes létaux autonomes de l'Assemblée nationale, il aurait été testé en Syrie dans des opérations de lutte contre des poches de l'État islamique. En ce sens, le *Marker* est emblématique de la logique incrémentale russe, fondée sur des initiatives techniques et industrielles : c'est un prototype « intégrateur » de nouvelles capacités.

Sergueï Choïgou, le ministre de la Défense russe, a annoncé en avril 2021 la création d'une unité de combat entièrement robotisée, constituée de cinq complexes robotiques *Uran-9*, soit une vingtaine de véhicules terrestres

127. Entretien avec un expert « intelligence artificielle et systèmes automatisés » de Nexter.

sans pilote[128]. Les systèmes *Uran-6*, *9* et *14* couvrent respectivement les opérations de déminage, de combat d'infanterie et de génie ou d'extinction d'incendie. S'ils restent globalement téléopérés, ces robots de combat disposeraient également d'un mode autonome. Par exemple l'*Uran-9*, conçu pour des missions de reconnaissance, d'appui-feu et de destruction, serait capable d'évoluer en mode autonome ou d'être téléopéré jusqu'à 3 km de distance par radio. Il est équipé de missiles antichars *Ataka* (*AT-9*), du lance-flammes à roquette *Shmel-M*, d'un canon de 30 millimètres (mm) et d'une mitrailleuse de 7,62 mm[129].

Testé au combat en Syrie, l'*Uran-9* a affiché des résultats mitigés. Si l'industrie russe s'est targuée de résultats conformes aux attentes, d'autres sources ont pointé des défaillances techniques ainsi qu'un rayon d'action trop faible, l'engin pouvant difficilement s'éloigner de plus de 500 m de son opérateur. À cet égard, ce retour d'expérience pourrait pousser Rostec et Kalashnikov à rendre l'*Uran-9* encore plus autonome, plutôt que d'améliorer le système de communication sur ce véhicule déjà lourd. Le déploiement de la gamme *Uran*, sans être un succès opérationnel, témoigne donc de la volonté de la Russie d'avancer à marche forcée dans le domaine de la robotisation du champ de bataille.

Dans la même veine, une version expérimentale sans pilote du char *T-14 Armata* serait en cours de développement, sans qu'on sache s'il sera téléopéré ou s'il disposera d'un système de pilotage automatique. Celui-ci constitue un parfait support de développement de nouvelles technologies, notamment en ce qui concerne l'automatisation poussée des systèmes terrestres. Uralvagonzavod, qui a développé le véhicule, a récemment annoncé avoir testé une version sans équipage, très largement automatisée[130]. De fait, cette évolution s'est avérée relativement aisée, puisque la tourelle elle-même est déjà intégralement automatisée. Cinq ans après sa présentation au grand public, le *T-14 Armata* demeure aujourd'hui en phase de test et sa production en série n'est pas programmée avant 2022, voire 2023. D'ailleurs, il ne semble pas que la Russie ait l'intention de se doter de la version sans pilote de ce nouveau char, qu'elle a commandé dans sa version classique en 500 exemplaires. Il n'en demeure pas moins que le *T-14 Armata* constitue une base intéressante pour bâtir de futurs systèmes intégrant davantage d'autonomie.

L'entreprise Kalachnikov a quant à elle développé une tourelle sentinelle automatisée capable d'identifier et d'ouvrir le feu d'elle-même, très semblable au *SGR-A1* utilisé par la Corée du Sud dans la zone démilitarisée intercoréenne. Présenté en 2017, ce système russe semble lui aussi pouvoir

128. L. Lagneau, « Le ministère russe de la Défense annonce la création d'une unité entièrement robotisée », *Zone militaire,* 12 avril 2021, disponible sur : www.opex360.com.
129. *Ibid.*
130. P. Suciu, « Is Russia Developing an Unmanned Armada T-14 Tank? », *National Interest*, 24 août 2020.

emporter une grande variété d'armements létaux et non létaux[131]. En l'absence de sources fiables depuis 2017, il est toutefois difficile d'affirmer que les forces armées russes ont acheté ou déployé ces tourelles autonomes, ou même que son développement a été poursuivi.

États-Unis

L'usage de systèmes autonomes par les forces terrestres américaines semble encore limité en comparaison des efforts réalisés par l'Air Force. Ainsi, l'Army et les Marines utilisent essentiellement des drones aériens de petits et moyens gabarit, pour des missions ISR. L'Army a néanmoins d'ambitieux projets, réunis dans sa stratégie de *Robotic and Autonomous System* (RAS). Pas moins de 22 programmes de drones aériens et terrestres sont poursuivis, dont six sont déjà en production.

La première étape, en cours, est de mettre en service des petits robots de renseignement et de protection et des fardiers déchargeant les combattants débarqués. Par exemple le *Centaur UGV*, qui équipe toutes les branches des forces armées américaines, est un petit drone chenillé hautement modulable et qui peut remplir des missions de fret, de patrouille ou de déminage. Il permet ainsi l'intégration progressive et à un prix modique des *Unmanned Ground Vehicles* (UGV) dans les différents services, qui pourraient, à terme, se passer de téléopération.

L'effort principal porte néanmoins sur le développement à moyen terme de la famille des futurs *Robotic Combat Vehicle* (RCV), un programme d'UGV qui doit notamment contribuer à renouveler la flotte de véhicules de combat terrestre, seconde priorité de la stratégie capacitaire américaine. Il existe trois types de RCV : RCV *Light* (moins de 7 tonnes) « attritable » d'accompagnement de l'infanterie, RCV *Medium* de plus de 10 tonnes, pour mener des opérations ISR et de combat, considéré comme « durable » et RCV *Heavy*, de 20 à 30 tonnes, qui doit remplacer le char *Abrams*. Le *Ripsaw M5*, développé par Textron au terme d'un effort entrepris depuis le début des années 2000, est le principal candidat pour la fonction de RCV *Medium*. Cette plateforme chenillée électrique est destinée à déployer un armement relativement lourd, similaire à celui emporté par un char léger. L'approche de l'Army pour le contrôle de ces systèmes réside cependant dans une semi-autonomie de type « *man on the loop* » plutôt que dans une autonomie totale. Les décisions programmatiques, découlant des multiples expérimentations, doivent être prises en 2023[132].

131. « Kalashnikov Gunmaker Develops Combat Module Based on Artificial Intelligence », *Tass*, 5 juillet 2017, disponible sur : https://tass.com.
132. S.J. Freedberg Jr., « Meet The Army's Future Family Of Robot Tanks: RCV », *Breaking Defense*, 9 novembre 2020.

Chine

La Chine n'est pas à la traîne dans le domaine des systèmes automatisés terrestres. Avec l'appui de l'entreprise China North Industries Group Corporation (NORINCO), elle a développé les robots *Sharp Claw* 1 et 2. Le *Sharp Claw* 1, qui a été dévoilé pour la première fois lors de l'exposition *Airshow China* 2014 à Zhuhai, est un robot terrestre de 120 kg, 60 centimètres de haut et 70 centimètres de long, qui jouit d'une portée opérationnelle de 1 km[133].

La plateforme a été conçue pour être utilisée dans des zones reculées et attaquer des cibles « dans toutes les conditions météorologiques de jour comme de nuit », selon le fabricant. Toujours d'après NORINCO, le *Sharp Claw* 1 peut également se déplacer de manière autonome et être armé d'une mitrailleuse légère de 7,62 mm téléopérée. Aucune information n'a cependant été fournie quant à la date exacte de son entrée en service, le nombre de plateformes en cours d'acquisition ou les unités qui le déploieront.

Le *Sharp Claw 2* est quant à lui une plateforme 6 x 6 de taille moyenne pourvue d'armes ou de capteurs destinés à appuyer l'infanterie mécanisée. Sa plateforme arrière pourrait même être utilisée pour déployer de plus petits systèmes chenillés automatisés comme le *Sharp Claw 1*. Si son niveau d'autonomisation n'est pas connu, le *Sharp Claw 2* est supposé mener des missions « de manière autonome ». Son entrée en service au sein de l'Armée populaire de libération (APL) a été annoncée en 2020[134].

Milieu maritime de surface

Les inventaires des flottes de surface ne sont pas exempts de projets de systèmes d'armes intégrant de l'autonomie. Néanmoins, les drones maritimes posent des difficultés normatives, en raison de l'absence de cadre juridique spécifique à ces systèmes. C'est pourquoi la France s'est dotée à l'automne 2020 d'une ordonnance en la matière.

États-Unis

Les États-Unis développent depuis plusieurs années des systèmes autonomes de surface *(Unmanned Surface Vehicle,* USV*)* de différentes catégories.

Les *Medium USV* (MUSV) sont les plus matures technologiquement. Ils auraient vocation à opérer au sein du groupe de combat avant tout comme plateforme ISR, de GE (leurrage), de lutte ASM ou de guerre des mines. Le *Sea Hunter* en représente le principal projet expérimental. Il s'agit d'un navire autonome transocéanique de 40 m, capable de naviguer dans les eaux internationales en s'adaptant de manière autonome aux règles de navigation

133. J. Ju, « Norinco's Sharp Claw I UGV in Service with Chinese Army », *Janes*, 15 avril 2020, disponible sur : www.janes.com.
134. P. Suciu, « China's Army Now Has Killer Robots: Meet the "Sharp Claw" », National Interest, 17 avril 2020.

en vigueur. Ce navire a effectué en 2019 un premier trajet de 4 500 km entre Hawaï et San Diego, sur la côte ouest[135]. Il est utilisé comme plateforme de test pour l'intégration de différentes technologies liées à l'autonomie en matière de navigation et d'utilisation des capteurs. Un contrat a été attribué à L3Harris en juillet 2020 pour la fabrication d'un prototype à réaliser fin 2022 (à hauteur de 35 millions de dollars), avec une option pour huit autres systèmes (pour un montant total de 280 millions de dollars)[136].

Les *Large USV* (LUSV), de la dimension d'une corvette (1 000-2 000 tonnes), opéreraient quant à eux de façon plus autonome, à distance des groupes de combat, comme navires arsenaux déportés. Le Pentagone développe et expérimente leurs concepts et technologies dans le cadre du programme *Overlord* qui utilise une flottille de navires de ravitaillement reconvertis comme prototypes. L'un d'eux, le *Ranger*, a effectué en 2021 un tir de missile surface-air *SM-6*[137]. Ces LUSV pourraient embarquer de 16 à 32 missiles antiaériens et antimissiles, antinavires et d'attaque contre la terre. Les réelles expérimentations opérationnelles (au sein de la flotte) commenceront en 2022[138]. La nouvelle structure de force de la Navy, retravaillée par l'administration Biden, envisage de se doter d'ici 20 ans de 59 à 89 de ces LUSV/MUSV.

Plus petite, la gamme de drone *Mantas* (*T-24*, *T-38* et *T-48*) vise à fournir à la Navy des plateformes autonomisées de différentes tailles, capables d'accomplir des missions variées grâce à une conception modulable. Le *T-38* est testé par la Navy depuis décembre 2021 et affiche un profil vraisemblablement dédié à la vitesse, apparemment destiné à des missions de fret. D'apparence plus réduite, le *T-24* pourrait à terme disposer d'armes légères.

Chine

La Chine ne cache pas son ambition de recourir à des systèmes robotisés pour assurer la couverture et le contrôle des océans. En 2021, la société chinoise Yunzhou Tech a ainsi présenté une nouvelle gamme de drones de surface (présentés comme non armés), destinés à opérer en essaim en « assiégeant et expulsant » (*Besiege & Expel*, B&E) les navires étrangers des eaux territoriales chinoises, avec un minimum de supervision humaine grâce à une autonomie supposément poussée jusqu'à la prise de décision. L'effet recherché est de permettre à l'essaim de s'engager dans une « confrontation coopérative », à partir de décisions autonomes sans aucune intervention humaine, avec des bâtiments de surface. Leurs fonctionnalités sont

135. F.S. Gady, « US Navy's Anti-Submarine Drone Ship Sailed Autonomously from San Diego to Hawaii and Back », *The Diplomat*, 6 février 2019.
136. R. O'Rourke, *Navy Large Unmanned Surface and Undersea Vehicles: Background and Issues for Congress*, CRS Report, 20 october 2021.
137. T. Rogoway, « This "Ghost Fleet" Ship Firing An SM-6 Missile from A Modular Launcher Is A Glimpse of the Future », *The War Zone*, 3 septembre 2021, disponible sur : www.thedrive.com.
138. P. Ong, « Op-Ed: What Future Armament and Role Options for The U.S. Navy's LUSV? Part 1: LUSV as a Deep Strike Platform », *Naval News*, 24 octobre 2021, disponible sur : www.navalnews.com.

tripartites : 1) partager les données des capteurs ; 2) suivre les navires cibles à grande vitesse ; et 3) et effectuer des interceptions. Yunzhou Tech conçoit depuis plusieurs années un logiciel de coordination d'essaims de drones à des fins civiles et a établi un record mondial du plus grand essaim (56 bateaux) en 2018. Le nouveau mode « confrontation » est toujours en cours de développement[139].

En outre, la marine chinoise dispose du navire de surface sans équipage (USV) *JARI*, dont le prototype a été lancé en 2019 et les essais en mer ont été réalisés en janvier 2020. Long de 50 pieds, le *JARI* est dépeint comme un mini-destroyer en raison de son armement ambitieux – voire irréaliste – et de l'ajustement de ses capteurs. Doté d'un poste d'armes télécommandé (RWS), il est destiné à être armé d'un petit système de lancement vertical (VLS) pour missiles sol-air et de deux tubes lance-torpilles légers. Les capteurs comprennent des radars multi-éléments, des dispositifs électro-optiques et des sonars. D'après des images satellites, l'Institut naval des États-Unis (USNI) suppose que la marine chinoise teste ses USV dans une jetée près de Dalian et y développe actuellement un nouvel engin. Ce dernier aurait une forme globalement similaire au *JARI*, excepté sa taille beaucoup plus importante (70 pieds), et pourrait avoir une mission simplifiée avec un ensemble d'armes plus restreint. Par exemple, il n'est pas clair s'il dispose d'un canon, car le pont avant semble dégagé – ce qui refléterait potentiellement une maturation des idées chinoises, les USV devenant plus étroitement alignés sur un concept d'opérations réaliste. Quoi qu'il en soit, ces nouveaux navires observés n'ont pas encore été révélés publiquement, suggérant ainsi qu'il s'agit des principaux projets USV de la marine chinoise destinés à un usage domestique[140].

Milieu sous-marin

Dans le milieu sous-marin, pilotage à distance et transmission d'informations sont bien plus compliqués qu'en surface. La grande difficulté physique, liée à la propagation des seules ondes longues, de maintenir les liaisons de communication dans les grandes profondeurs y rend l'autonomisation des systèmes d'armes particulièrement attractive. Cependant, ce milieu présente d'importantes contraintes notamment en termes d'autonomie énergétique, ce qui complique la mise au point de systèmes crédibles. Les principales missions dévolues à ces *Unmanned Undersurface Vehicles* (UUV) sont actuellement la connaissance de l'environnement opérationnel, dont le besoin reste absolument déterminant, et la guerre des mines. Des perspectives d'avenir existent également dans le champ de l'ISR plus persistant et la lutte anti-sous-marine voire antisurface.

139. « Chinese Firm Develops Swarming Drones to "Besiege and Expel" Vessels », *The Maritime Executive*, 29 novembre 2021.
140. H. I. Sutton, « Chinese Testing Experimental Armed Drone Ships at Secret Naval Base », *USNI News*, 11 ocotbre 2021, disponible sur : https://news.usni.org.

Russie

La Russie est très avancée dans le domaine des systèmes sous-marins. Le *Klavsin 2P-2M*, par exemple, est un drone sous-marin déployable par un navire de surface comme par un autre submersible. Il est destiné à remplir des missions ISR, puisqu'il est doté d'un système de navigation autonome capable de l'emmener avec une supervision minimale « jusqu'à 6 000 m » d'après son fabricant[141].

Parfois présentée comme un drone sous-marin, la torpille à tête et propulsion nucléaire *Poseidon* annoncée en 2018 pourrait, selon les sources, équiper la marine russe à hauteur d'une trentaine d'exemplaires d'ici 2027. Les capacités et caractéristiques annoncées doivent être prises avec la précaution qui s'impose, tant certaines estimations paraissent exagérées en comparaison systèmes existants. Il est ainsi avancé que le *Poseidon*, long d'une vingtaine de mètres, pourrait utiliser la super-cavitation pour atteindre une vitesse de pointe « jusqu'à 200 nœuds », et emporter une charge nucléaire « entre 2 et 100 mégatonnes » sur une distance de 10 000 km. L'autonomisation pourrait concerner essentiellement la gestion du déplacement : une fois activé, le système se déplacerait à vitesse réduite pour préserver sa furtivité vers sa cible sur des distances plus ou moins longues, puis accélérerait considérablement sur la dernière ligne droite pour détoner au plus près de la cible. Ces caractéristiques sont régulièrement mises en doute par différents experts, mais elles feraient du *Poseidon* un système quasiment indétectable et très difficile à intercepter, induisant une possible rupture de l'équilibre des forces. Or les sous-marins de classe *Oscar Belgorod* et *Khabarovsk* ont vraisemblablement été modifiés pour emporter entre 4 et 6 *Poseidon*, tandis que des tests ont été menés depuis des navires brise-glace dans l'Arctique[142].

Ce système se distinguerait donc d'une torpille classique par un niveau élevé d'autonomisation, la *Nuclear Posture Review* de 2018, évoquant une « torpille sous-marine autonome intercontinentale, à armement et propulsion nucléaire[143] ». Dans cette perspective, le *Poseidon* devrait disposer d'un haut niveau d'autonomie, lui permettant d'être déployé dans des modules statiques posés sur le fond marin, prêt à tirer[144].

Chine

Présenté à l'occasion de la parade des 70 ans de la RPC, le sous-marin « autonome » *HSU 001*, de relativement petite taille, a pour objectif de mailler les océans. Peu de données sont disponibles à son sujet, mais les

141. « Russian UUV Klavesin-2R-PM to Be Tested in the Far East », *Navy Recognition*, 7 septembre 2021, disponible sur : www.navyrecognition.com.
142. T. Nilsen, « Military Research Ship Returns after Months on Secret Arctic mission », *The Barents Observer*, 30 septembre 2020.
143. Office of the Secretary of Defense, *Nuclear Posture Review*, février 2018, p. 9.
144. P. Lévy et E. Maitre, « Poseidon : élément accessoire ou décisif pour la dissuasion russe ? », *Bulletin n° 64 de l'Observatoire de la Dissuasion*, Fondation pour la Recherche Stratégique, avril 2019.

éléments apparents et sa taille laissent imaginer un drone de patrouille de moyenne et longue portée doté d'un sonar et de périscopes rétractables[145].

Dans la même veine, le drone sous-marin *Haijing*, révélé en 2020, doit accomplir des missions de reconnaissance et de patrouille à longue portée. Pesant environ 200 kg, il est supposé atteindre 1 500 m de profondeur à grande vitesse. Shenyang, son constructeur, affirme également l'avoir doté de techniques d'IA lui permettant d'optimiser ses déplacements et la gestion de son énergie[146].

Selon des chercheurs chinois en IA, la RPC est en train de mettre au point des UUV de grande taille, « intelligents » et relativement peu coûteux, capables de parcourir les océans du monde entier pour accomplir un large éventail de missions (de la reconnaissance au placement de mines, voire à des attaques suicides contre des navires ennemis). Ces XLUUV ne sont pas destinés à remplacer complètement les sous-marins conventionnels – c'est-à-dire habités – et ne prendront pas de décisions d'attaque entièrement autonomes pour l'instant. Néanmoins, leur taille est assez importante pour transporter des équipements de surveillance ainsi que des missiles et des torpilles ce qui témoigne d'une anticipation à des conflits armés sous-marins. L'IA facilitera grandement la prise de décision des drones dans cet environnement complexe[147].

États-Unis

Les États-Unis disposent, en matière d'UUV, d'une feuille de route aussi significative que pour les drones de surface. Elle met déjà en œuvre toute une série d'UUV destinés principalement à la lutte antimine et à la connaissance de l'environnement sous-marin : des *Small UUV Swordfish* ; des *Medium UUV* de la dimension d'une torpille comme le *Kingfish*, le *Knifefish* puis le *Razorback* de différents incréments. Une nouvelle génération de ces systèmes est en cours de développement et ils seront rejoints à moyen-long terme par des *Large Displacement UUV* de type *Snakehead* mis en œuvre eux aussi par les sous-marins, mais d'une capacité d'emport et d'une autonomie beaucoup plus élevée, pour les missions de préparation de l'environnement opérationnel et d'ISR.

Enfin, la Navy poursuit le développement des technologies et du concept d'emploi de l'*Extra Large UUV* (XLUUV) *Orca*, un grand drone sous-marin fondé sur le démonstrateur *Echo Voyager* de Boeing, à propulsion diesel électrique, d'une longueur de plus de 15 m, d'un poids de 50 tonnes, d'une autonomie de 6 mois à vitesse de 3 nœuds et d'une capacité de plongée donnée pour 3 300 m. *Orca* embarquera en outre une soute modulaire en

145. H. I. Sutton, « China Navy Reveals New Large Underwater Robot Which Could Be a Game Changer », *Forbes*, 1er octobre 2019.
146. « China Tests New Undersea Vehicle for Marine Environment Monitoring », *Navy Recognition*, 3 décembre 2019, disponible sur : www.navyrecognition.com.
147. S. Chen, « China Military Develops Robotic Submarines to Launch a New Era of Sea Power », *South China Morning Post*, 22 juillet 2018.

mesure de déployer des capteurs et des armements pour mener, potentiellement de façon semi-autonome, l'ensemble des missions d'un submersible, à commencer par le minage. Cinq systèmes ont été financés par la Navy pour cette phase exploratoire qui doit aboutir à une mise en service en 2023-2024 et à des acquisitions pouvant aller de 18 à 50 systèmes en complément de la flotte de sous-marins nucléaires d'attaque.

Finalement, les annonces foisonnantes et les prototypes avancés en matière d'autonomisation des systèmes d'armes dissimulent mal de sérieux blocages technologiques qui restent encore à surmonter. Si l'ambition politique est réelle, la mise en service des systèmes développés est loin d'être systématique. Il convient par ailleurs de souligner la dimension symbolique de cette course à l'autonomie. De la même manière que la course à l'espace entre les États-Unis et l'URSS pendant la guerre froide, la compétition pour la maîtrise de l'IA permet aux États de mettre en avant leur « prestige » scientifique et technique. Cette nouvelle course aux armements autonomes pose évidemment la question de la place des Européens et de la France dans le développement et la maîtrise de ces capacités, au risque d'un nouveau déclassement stratégique, technologique et industriel. C'est pourquoi il est impératif d'inclure les systèmes d'armes intégrant de l'autonomie dans la réflexion française sur le combat de demain.

Les systèmes autonomes dans le combat de demain

Dans son discours du 5 avril 2019 à Saclay, la ministre des Armées affirmait que l'IA de défense « a cette puissance de pouvoir s'immiscer dans tous les systèmes d'armes pour les mobiliser avec cent fois plus d'efficacité[148] ». De la même manière, l'autonomisation des systèmes d'armes irrigue désormais tous les projets militaires français et internationaux. Comme l'ont souligné de nombreux spécialistes américains interrogés pour cette étude : « *autonomy is everywhere* ».

De fait, les systèmes d'armes intégrant de l'autonomie permettent des gains capacitaires significatifs dans des domaines d'application très variés. Il s'agit tant d'assister l'humain dans les tâches dangereuses, répétitives et fastidieuses, que de le protéger grâce à des capacités d'autoprotection ou de protection déportée améliorées. Dans le même temps, l'autonomisation permet d'améliorer le processus de prise de décision grâce à des techniques d'analyse plus pertinentes et rapides. Ces avancées technologiques majeures favorisent l'émergence de nouvelles capacités, telles que les systèmes d'armes létales autonomes (SALA) ou les essaims de drones, qui devraient révolutionner la conduite des opérations dans les décennies à venir. Il convient donc de réfléchir aux conséquences que ces systèmes emporteront pour les armées françaises, en particulier en lien avec les programmes à effets majeurs des trois armées à l'horizon 2040 : le système de combat aérien du futur (SCAF), le char de combat du futur (*Main Ground Combat System*, MGCS) et le système de lutte anti-mines futur (SLAM-F).

Dans cette perspective, la maîtrise des systèmes d'armes intégrant de l'autonomie sera indispensable sur le champ de bataille du futur. Néanmoins, plusieurs adaptations sont nécessaires pour que les forces françaises tirent pleinement profit de ces technologies émergentes. Il est indispensable d'anticiper leur arrivée en en clarifiant la terminologie, les concepts d'emploi opérationnel associés à une autonomisation accrue et les corpus juridique et éthique les accompagnant.

148. Discours de Florence Parly, ministre des Armées, sur l'intelligence artificielle de défense, Creil, 10 mai 2021.

Les capacités déterminantes pour l'avenir

L'intégration d'une autonomie croissante dans les systèmes d'armes actuellement déployés permettra de répondre plus efficacement aux menaces de demain, plus rapidement que ne pourrait le faire l'intelligence humaine. Cette évolution s'avère d'autant plus nécessaire que des capacités nouvelles émergent, telles que des menaces saturantes qui risquent de submerger les défenses, des flottilles de robots offensifs ou des systèmes développant des stratégies non prévisibles.

Les systèmes d'armes létales autonomes

Parmi les perspectives d'évolution technologique de l'autonomisation des systèmes d'armes envisagées, les SALA sont sans doute ceux qui génèrent le plus de craintes et de fantasmes. Les militants de la coalition d'ONG *Campaign to Stop Killer Robots* dénoncent ainsi les risques que les « robots tueurs » font peser sur la sécurité internationale (voir *supra*).

Pourtant, comme l'a souligné le Comité d'éthique de la Défense dans son avis sur les SALA rendu en avril 2021, l'emploi des SALA serait « absolument contraire au principe constitutionnel de nécessaire libre disposition de la force armée et au principe de continuité de la chaîne de commandement[149] » et ne présente aucun intérêt opérationnel pour un État dont les armées respectent le droit international[150].

Néanmoins, tous les pays ne se fixent pas les mêmes limites éthiques que la France. Il faut donc envisager un futur dans lequel des adversaires potentiels seraient dotés de systèmes d'armes extrêmement autonomisés. Ainsi, il serait possible d'imaginer le recours à des armements autonomes par des États technologiques mais acculés ou en situation d'infériorité numérique, voire à des armées cherchant simplement à interdire une zone ou ralentir l'avancée des troupes ennemies, suivant la même logique que les champs de mines. À une échelle moindre, un contexte d'emploi par des groupes terroristes ayant dérobé et reprogrammé un système autonome est aussi envisageable même s'il semble plus complexe à mettre en œuvre[151]. Dans cette perspective, les forces concernées se placeraient toutefois en dehors de tout cadre légal, au même titre que si elles recouraient à des armes de destruction massive ne discriminant pas leurs cibles.

149. *Avis sur l'intégration de l'autonomie dans les systèmes d'armes létaux*, Comité d'éthique de la Défense, 29 avril 2021.
150. Discours de Florence Parly, ministre des Armées, sur l'intelligence artificielle de défense, Saclay, 5 avril 2019.
151. C. de Ganay et F. Gouttefarde, *Rapport d'information sur les systèmes d'armes létaux autonomes, op. cit.*

Conscient du risque de déclassement face à un adversaire ayant un recours stratégique aux SALA, certains acteurs favorables à l'interdiction de ces derniers ont décidé d'ajuster leur position. C'est ainsi qu'en France le Comité d'éthique de la Défense insiste sur la nécessité de développer des systèmes d'armes intégrant de l'autonomie (SALIA), afin de riposter face à des adversaires étatiques ou non étatiques déployant des SALA. En effet, les SALIA permettraient de déléguer la fonction d'engagement dans un cadre extrêmement contrôlé. Des garde-fous spatiaux et temporels, ainsi qu'en termes d'effecteurs et de cibles peuvent simplement et efficacement assurer que l'usage de systèmes d'armes autonomes par les armées françaises se fait en respect du cadre éthique et légal. En particulier, les SALIA demeurent soumis aux ordres, aux contre-ordres et à l'exigence du rapport militaire. Cette différenciation permet à la France de contourner les blocages éthiques en faisant des SALA un repoussoir – bien que ceux-ci n'aient pas de perspective de réalisation technologique et industrielle probable à l'horizon 2040 – et de participer à la course technologique en cours. Il est également nécessaire que les forces armées françaises renforcent leurs capacités de contre-mesures, notamment en termes de capacités de GE et de lutte informatique offensive, pour neutraliser de potentiels SALA adverses.

Les essaims de drones

Si la formation en essaim existe en tant que tactique militaire depuis des siècles, les progrès des techniques d'IA et de robotisation offrent de nouvelles perspectives en la matière. L'idée reste la même : à partir d'axes différents, faire converger plusieurs unités vers une même cible de manière coordonnée, structurée et adaptative. L'essaimage permet ainsi à un groupe de se mouvoir de manière cohérente mais évolutive, lui permettant de se disperser et de se regrouper rapidement.

Les démonstrations d'essaims de drones font déjà l'objet d'une attention médiatique importante. Ainsi en février 2018, lors de la cérémonie d'ouverture des jeux olympiques de Pyeongchang, 1 200 drones ont survolé, en pleine nuit, le stade olympique, illuminant le ciel pour représenter les anneaux olympiques[152]. Grâce à l'expérience significative tirée du monde civil, les puissances militaires investissent de plus en plus le champ des essaims de systèmes robotiques. Aussi cette technologie devrait-elle devenir de plus courante sur le champ de bataille[153]. À ce jour, les tactiques d'essaim de drones chinoises sont parmi les meilleures au monde, alors que les États-Unis n'ont pas atteint le même niveau de maîtrise technologique.

152. S. Chodorge, « L'essaim de drones d'Intel illumine la cérémonie d'ouverture des JO de Pyeongchang », *L'Usine Digitale*, 9 février 2018, disponible sur : www.usine-digitale.fr.
153. E. Vincent, « Guerre des drones : la menace des essaims », *Le Monde*, 27 juin 2021.

La mise en œuvre d'essaims robotisés repose sur le calcul déporté (*edge computing*) distribué et miniaturisé. Ils communiquent entre eux à faible distance et à haut débit (images, reconnaissance de cibles), tandis qu'ils opèrent à grande distance de leur opérateur et à faible débit. L'intelligence collective leur permet de faire émerger une manœuvre propre, en réduisant le lien avec l'opérateur au sol qui peut laisser l'essaim définir le meilleur mode d'action. En ce sens, ils suivent la théorie des systèmes : ce sont des acteurs qui sont unitairement limités mais collectivement intelligents[154].

Lors de l'intervention militaire à Gaza au printemps 2021, l'armée israélienne a utilisé un essaim de petits drones multi-coptères pour localiser, identifier et engager des membres du Hamas. Si c'est vraisemblablement la première fois qu'un essaim de drone est utilisé au combat, l'essai s'est avéré si efficace que Tsahal a annoncé sa volonté de le déployer dans d'autres unités[155]. Une compagnie de soutien de sa brigade des parachutistes, auparavant armée de mortiers, aurait ainsi été dotée d'une unité d'essaim de drones[156]. Leur commandant a affirmé dans les médias locaux que celle-ci avait mené plus d'une trentaine d'opérations réussies, y compris contre des cibles à plusieurs kilomètres de la frontière entre Gaza et Israël.

D'après Zak Kallenborn, chercheur à la Division des armes non conventionnelles et de la technologie du National Consortium for the Study of Terrorism and Responses to Terrorism (START) : « le monde peut s'attendre à ce que les essaims de drones deviennent de plus en plus sophistiqués, pour inclure des drones de différentes tailles équipés de divers types de capteurs et d'armes[157] ». D'un point de vue militaire, de telles capacités offriraient de nombreuses options pour engager un adversaire et le forcer à répondre à de multiples menaces à la fois[158].

Les essaims de drones ouvrent donc des perspectives prometteuses en termes de masse, de discrétion, de furtivité et de saturation. Ils permettent de multiplier les charges utiles tout en diminuant le nombre d'opérateurs humains, ce qui les rend très intéressants d'un point de vue économique, d'autant que ce sont des consommables à faible coût. De plus, leur grande autonomie et l'allocation dynamique des tâches les rendent très résilients aux tentatives de brouillage. Il existe toutefois des contre-mesures potentielles, notamment les armes à micro-ondes de forte puissance et bien sûr les essaims eux-mêmes.

154. M. Ekelhof et G. Persi Paoli, « Les essaims de robots. Dossier de recherche », UNIDIR, 28 août 2020.
155. D. Hambling, « Israel Used World's First AI-Guided Combat Drone Swarm in Gaza Attacks », *Forbes*, 21 juillet 2021.
156. *Ibid.*
157. *Ibid.*
158. Z. Kallenborn, « Israel's Drone Swarm Over Gaza Should Worry Everyone », *Defense One*, 7 juillet 2021, disponible sur : www.defenseone.com.

Cependant, lorsqu'ils interagissent avec d'autres essaims, il devient extrêmement ardu de les contrôler[159]. D'après le chercheur en IA Éric Martel, ils représentent « l'un des problèmes les plus aigus des systèmes d'armes autonomes[160] » et soulèvent des problèmes tant éthiques que juridiques (voir *supra*). C'est pourquoi les armées françaises doivent accentuer les efforts entrepris sur ces capacités, pour l'instant insuffisants d'un point de vue technologique, pour endiguer de futures attaques saturantes.

Les enjeux pour la France

Ainsi que l'annonçait la ministre des Armées dans son discours du 5 avril 2019, les questions liées à l'IA de défense touchent « absolument tous les programmes d'armement, du *Rafale* au *Scorpion*, de l'espace au combat naval collaboratif [...] nous développerons l'IA dans tous nos systèmes[161] ». L'entrée dans l'ère des systèmes d'armes autonomes devrait en effet conduire à un changement essentiel dans l'emploi des forces. Les trois armées veulent tirer profit de cette dynamique et ont lancé des programmes à effet majeur impliquant une automatisation accrue des systèmes d'armes. Trois initiatives vers le combat collaboratif accordent ainsi une large part à l'autonomie des systèmes d'armes.

Vers le combat aérien du futur

Pour le volet aérien, les premières briques de cette technologie sont mises en œuvre dans le SCAF. Ce dernier se composera d'un ensemble de systèmes d'armes interconnectés, articulés autour du projet de système d'armes du futur (*Next Generation Weapon System*, NGWS) et de l'ensemble des moyens aériens existants (SCCOA, *Rafale* F-5, MRTT, etc.). Le NGWS, qui concentrera l'essentiel de l'innovation, sera pour sa part composé d'un avion de combat habité de nouvelle génération (*Next Generation Fighter*) ainsi que d'effecteurs déportés (*remote carriers*) et d'un *cloud* de combat pour assurer la connexion entre ces différents systèmes[162]. Ce programme reposera sur un niveau accru d'autonomie pour la gestion assistée des capteurs et des effecteurs, la connectivité intelligente et la coopération entre aéronefs habités et drones. S'appuyant sur l'autonomie collaborative et la synergie homme-machine, le NGWS doit tirer parti des progrès technologiques (IA, propulsion à cycles variables, capteurs radar et infra-rouge, technologies

159. É. Martel, *Robots tueurs. La guerre déshumanisée, les robots et drones autonomes visent zéro mort*, Paris, Éditions Favre, 2018.
160. Cité dans C. de Ganay et F. Gouttefarde, *Rapport d'information sur les systèmes d'armes létaux autonomes, op. cit.*
161. Discours de Florence Parly, ministre des Armées, sur l'intelligence artificielle de défense, Saclay, 5 avril 2019.
162. R. Briant, « La synergie homme-machine et l'avenir des opérations aériennes », *Focus stratégique*, n° 106, Ifri, septembre 2021.

quantiques, etc.) et des sciences cognitives pour optimiser les fonctions de combat du système et prendre l'ascendant opérationnel sur les adversaires.

L'architecture retenue pourrait également s'appuyer sur un segment spatial mettant en œuvre différentes constellations de micro-satellites en orbite basse (LEO) susceptibles d'offrir des capacités de communication à très haut débit et faible latence, de l'imagerie multi- ou hyperspectrale, ainsi que des services durcis de géopositionnement. *In fine*, le NGWS pourrait s'appuyer sur ces nouvelles capacités pour recombiner les fonctions « classiques » de la guerre aérienne dans la perspective du combat muti-milieux/multi-champs (M2MC), notamment au travers d'une interconnexion accrue avec les systèmes d'information opérationnels et de commandement (SIOC) d'armées.

Dans une logique de renseignement et de ciblage dynamiques, quasiment en temps réel, les drones d'accompagnement ou les effecteurs déportés emportés en soute pourraient être utilisés pour améliorer la surveillance de l'espace grâce à l'optimisation de la distribution spatiale et spectrale des capteurs, saturer les défenses ennemies par l'emploi des techniques d'essaim, mener des missions de brouillage collaboratif, désigner des cibles ou même tirer des missiles. Ils intégreront de l'autonomie pour accompagner la plateforme habitée de manière à diminuer la charge cognitive des équipages en adaptant leurs trajectoires pour optimiser la survivabilité, l'endurance ou la létalité en fonction des effets recherchés.

Ainsi, dans le combat aérien du futur, l'équipage devrait pouvoir se concentrer sur les fonctions hautes de commandement de l'essaim, d'appréciation de l'environnement tactique et d'engagement cinétique et non-cinétique. Il serait donc en mesure de pénétrer des dispositifs de déni d'accès et des systèmes de défense aérienne de plus en plus performants – tels que les successeurs des S-400 – en se déchargeant des fonctions les plus basiques (pilotage, optimisation des trajectoires, gestion du carburant, manœuvres d'autodéfense, etc.).

Vulcain et la robotisation du champ de bataille

Dans l'armée de Terre, la prise de conscience des défis posés par la robotisation du champ de bataille s'est traduite par le lancement en 2021 de « Vulcain », le treizième projet stratégique du chef d'état-major de l'armée de Terre, qui s'intéresse aux perspectives tactiques ouvertes par les systèmes automatisés et robotisés à l'horizon 2040. Comme l'expliquait le Général Charles Beaudoin, lorsqu'il était sous-chef du bureau plan de l'état-major de l'armée de Terre, les robots terrestres devraient permettre « de générer des effets de masse et d'accélérer le rythme opérationnel pour augmenter le rendement de la force

dans des domaines aussi variés que les systèmes de surveillance, de protection, de détection des menaces ou des flux logistiques[163] ».

Les efforts entrepris par l'armée de Terre en matière de systèmes automatisés se poursuivront donc dans les années à venir, avec la livraison complète du programme synergie du contact renforcée par la polyvalence et l'info-valorisation (*Scorpion*) lancé en 2014 et, à l'horizon 2035-2040, avec le système de combat terrestre principal (MGCS), présenté comme le « char du futur[164] ». L'intégration de l'autonomie aux systèmes d'armes apportera à ce programme des capacités nouvelles en termes d'analyse de la situation tactique, de protection collaborative, de fusion multi-capteurs et d'optimisation des itinéraires de combat[165]. L'emploi de systèmes robotisés est envisagé selon le principe « autant de systèmes automatisés que possible, autant d'humains que nécessaire[166] », ce qui consiste *de facto* à leur confier le maximum de tâches opérationnelles, sauf s'ils sont inexistants, inadaptés, insuffisants ou indisponibles (règle des « 4 i »).

Au regard des projets en développement à travers le monde, il pourrait en outre être pertinent que le MGCS soit accompagné de systèmes intégrant de l'autonomie aériens (à l'image du *Pterodaktil* censé s'intégrer au *T-14* russe) ou terrestres (à l'instar des *Sharp Claw 1* et *2* chinois). L'idée d'un plus petit système chenillé déployable depuis un caisson arrière pour remplir des missions de déminage, de reconnaissance ou encore de diversion du feu, comme pourrait le faire un *loyal wingman* dans un combat aérien, semble en effet extrêmement prometteuse.

Des drones aériens déployables depuis le véhicule pourraient également sécuriser ses abords en identifiant, voire en traitant la menace représentée par l'infanterie adverse, notamment sur les flancs du véhicule en milieu urbain. Un peloton de chars pourrait ainsi déployer un véritable essaim de drones coordonnés via un *cloud* de combat, susceptible de lui fournir un éclairage direct et des capacités de frappe. L'équipage limité d'un char moderne (3 à 5 membres) rend essentielle l'autonomisation de ces systèmes, qui devraient être capables de remplir leur mission sans surcharger un équipage déjà sous pression. La généralisation de systèmes de défense automatisés semblables au *Trophy* israélien est également une piste intéressante. En effet, ces systèmes sont capables de repérer un missile anti-char en approche et de déclencher automatiquement une interception afin de détruire le projectile avant contact.

163. L. Lagneau, « L'armée de Terre va créer la section "Vulcain", une unité dédiée aux "robots aéroterrestres" », *OPEX360*, 30 mai 2021, disponible sur : www.opex360.com.
164. M. Pesqueur, « L'ailier de demain : le partenariat homme-machine dans l'armée de Terre », *Notes de l'Ifri*, Ifri, novembre 2021.
165. Voir le concept exploratoire robotique du projet « Vulcain » et le concept « systèmes automatisés de l'armée de Terre ».
167. Concept exploratoire robotique, Projet Vulcain, État-major de l'armée de Terre, Sous-chefferie Plans et Programmes, 2021.

De même, en cas de déploiement en zone hostile, l'ajout d'une ou plusieurs tourelles anti-infanterie totalement automatisées, telles que les *SGR-A1* coréennes, destinées à éliminer tout intrus dans un rayon de sécurité pourrait s'avérer utile, en particulier compte tenu de l'expérience déjà significative de ce type de système et de son poids relativement faible. Engager de tels systèmes « tout autonomisés » suppose néanmoins une très bonne connaissance de l'environnement, afin d'éviter la présence de personnels non-combattants ou « hors de combat ».

Un système plus complexe impliquerait cependant une maintenance plus exigeante, ce qui nécessiterait l'intégration d'une maintenance prédictive autonomisée capable d'anticiper les défaillances et d'alléger le poids logistique du véhicule. Développée initialement pour les systèmes aériens, une telle maintenance contribuerait à viabiliser l'emploi d'un véhicule techniquement complexe et probablement assez lourd.

Le combat naval futur

La Marine a elle aussi pris conscience de l'enjeu de taille que représente l'autonomisation de systèmes d'armes. Ainsi, comme le déclarait l'amiral Prazuck à l'été 2019 :

> « S'agissant des drones, j'ai aujourd'hui cinquante appareils, dont aucun n'est encore opérationnel. Ils sont tous en expérimentation, dont beaucoup au sein de la force maritime des fusiliers marins et commandos. Mon objectif [...], c'est de disposer d'un drone par bateau en 2030. J'estime donc qu'en 2030, dans la Marine, il y aura environ 1 200 drones : 900 drones aériens pour équiper les bateaux, les bases à terre et les sémaphores ; une cinquantaine de drones de surface pour la surveillance et 200 drones et *gliders* sous-marins pour la guerre des mines et la surveillance de l'environnement. »

Si la Marine a déjà automatisé bon nombre des systèmes d'auto-défense de ses bâtiments, le système de lutte anti-mines du futur (SLAM-F), lancé en 2020, est le plus ambitieux en matière d'autonomisation. En effet, ce programme vise l'automatisation de la détection des mines dans des images au sonar, mais aussi à mettre en œuvre des drones sous-marins et de surface avec des capacités de guidage et d'évitement d'obstacle. L'objectif est de permettre aux marins d'opérer à distance de la zone de danger grâce à l'utilisation de drones et de robots sous-marins et de surface mis en œuvre depuis la côte ou depuis un bâtiment dédié. Ils sont le cœur du programme SLAM-F et font l'objet d'une coopération franco-britannique appelée *Maritime Mines Counter Measures* (MMCM). À terme, le SLAM-F devrait remplacer tous les moyens actuels de guerre des mines (chasseurs de mines tripartites, bâtiments remorqueurs de sonars et bâtiments bases de plongeurs démineurs). Il confortera ainsi la liberté de manœuvre de la force de dissuasion, en sécurisant la mise en œuvre des unités stratégiques de la

Marine (sous-marins nucléaires lanceurs d'engins et porte-avions). Il permettra également de protéger les ports français et, en fonction des circonstances, de soutenir le déploiement d'une force d'action navale, de sécuriser l'évacuation de ressortissants, d'aider à la prévention de crises ou d'intervenir en environnement contesté[167].

Si la guerre des mines est actuellement le principal domaine d'emploi envisagé pour les systèmes autonomes dans la Marine nationale, les mesures hydrographiques, la cartographie des fonds marins et le développement d'une capacité autonome d'appréciation de la situation tactique sont également concernées par le déploiement de drones sous-marins et de surface, respectivement avec le programme CHOF (Capacité hydrographique et océanographique future) et SDAM (Système de drone aérien de la Marine). La création de véritables écosystèmes combinant bâtiments de nouvelle génération et systèmes d'armes intégrant de l'autonomie, à l'image du SCAF pour l'armée de l'Air et de l'Espace ou du MGCS pour l'armée de Terre, est donc l'objectif poursuivi par la Marine pour ces dix prochaines années.

Une plus grande autonomisation des drones aériens comme le VSR 700 (futur drone du SDAM), en couplant détection automatique et images radar de haute qualité, pourrait ainsi permettre l'emploi de ces drones pour les patrouilles de surveillance des côtes ou autour des bâtiments de surface, en alertant automatiquement les sémaphores en cas de détection suspecte, voire en délivrant un armement. Le développement de drones sous-marins plus conséquents, avec emport de nombreux capteurs (sonars, hydrographie…) dans le cadre du CHOF serait également utile au renseignement tactique, opératif et stratégique, à la lutte anti-sous-marine, ainsi qu'à la future *seabed warfare* à condition que les drones aient une capacité de plongée suffisante pour atteindre le fond de la mer. Enfin, on pourrait imaginer l'utilisation de drones de surface avec signature radar identique à celle de bâtiments non autonomes afin de servir de leurre et de défendre des zones importantes dans une perspective de déni d'accès et d'interdiction de zone.

Cependant, outre les contraintes budgétaires et industrielles inhérentes à ce type de projets, ces innovations comprennent des freins propres à la Marine nationale : le problème de la récupération des drones, en particulier aériens, lancés depuis un bâtiment de surface est ainsi prégnant – avec quelques innovations comme les filets de pont qui doivent encore être perfectionnées. La capacité d'emport et d'appontage des drones aériens peut aussi poser problème : au-delà d'une certaine envergure, seuls les bâtiments avec un pont d'envol suffisamment grand (PHA, FREMM, PANG) pourront mettre en œuvre ces aéronefs autonomisés. Enfin, la diversité des milieux dans laquelle opère la Marine nationale risque de conduire à une multiplication de systèmes coûteux et peu interopérables.

167. L. Lagneau, « La Direction générale de l'armement a reçu un prototype du futur système de drones anti-mines navales », *Opex360*, 3 décembre 2021, disponible sur : www.opex360.com.

Ces grands programmes doivent toutefois être pensés de concert. Ainsi, les *remote carriers* développés dans le cadre du SCAF pourront être déployés depuis d'autres plateformes, tels qu'un véhicule terrestre ou un bâtiment de surface – la Marine est en effet partie prenante de ce programme, le PANG étant dimensionnant pour embarquer le SCAF. Par ailleurs, des projets de systèmes multi-milieux sont en phase d'exploration, par exemple des drones aériens déployés depuis un sous-marin. Cependant, de telles initiatives impliquent de déterminer dans un premier temps le juste niveau d'autonomie fonctionnelle.

Au-delà de ces trois programmes emblématiques, il convient de noter qu'une multitude d'initiatives intégrant davantage d'autonomie aux systèmes de combat sont en cours de développement au sein du ministère des Armées. Tout le spectre des activités est concerné, de la maintenance prédictive pour les flottes les plus modernes telles que le standard F4 du *Rafale* ou les frégates FDI, à l'amélioration et l'unification de la situation tactique au sein de la force aéronavale grâce à la veille collaborative[168]. La cyberdéfense et le renseignement sont également concernés : la détection automatique d'anomalies sur les réseaux et dans les connexions informatiques, la compression intelligente de données et la détection assistée d'objets dans des images satellite sont autant d'exemples de ce que peut apporter l'autonomie pour le combat en général[169]. Il est néanmoins essentiel de penser en amont la manière de concilier les besoins tactiques, la faisabilité technique et les ressources financières. En outre, tous ces projets, pour prometteurs qu'ils soient, nécessitent de remédier au problème de la dépendance à l'énergie que posent les systèmes d'armes intégrant de l'autonomie.

Les défis à relever

L'acculturation des forces armées françaises aux nouvelles technologies d'IA et de robotique pose d'importantes questions stratégiques, éthiques et politiques. Si ses apports pour le combat sont indéniables, l'autonomisation des systèmes d'armes nécessite un certain nombre d'adaptations dans le cadre des développements capacitaires actuels et futurs. Il convient donc d'identifier les défis que pose l'émergence de systèmes d'armes de plus en plus autonomes sur les théâtres d'opérations, afin de préparer les évolutions technologiques à venir. À cet égard, plusieurs recommandations peuvent être formulées.

168. C. de Ganay et F. Gouttefarde, *Rapport d'information sur les systèmes d'armes létaux autonomes*, *op. cit.*
169. *Ibid.*

Accentuer les efforts de recherche

L'autonomisation des systèmes d'armes constitue un virage technologique majeur que les forces françaises ne sauraient manquer au risque de pâtir du même retard stratégique et opérationnel que celui qu'elles ont subi dans le domaine des drones aériens. Cependant, pour réussir cette transformation technologique, les armées françaises doivent accentuer les efforts entrepris en matière de R&D.

Renforcer le lien avec les universités et les acteurs privés

Henry Ford aimait à dire que s'il avait questionné ses clients sur ce dont ils avaient besoin, ils auraient demandé un cheval plus rapide, indiquant par là la difficulté à imaginer le besoin futur et les possibilités techniques offertes par le progrès technologique. L'automobile est pourtant bien plus qu'une monture plus rapide[170]. Il est donc primordial de travailler sur de l'innovation radicale[171] en matière d'IA et de robotique. Les États-Unis, la Chine et la Russie sont toutes dotées de structures dédiées à l'innovation de rupture extrêmement agiles, au sein desquelles interagissent les armées, le secteur privé et les universités. Comme pour l'IA, les avancées dans le domaine de l'autonomisation s'appuient sur elles-mêmes, ce qui donne lieu à une prime au « *first mover* ». Pour la France, il s'agirait donc d'être le meilleur « *fast follower* » c'est-à-dire le plus rapide et le plus efficace à intégrer des fonctions autonomisées et intégrant des techniques d'IA.

À cet égard, la France n'est pas démunie. Elle dispose d'une base industrielle et technologique de défense (BITD) robuste et d'acteurs de premier plan à la fois au niveau national, européen et international. En outre, la France bénéficie d'une reconnaissance internationale de son école de mathématiques et de la qualité de ses chercheurs dans les domaines de l'informatique, du calcul et du développement de logiciels. Elle jouit également des travaux et de l'aura d'instituts de renommée mondiale comme l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria), l'École Polytechnique et le Centre national de la recherche scientifique (CNRS). Bien qu'elle ne soit pas en mesure de rivaliser avec les acteurs américains ou chinois en matière d'apprentissage profond, la France peut tirer parti de l'excellence de sa recherche dans ces domaines, en renforçant les liens existants entre les armées et ces institutions. À l'heure actuelle, il n'y a pas par exemple de poste dédié à l'IA pour les polytechniciens au sein de la Direction générale de l'armement (DGA)[172].

170. K. Payne, *I, Warbot: The Dawn of Artificially Intelligent Conflict*, Londres, Hurst Publishers, 2021.
171. L'innovation radicale ou de rupture est une forme d'innovation qui, en proposant un nouveau produit ou service, crée un marché qui n'existait pas auparavant – contrairement à l'innovation incrémentale qui tente d'améliorer les produits, services ou processus existants, en travaillant au sein du même marché.
172. Entretien avec un ingénieur de recherche au CREC Saint-Cyr.

La stratégie du ministère des Armées sur l'IA de défense pointe les lacunes de la France lorsqu'il s'agit de transformer les innovations issues de la recherche fondamentale en applications industrielles. Ce phénomène bien connu ne concerne pas que le monde de la défense et s'explique par le manque de lien entre les laboratoires universitaires de recherche et les acteurs industriels. Actuellement, une carrière académique repose sur le nombre de publications d'un chercheur, et non sur le développement de partenariats industriels ou les brevets déposés. Dans le même temps, les armées ne bénéficient pas suffisamment des innovations les plus prometteuses. Ainsi, alors que la France dispose de quatre instituts interdisciplinaires d'intelligence artificielle (4IA), aucune des activités financées dans le cadre de leurs appels à projet n'a porté sur la défense[173]. C'est la raison pour laquelle le ministère des Armées a décidé de financer quatre chaires en dehors des « 4IA » pour modifier cette dynamique.

Si elles étaient dotées d'un rôle plus important dans la définition des objets de recherche, les armées pourraient en outre s'assurer que l'ensemble des champs de la robotisation et de l'autonomie sont explorés, tels que la simulation, la *data science*, les systèmes embarqués, le logiciel ou les statistiques. En effet, les frontières entre ces différents domaines sont poreuses et il convient de tous les explorer pour ne pas être dépassé sur le plan tant technologique que stratégique. À cet égard, les initiatives permettant de faire financer par le ministère des Armées un grand nombre de thèses chaque année sont à poursuivre. De plus, le ministère des Armées doit continuer à orienter les recherches et sélectionner des thèmes d'intérêt, pas seulement d'ordre militaire, pour collaborer avec différents laboratoires, notamment dans les domaines de l'IA, du quantique, du spatial ou de la robotique.

Retenir les pépites nationales

Les travaux de Claude de Ganay et Fabien Gouttefarde ont mis en exergue une relative faiblesse française dans l'accompagnement industriel des innovations technologiques prometteuses, dès lors que le principe est validé ou les prototypes testés. Dans leur rapport, ils mettent en effet l'accent sur le risque de rachat par des groupes étrangers de technologies conçues sur le territoire national. L'entreprise française Shark Robotics, dont le robot *Colossus* a été employé lors de l'incendie de Notre-Dame de Paris, est un exemple emblématique de ces « pépites » françaises qu'il s'agit de retenir. En avril 2019, Shark Robotics a présenté au salon des forces spéciales (Sofins) un robot « mule », le *Barakuda*, capable de transporter une tonne de matériel sur tous les terrains et disposant d'une autonomie supérieure à tous ses équivalents sur le marché. Ce type d'entreprise doit bénéficier d'une attention particulière face à la concurrence souvent rude des compétiteurs internationaux. Dans ce contexte, il est impératif de travailler à la

173. C. de Ganay et F. Gouttefarde, *Rapport d'information sur les systèmes d'armes létaux autonomes*, *op. cit.*

constitution d'une filière française de robotique de défense, associant aussi bien les grands acteurs industriels que les *start-ups* et petites entreprises très innovantes. Une organisation en filière permettrait en effet de favoriser l'identification des nouvelles pépites par l'Agence de l'innovation de défense (AID) et la DGA et d'apporter des solutions technologiques pour renforcer les plus petits acteurs.

Le secteur de la défense pâtit par ailleurs d'un frein supplémentaire, lié à la défiance de certains chercheurs et entrepreneurs envers les industriels de la défense. Il peut encore être mal perçu de travailler pour ce secteur dans certains milieux universitaires et de la « *tech* ». Ainsi, la lettre envoyée par les salariés de Google à leur directeur pour abandonner le projet *Maven* mettait en avant le risque de « salir l'image de marque de Google et son attractivité auprès des talents » alors que l'entreprise lutte déjà pour conserver la confiance du public « au milieu de peurs grandissantes sur les biais et la militarisation de l'intelligence artificielle[174] ». Dans cette perspective, les défis et concours centrés sur l'IA et la robotique sont une excellente manière de stimuler l'activité industrielle et de faire rayonner les armées auprès des jeunes talents. Dans un autre registre, la création d'une réserve citoyenne de spécialistes en IA et en robotique serait éminemment utile pour recruter les civils possédant ces compétences rares[175].

Acculturer les forces

Pour intégrer et tirer pleinement profit de la robotisation, il est indispensable d'y acculturer les capacités humaines et organisationnelles.

Actualiser la doctrine et l'entraînement

Face aux nouvelles menaces que constituent le retour de la masse, l'hypervélocité et les stratégies de déni d'accès, il conviendrait d'adapter la doctrine d'emploi des systèmes d'armes intégrant de l'autonomie. En effet, la délégation à des robots de certaines fonctions de réponse est vouée à devenir une nécessité, ce qui suppose d'équiper les forces de systèmes d'armes plus autonomes. Le concept d'emploi de l'IA et des systèmes automatisés de 2018 doit donc être actualisé à l'échelle interarmées pour penser l'autonomisation intégrée des systèmes d'armes. De la même manière que le Pentagone s'est doté d'un Chief Digital and Artificial Intelligence Officer, le ministère des Armées gagnerait à repenser son organisation en matière d'IA et de data, afin de limiter la bureaucratie et la concurrence entre les différents services chargés d'accélérer l'innovation technologique des armées. Pour l'instant, celle-ci est encore trop envisagée par armée, alors que les progrès dans un milieu peuvent aussi bénéficier aux autres armées, en particulier au regard

174. Cité dans P. Montet, « Refusant de travailler avec le Pentagone, des salariés de Google démissionnent », *Usbek & Rica*, 16 mai 2018, disponible sur : https://usbeketrica.com.
175. C'est d'ailleurs l'une des recommandations du rapport de la *National Security Commission on Artificial Intelligence* (NSCAI) de 2021, qui appelait à la création d'un *National Digital Reserve Corps*.

de l'intégration M2MC. Pour appuyer l'élaboration de cette nouvelle doctrine, la simulation constitue un atout majeur.

L'acculturation des forces aux systèmes d'armes intégrant de l'autonomie doit par ailleurs être évolutive, en particulier au regard de l'entraînement, décisif pour anticiper les futurs effets de rupture technologique sur les programmes existants. Concrètement, il s'agit à la fois de faire cohabiter des systèmes de générations différentes et d'éviter qu'un militaire formé sur un système d'armes soit déstabilisé lorsque celui-ci est rendu plus autonome, ou qu'il ne sache pas travailler en équipe avec un militaire formé sur un système plus avancé sur le plan technologique. Au contraire, la perte du savoir-faire et de l'implication de l'opérateur humain risque de le rendre incapable d'identifier un dysfonctionnement, de reprendre la main quand le système ne sait plus faire (*fail safe*). L'entraînement des forces et la simulation doivent donc être repensés, pour empêcher ces phénomènes d'hétérogénéité générationnelle et favoriser l'évolutivité de systèmes soumis aux caprices des avancées technologiques.

Repenser l'interaction homme-machine

Comme le soulignaient les rapporteurs de la mission d'information sur les SALA de l'Assemblée nationale en juillet 2020 : « la France n'autorisera pas une machine à s'assigner une mission ou à modifier une mission qui lui a été confiée[176] ». En effet, le respect de la chaîne de commandement humain est primordial, tant au regard de l'exécution des ordres que de la responsabilité juridique des forces.

Il serait alors pertinent de définir sur le plan doctrinal une interaction homme-machine permettant de superviser tous les systèmes d'armes, en suivant un principe de subsidiarité et en définissant clairement le niveau de contrôle humain suffisant pour le fonctionnement, l'emploi et l'engagement des systèmes d'armes. Le programme d'étude amont *Man Machine Teaming* (MMT) examine ainsi comment tirer parti des techniques d'IA et d'autonomisation pour la future aviation de combat en matière d'interaction homme-machine, de traitement des capteurs et de collaboration avion-drone. Une telle démarche implique aussi une adaptation des recrutements, des profils de compétence, des cursus de formation, afin que les armées se dotent de spécialistes de l'IA, des données et de la robotique capables de concevoir une interaction homme-machine optimale.

Par ailleurs, le mode dégradé doit être repensé, et ce dès la conception (procédures, organisations, tactiques) des appareils de force recourant à des systèmes d'armes autonomes ainsi que dans leur conception même (par exemple avec des options de niveaux d'autonomie réversible), afin d'éviter que le manque de facteur humain n'aggrave les aléas.

176. C. de Ganay et F. Gouttefarde, *Rapport d'information sur les systèmes d'armes létaux autonomes*, *op. cit.*

Donner confiance en la machine

L'acceptabilité militaire et sociétale des systèmes d'armes intégrant de l'autonomie dépend du niveau de confiance qui leur est accordée. En parallèle des efforts en matière de R&D, il est donc indispensable d'œuvrer à ce que les militaires et les populations aient confiance en ces nouvelles technologies. Il s'agit donc de s'assurer de la précision, de la fiabilité et de la prévisibilité de systèmes d'armes dotés de fonctions autonomes, et de vérifier qu'ils obéissent aux normes légales, notamment en renforçant les procédures d'examen de licéité des systèmes émergents.

Ouvrir la « boîte noire »

L'explicabilité des systèmes d'armes intégrant de l'autonomie constitue un défi majeur. En effet, pour améliorer la confiance accordée tant par les militaires que par la société civile à ces nouvelles technologies, il faut se donner les moyens de reconstituer et de comprendre la chaîne de raisonnement ayant conduit à une décision spécifique. À cet égard l'initiative *Explainable AI*, lancée par la DARPA en août 2016, constitue un modèle intéressant. Ce projet vise à créer des techniques d'apprentissage automatique produisant des modèles plus explicables tout en maintenant un haut niveau de performance d'apprentissage (précision de prédiction). L'objectif est de permettre aux utilisateurs de comprendre la nouvelle génération de systèmes « intelligents », pour favoriser la confiance et mieux identifier – et donc résoudre – les biais à l'origine de dysfonctionnements de la machine.

La réflexion engagée par la DGA, en lien avec plusieurs industriels, qui a déjà permis la rédaction d'un guide de spécification des systèmes à base d'IA, doit donc être poursuivie. Les armées doivent par ailleurs identifier clairement le niveau de risque acceptable autorisant de recourir à des techniques d'IA avec une moindre compréhension pour certaines fonctions. À cet égard, les facteurs de risques devant être évalués et maîtrisés dès la conception des systèmes sont nombreux – manipulation des données d'apprentissage et biais cognitifs transmis par l'homme aux algorithmes notamment.

Assurer la sécurité des SIC

Pour accroître la confiance accordée aux systèmes d'armes autonomes, il convient, par ailleurs, de se prémunir contre les risques de piratage et de brouillage. En effet, il est essentiel de protéger les systèmes informatiques et les communications, autant pour des raisons de confiance que de sécurité.

Du fait de la plus grande surface d'attaque cyber, les systèmes d'armes intégrant de l'autonomie sont plus vulnérables aux attaques sur les bases de données et aux offensives de services de renseignement adverses pour récupérer les informations qu'ils collectent. Il est donc primordial de garantir la sécurité des communications avant de déployer des systèmes d'armes

autonomes. Plusieurs pistes sont envisagées pour pallier cette vulnérabilité, notamment la 5G et les ondes directives et à très haut débit.

Respecter les lignes rouges

La France s'est dotée en 2019 d'un organe de réflexion sur les enjeux éthiques des nouvelles technologies dans le domaine de la défense, rattaché au ministère des Armées. Après la publication d'un premier avis sur le soldat augmenté, le Comité d'éthique de la défense a remis un rapport sur l'intégration de l'autonomie dans les systèmes d'armes létaux. Le choix de ce sujet témoigne des questions stratégiques, juridiques et éthiques soulevées par le développement des applications militaires de l'IA, notamment par l'émergence des SALA. Cet avis démontre que le ministère des Armées condamne toute volonté de développement, d'emploi ou d'export de systèmes d'armes pleinement autonomes c'est-à-dire capables de faire évoluer, au-delà du cadre d'emploi fixé initialement, leurs règles d'emploi de la force létale.

Il est impératif de respecter cette ligne rouge et de préserver, en toutes circonstances, la chaîne de commandement humain et le respect du droit international humanitaire. C'est un objectif d'autant plus important que la régulation des SALA est négociée dans le cadre de la Convention sur certaines armes classiques (CCAC), dont la dernière session s'est tenue en décembre 2021 à Genève sous l'égide des Nations unies.

Alors que certains de ses adversaires potentiels s'opposent à l'élaboration d'une règle sur les systèmes d'armes entièrement autonomes, la France défend une position médiane, favorable à une déclaration politique sur le sujet[177]. Sans faire de concession sur ses exigences éthiques et ses valeurs, il est donc possible pour la France d'incarner une voie originale, propice à encadrer ces nouvelles technologies. Comme l'affirme le juriste Alain Supiot : « le droit est une technique qui sert à humaniser la technique[178] ». Or cette démarche semble éminemment pertinente dans le cas des systèmes d'armes intégrant de l'autonomie.

Résoudre les tensions sémantiques

Les confusions sémantiques constituent aujourd'hui un point bloquant dans le dialogue entre industriels, ingénieurs et décideurs politiques et militaires. Le cas de la distinction entre « robots » et « drones » en France est l'un des plus emblématiques – au point d'être parfois ridicule – mais il fait perdre un temps précieux et démontre le manque d'appropriation de ces technologies dans la communauté de défense française.

177. Cette déclaration politique pourrait prendre la forme d'un code de conduite et de bonnes pratiques, sur le modèle par exemple du document de Montreux sur les sociétés militaires privées.
178. « Travail, droit et technique », *Droit social*, n° 1, 2002, p. 13 *sq.* ; *Homo juridicus, essai sur la fonction anthropologique du droit*, 2e éd., Paris, Seuil, 2009.

Dans cette perspective, comme y enjoignait le concept exploratoire interarmées portant sur « l'emploi de l'intelligence artificielle et des systèmes automatisés », il serait préférable d'éviter de recourir à l'adjectif « autonome », source de confusions. Il est essentiel de faire preuve de pédagogie, en expliquant quels modules fonctionnels font l'objet d'une automatisation avancée, pour évacuer tous les fantasmes de « robots tueurs autonomes » capables de décider de leurs missions et d'ouvrir le feu sans en avoir reçu l'ordre.

De la même manière, des expressions telles que « réseaux de neurones », « intelligence artificielle » et « apprentissage », parce qu'elles sont utilisées pour décrire les facultés humaines, entretiennent des craintes parfois infondées et issues de la science-fiction. Comme l'observe Patrick Bezombes, ces choix sémantiques et terminologiques prêtent à confusion puisqu'il calque sur le monde matériel des caractéristiques du monde vivant et « nous nous retrouvons désormais dans la situation d'un enfant à qui on a raconté des histoires de Frankenstein et dont on s'étonne qu'il fasse des cauchemars[179] ». L'adjectif qualificatif « létal » est lui aussi contre-productif, d'autant que l'emploi envisagé s'applique plutôt à d'autres systèmes qu'à des humains – ce qui ne constitue donc pas de la létalité à proprement parler. Il conviendrait donc de développer une terminologie propre aux armées, avec un vocabulaire spécifique aux machines, pour évacuer l'image d'un robot humanoïde doté d'un logiciel comparable au cerveau humain. Ainsi seulement pourra être démystifiée l'intégration de l'autonomie aux systèmes d'armes.

Faire émerger une véritable filière européenne

De toute évidence, c'est à l'échelle européenne que se joue l'autonomie stratégique dans le domaine du numérique et, partant, dans celui de l'IA de défense. En effet, les enjeux de l'intégration de l'autonomie aux systèmes d'armes vont largement au-delà de la seule sphère nationale.

Bâtir une masse critique

Les avancées des techniques d'IA, en particulier en matière d'autonomisation des systèmes, dépendent de la capacité à collecter et exploiter une masse colossale de données. Dans cette perspective, la France ne parviendra à rivaliser avec les États-Unis, la Chine ou la Russie que si elle fait front avec ses alliés européens, sans quoi elle ne sera pas en mesure de bâtir une masse critique de données exploitables pour de l'apprentissage machine. Néanmoins, le problème des sets d'entraînement provient aussi de la classification des données issues du monde des opérations – avec lesquelles

179. P. Bezombes, « Autonomie et respect de la règle pour les robots militaires. Considérations sémantiques et point de vue de la doctrine interarmées », *op. cit.*

les industriels n'ont pas le droit de travailler. Il est possible de créer un environnement simulé pour alimenter les jeux de données d'apprentissage mais celui-ci n'est pas aussi rigoureusement représentatif de la réalité pour l'apprentissage machine. Une politique de la donnée pour l'IA à l'échelle européenne, qui tienne compte de ces impératifs, est donc indispensable pour structurer les différents sets de données en fonction de la catégorie d'emploi des IA qu'ils sont susceptibles d'entraîner.

De plus, l'ampleur des investissements essentiels pour franchir ce nouveau pas technologique rend nécessaire une coopération plus forte en termes de financements, afin de pleinement bénéficier d'économies d'échelle. Si elle n'avance pas de concert, l'Europe pâtira d'un écart toujours plus grand avec ses compétiteurs.

Mutualiser les projets

Plusieurs États européens disposent d'acteurs industriels de premier plan dans le secteur de la défense. Il est cependant nécessaire de pousser plus loin les efforts engagés pour bâtir une base industrielle et technologique européenne intégrée. Le Fonds européen de Défense, adopté en avril 2021 et doté d'une enveloppe de 7,9 milliards d'euros, est une excellente piste pour financer la R&D de programmes industriels européens. Les premiers appels à projet ayant été lancés le 30 juin dernier, il est difficile de connaître les axes de recherche privilégiés. Toutefois, il serait pertinent de mettre l'autonomisation au cœur des projets initiés. Cet aspect est d'autant plus important que l'Europe ne dispose pas d'une industrie civile du numérique aussi développée que la Chine ou les États-Unis.

La France participe déjà à des programmes intégrant de l'autonomie en commun avec l'Allemagne, l'Espagne et le Royaume-Uni, et d'autres pourraient suivre d'ici à 2025. De nombreux programmes à effets majeurs, tels que le MGCS le SLAM-F et le SCAF, lient déjà la France à ses partenaires européens. Dans le cadre de la Coopération structurée permanente (CSP), sur les quatorze projets annoncés à l'automne 2021, quatre doivent reposer sur une autonomisation accrue : *Medium Size Semi-Autonomous Surface Vehicle* (M-SASV), *Maritime (semi) Autonomous Systems for Mine Countermeasures*, *Integrated Unmanned Ground System* (UGS) et *Next Generation Small RPAS* (NGSR). Ces projets constituent autant d'opportunités d'affermir une position partagée sur les questions d'autonomisation des systèmes d'armes, indispensable à la cohérence stratégique de l'Union européenne. Sur le plan international, cette dernière pâtit encore d'avancer en ordre dispersé, ce qui limite sa masse critique face à des compétiteurs tirant profit de ses rivalités internes.

Conclusion

Si l'automatisation des machines s'inscrit dans une trajectoire historique et conceptuelle déjà longue, les progrès exponentiels des techniques d'IA, de la robotique et leurs applications militaires laissent entrevoir l'émergence de systèmes intégrant toujours plus d'autonomie. Une véritable course à l'autonomie se profile, dominée par les États-Unis, la Chine et la Russie mais dans laquelle Israël, la Corée du Sud, la Turquie, l'Iran, le Pakistan, le Royaume-Uni, la France et l'Estonie cherchent aussi à tirer leur épingle du jeu. L'observation des investissements militaires en R&D des États-Unis, de la Russie et de la Chine dans ce domaine démontre en effet l'attrait significatif de ces pays pour l'autonomisation des systèmes d'armes.

Alors que pourraient bientôt arriver sur le champ de bataille de véritables transformations tels que les essaims de drones autonomes ou les SALA, il est indispensable de penser les implications capacitaires et stratégiques que ces technologies auront pour les armées françaises. À cet égard, le besoin militaire, en réponse à la menace prospective, incite à une appropriation aussi rapide que possible des briques technologiques permettant l'autonomisation de certaines fonctions, dans le respect des limites énoncées par le Comité d'éthique de la défense. Le recours croissant à des systèmes d'armes intégrant de l'autonomie met donc en exergue l'importance de la préparation des forces et des personnels, de leur entraînement et de leur formation, de la coordination interarmées, de la planification et de la réflexion – autant de points qui nécessitent des réformes, des adaptations et une certaine exigence professionnelle. En effet, aucune technologie ne peut « dissiper le brouillard de la guerre[180] ». Il est donc primordial de maintenir l'humain dans la boucle décisionnelle, en réfléchissant aux synergies les plus pertinentes entre l'homme et la machine[181].

À l'initiative de la France, les États débattent depuis 2013 de la nécessité d'imposer de nouvelles restrictions à l'utilisation de systèmes d'armes autonomes dans les combats, dans le cadre onusien de la CCAC. Ce que les délégations n'ont pas fait de manière adéquate, cependant, est de développer une perception commune des risques associés à ces systèmes. Pour l'instant, le débat est inhibé par des fantasmes issus de la science-fiction, dans lesquels les humains perdraient le contrôle sur une machine qui finirait par se retourner contre son inventeur[182]. Le traitement

180. P. W. Singer et V. Deville-Fradin. « La guerre connectée : les implications de la révolution robotique », *Politique étrangère*, vol. 78, n° 3, 2013, p. 91-104.
181. R. Briant, « La synergie homme-machine et l'avenir des opérations aériennes », *op. cit.*
182. C. Carpenter, « Rethinking the Political Science Fiction Nexus: Global Policy Making and the Campaign to Stop Killer Robots », *Perspectives on Politics*, vol. 14, n° 1, mars 2016, p. 53–69.

médiatique réservé à ces nouvelles technologies est d'ailleurs imprégné de ces craintes. Ainsi en juin 2021, à la suite de la publication d'un rapport de l'ONU, de nombreux médias titraient que des « drones autonomes » (voire des « robots tueurs ») turcs avaient décidé seuls d'attaquer les troupes antigouvernementales du général Haftar en Libye en mars 2020[183]. Pourtant, à la lecture dudit rapport, rien ne laisse supposer que ces munitions rôdeuses, les *Kargu-2* de la société turque STM, ont agi sans intervention humaine, ni même qu'ils aient fait des victimes[184].

Si l'on en croit la loi de Gabor, « tout ce qui est techniquement réalisable sera réalisé[185] ». Appliqué à la robotique militaire et à l'autonomie, cet axiome ouvre des perspectives aussi prometteuses qu'inquiétantes. Le débat sur l'autonomisation de plus en plus poussée des systèmes d'armes est dès lors loin d'être tranché. Or Raymond Aron disait du choix en politique – et singulièrement en politique étrangère – qu'il implique moins une lutte « entre le bien et le mal [qu'] entre le préférable et le détestable ». Pour faire face aux enjeux soulevés par l'autonomisation des systèmes d'armes, il est donc indispensable de dépasser toute forme de manichéisme, malgré des antagonismes persistants, afin d'identifier des points de convergence.

Il convient enfin de rappeler que dans l'*Iliade*, Héphaïstos ne parvient pas à séduire Athéna, déesse de la sagesse et de la stratégie militaire. À charge donc, pour les armées françaises, de concilier sagesse et efficacité technologique.

183. P. Hérard, « Robots tueurs : des drones autonomes ont attaqué des combattants libyens », TV5 Monde, 2 juin 2021, disponible sur : www.information.tv5monde.com.
184. *Rapport final du Groupe d'experts sur la Libye créé par la résolution 1973 (2011) du Conseil de sécurité*, Organisation des Nations unies, 8 mars 2021.
185. D'après les travaux de Dennis Gabor, qui a reçu le prix Nobel de Physique en 1971.

Les dernières publications des *Focus stratégiques*

- Laurent Bansept et Élie Tenenbaum, « Après Barkhane : repenser la posture stratégique française en Afrique de l'Ouest », *Focus stratégique*, n° 109, Ifri, mai 2022.
- Amélie Férey, « Vers une guerre des normes ? Du lawfare aux opérations juridiques », *Focus stratégique*, n° 108, Ifri, avril 2022
- Clotilde Bômont, « Le *cloud* défense : défi opérationnel, impératif stratégique et enjeu de souveraineté », *Focus stratégique*, n° 107, Ifri, novembre 2021.
- Raphaël Briant, « La synergie homme-machine et l'avenir des opérations aériennes », *Focus stratégique*, n° 106, Ifri, septembre 2021.
- Raphaël Briant, Jean-Baptiste Florant et Michel Pesqueur, « La masse dans les armées françaises : un défi pour la haute intensité », *Focus stratégique*, n° 105, Ifri, juin 2021.
- Laure de Rochegonde et Élie Tenenbaum, « Cyber-influence : les nouveaux enjeux de la lutte informationnelle », *Focus stratégique*, n° 104, Ifri, mars 2021.
- Corentin Brustlein (dir.), « Collective Collapse or Resilience ? European Defense Priorities in the Pandemic Era », *Focus stratégique*, n° 103, Ifri, février 2021.
- Marc Hecker, « Djihadistes un jour, djihadistes toujours ? Un programme de déradicalisation vu de l'intérieur », *Focus stratégique*, n° 102, février 2021.
- Morgan Paglia, « Réparer 2020 ou préparer 2030 ? L'entraînement des forces françaises à l'ère du combat multi-domaine », *Focus stratégique*, n° 101, janvier 2021.
- Jean-Baptiste Florant, « Cyberames : la lutte informatique offensive dans la manoeuvre future », *Focus stratégique*, n° 100, janvier 2021.





27 rue de la Procession 75740 Paris cedex 15 – France

Ifri.org