

Panorama 2025 des technologies émergentes pour la défense

23/04/2025

Introduction

La révolution numérique et l'émergence de technologies de rupture transforment profondément le paysage de la défense. Anticiper les évolutions sur un horizon de 3 à 10 ans est devenu essentiel pour conserver une supériorité stratégique et opérationnelle. Ce panorama des technologies émergentes pour la défense répond à ce besoin d'anticipation : il propose une analyse structurée des signaux faibles et des tendances naissantes susceptibles de façonner les capacités militaires de demain. La démarche repose sur des pratiques de veille stratégique largement reconnues à l'échelle internationale, adaptées aux spécificités opérationnelles et industrielles du secteur de la défense.

Mind2Shake, fondée en 2020, est un agitateur d'innovation au service de la défense et de l'industrie. Nous agissons comme un pont entre innovateurs (start-ups, laboratoires...) et grands acteurs industriels ou institutionnels. Nous accompagnons l'innovation en la contextualisant dans des cas d'usage concrets et en plaçant l'humain au cœur de la transformation. Cette posture d'« agitateur » se traduit par une approche pragmatique : briser les silos organisationnels, favoriser les synergies et accélérer l'adoption de technologies émergentes. Dans nos activités de veille stratégique, nous combinons les méthodes de recherche académique et l'intelligence artificielle pour détecter précocement les tendances porteuses et éclairer les décisions de nos partenaires.

Les signaux faibles identifiés sont regroupés par grands domaines technologiques clés pour la défense ; pour chaque domaine, nous mettons en avant quelques cas d'usage illustratifs afin de rendre tangible l'impact potentiel de ces innovations. Ces exemples concrets – sans prétendre à l'exhaustivité – éclairent les opportunités opérationnelles et les défis à anticiper.

La crédibilité de notre veille est un impératif central : chaque signal faible présenté s'appuie sur des sources fiables et variées (publications scientifiques, rapports officiels, analyses techniques...). En consolidant ces références de qualité, nous assurons que les tendances présentées reposent sur des faits avérés, renforçant la confiance dans ce panorama.

En définitive, notre ambition à travers ce document est d'offrir aux décideurs — qu'ils soient issus de l'industrie ou du ministère des Armées — un outil d'aide à la décision alliant vision stratégique et sens pratique. Ce panorama propose une grille de lecture claire des évolutions technologiques à l'horizon 2030, afin d'éclairer dès aujourd'hui les choix d'investissement et d'innovation qui garantiront la supériorité et la souveraineté technologiques de la défense de demain.

Le tableau ci-dessous présente un résumé de l'ensemble des thématiques abordées, leur maturité, leur intérêt opérationnel, et permet un accès direct à la partie détaillée.

Domaine	Santé militaire				Systèmes autonomes	
Sous domaine	Biotechnologies pour l'amélioration humaine	Médecine régénérative et bio-impression 3D	Capteurs biomédicaux portables et santé augmentée par l'IA	Interfaces cerveau-machine et prothèses neuronales	Essaims de drones autonomes et combat collaboratif	Véhicules autonomes terrestres et systèmes robotiques
Maturité	TRL 3-4	TRL 4-5	TRL 5-6	TRL 4-5	TRL 6-7	TRL 5-6
Intérêt ops	Long terme	Moyen terme	Court-moyen terme	Moyen terme	Court terme	Court-moyen terme
Domaine	Capteurs avancés		Logistique		Cybersécurité	
Sous domaine	Capteurs quantiques pour navigation et détection	Biosenseurs et capteurs chimiques nouvelle génération	Logistique autonome et intelligente	Fabrication additive de pointe sur le terrain	Cryptographie post-quantique et communications sécurisées	IA offensive, attaques adversariales et cybersécurité de l'IA
Maturité	TRL 4-5	TRL 4-6	TRL 6-7	TRL 5-6	TRL 6-7	TRL 4-6
Intérêt ops	Moyen terme	Court-moyen terme	Court terme	Court-moyen terme	Court-moyen terme	Moyen terme
Domaine	Énergie			Matériaux innovants		
Sous domaine	Micro-réacteurs nucléaires portables	Transmission d'énergie sans fil à distance	Stockage d'énergie de nouvelle génération (batteries avancées)	Métamatériaux furtifs et multifonctions	Matériaux auto-réparants et adaptatifs	Matériaux bio-sourcés et transitoires (éphémères)
Maturité	TRL 5-6	TRL 4-5	TRL 5-6	TRL 5-6	TRL 3-4	TRL 4-5
Intérêt ops	Moyen terme	Long terme	Court-moyen terme	Moyen terme	Long terme	Moyen terme

Santé militaire

Sources :

- [CRISPR Cas9 Gene Editing Market Size And Industry Report 2027](#)
- [\(1\) AMR Future Briefl The Pioneering Role of Biotechnology in Transforming Military Operations | LinkedIn](#)
- [NATO - Official text: Summary of NATO's Biotechnology and Human Enhancement Technologies Strategy, 12-Apr.-2024](#)
- [Super-soldiers: augmented humans in wartime - Polytechnique Insights](#)
- [Frontline Genomics: How Biotech is Becoming Integral to NatSec Strategy » Karve](#)

Biotechnologies pour l'amélioration humaine

Les avancées en génétique et biotechnologie laissent entrevoir des soldats « augmentés ». Des techniques comme CRISPR et l'édition de gènes sont explorées pour améliorer les capacités physiques et cognitives des combattants, tandis que des modulateurs épigénétiques pourraient accroître leur résistance au stress. Parallèlement, la recherche sur le microbiome (flore intestinale) et les probiotiques vise à renforcer l'immunité et la résilience psychologique des soldats en environnement extrême. Ces approches restent expérimentales et soulèvent des questions éthiques, mais pourraient révolutionner la préparation du combattant.

Cas d'usage potentiels : Administration de thérapies géniques pré-déploiement pour améliorer l'endurance ou la résistance aux maladies chez les soldats, utilisation de compléments épigénétiques (molécules modulant l'expression des gènes) pour maintenir le calme et les performances cognitives en situation de combat intense, ingestion de probiotiques sur mesure renforçant l'immunité et réduisant le stress en missions de longue durée.

Niveau de maturité : phase de recherche fondamentale et préclinique. Les premières études sur l'animal et des essais de laboratoire montrent des effets prometteurs, mais on est loin d'une application opérationnelle (horizon $\geq 5-10$ ans). Les armées et l'OTAN suivent de près ces évolutions tout en évaluant les risques et enjeux légaux.

L'OTAN a souligné en 2024 que les technologies d'amélioration humaine offrent des opportunités (exosquelettes, neuro-interfaces) mais posent aussi des défis de sécurité et d'éthique.

Médecine régénérative et bio-impression 3D

Les biotechnologies médicales progressent vers des solutions de soin d'urgence sur le terrain autrefois impossibles. L'impression 3D de tissus biologiques (bioprinting) émerge comme un moyen de fabriquer sur place de la peau, des vaisseaux sanguins ou même des organes pour soigner des blessures graves sans évacuation immédiate. Par exemple, des laboratoires militaires testent l'impression de pansements biologiques contenant des cellules du patient pour accélérer la cicatrisation de brûlures. De même, les thérapies à base de cellules souches offrent l'espoir de régénérer des tissus endommagés (muscles, neurones) et de réduire les séquelles à long terme chez les blessés de guerre.

Cas d'usage potentiels : Un module chirurgical déployable capable d'imprimer en 3D une peau artificielle ou un fragment de tissu d'organe pour traiter un soldat blessé par balle, évitant une évacuation d'urgence, utilisation de cellules souches sur le champ de bataille pour reconstructions osseuses ou nerveuses accélérées après traumatisme, réduisant le temps de convalescence, production locale de sang synthétique ou substituts sanguins imprimés pour transfusions en zone isolée (en cours de recherche).

Niveau de maturité : Prototype / démonstrateur en laboratoire. Des organoïdes et tissus simples ont été imprimés avec succès en labo et certains essais in vivo sont en cours. L'armée américaine a financé des projets pilotes de bio-impression transportables. Cependant, l'impression d'organes complets fonctionnels reste un défi technique pour la prochaine décennie.

La littérature signale que la bio-impression « a révolutionné les soins en permettant la production sur site de tissus et organes, pour traiter des blessures graves plus efficacement et réduire les évacuations ». Des rapports de recherche en médecine militaire en 2024 confirment l'essor de protocoles à base de cellules souches pour régénérer muscles et tissus chez les blessés.

Capteurs biomédicaux portables et santé augmentée par l'IA

De nouveaux biocapteurs portables permettent un suivi de santé en continu des soldats et alertent précocement en cas de blessure ou d'exposition à un agent toxique. Ces dispositifs, intégrés dans des vêtements, montres ou patches, mesurent en temps réel les constantes vitales (rythme cardiaque, stress, glycémie, etc.) et détectent des anomalies comme une infection naissante ou la présence de toxines chimique. Couplés à l'intelligence artificielle, ils peuvent analyser les données de centaines de soldats simultanément et prédire certains problèmes médicaux avant qu'ils ne deviennent critiques. L'IA de santé déployée ainsi propose des recommandations personnalisées (hydratation, repos, soins) aux combattants ou aux médecins militaires.

Cas d'usage potentiels : patch cutané intelligent détectant une exposition à un agent biologique ou chimique et alertant immédiatement le soldat et le médecin en poste de commandement, capteur intégré à l'uniforme mesurant la fatigue et le stress, transmettant aux commandants un indice d'épuisement de l'unité afin d'anticiper les relèves, système d'IA de diagnostic embarqué dans un véhicule sanitaire, analysant les données de casques connectés des soldats pour prioriser les évacuations (triage automatisé).

Niveau de maturité : Expérimentation terrain en cours. Certaines armées testent déjà des montres connectées et ceintures biométriques sur des unités pilotes. Les capteurs vitaux de base (cardio, sommeil) sont disponibles commercialement, mais les détecteurs sophistiqués (pathogènes, toxines) sont au stade de prototype de laboratoire. L'intégration IA pour prédire les blessures en est à ses débuts (déploiements restreints d'ici ~3 ans envisagés).

Les programmes militaires récents soulignent que les biosenseurs portables deviennent très sophistiqués, capables de surveiller en continu les signes vitaux et même de déceler précocement une infection ou une intoxication. De plus, l'IA est déjà utilisée pour exploiter ces données et prédire des problèmes de santé avant qu'ils ne deviennent critiques, par exemple en analysant les constantes d'un soldat pour anticiper un coup de chaleur ou une blessure.

Interfaces cerveau-machine et prothèses neuronales

Dans le domaine de la rééducation et de l'augmentation, les interfaces neurales reliées directement au cerveau ouvrent des perspectives inédites pour soigner les blessures et même contrôler des systèmes. Des dispositifs implantables ou externes (casques EEG avancés) permettent à des soldats lourdement blessés de contrôler par la pensée des prothèses robotiques de bras ou de jambe avec une dextérité accrue. Ces mêmes interfaces pourraient, à terme, transmettre des commandes à des drones ou robots, offrant un contrôle mental d'engins (un concept en cours d'exploration par la DARPA). Par ailleurs, les progrès en neuroprothétiques offrent aux amputés une rétroaction sensorielle : par exemple sentir la pression ou la texture via une main artificielle connectée au système nerveux.

Cas d'usage potentiels : permettre à un soldat amputé d'un bras de piloter un drone ou un véhicule terrestre par une interface neuronale, sans recours aux mains, pour rester opérationnel dans une unité de drones, équiper des commandos de casques à commande mentale pour diriger discrètement des essaims de micro-drones de reconnaissance, plus rapidement que par manette (technologie balbutiante), prothèses de membre connectées au nerf restituant le sens du toucher aux blessés de guerre, améliorant nettement leur récupération fonctionnelle.

Niveau de maturité : Expérimental (TRL 4-5). Des essais sur humains ont démontré la faisabilité de contrôler un bras artificiel par la pensée, ou de piloter un simulateur de drone via une interface cerveau-machine. Toutefois, ces dispositifs sont encombrants et nécessitent un environnement contrôlé. On peut espérer des versions portables simplifiées d'ici 5 à 10 ans pour un usage plus courant en réhabilitation. Leur usage en opération (pour contrôler des systèmes en temps réel) est plus lointain et dépendra d'avancées significatives en fiabilité et en cybersécurité (risque de hacking du système neural).

Des rapports de 2024 notent des progrès rapides : « Le développement d'interfaces neurales connectant directement le cerveau à des dispositifs externes progresse rapidement. Ces interfaces aident déjà des soldats blessés à retrouver des fonctions perdues et à contrôler des prothèses avancées par la pensée ». L'OTAN souligne aussi l'intérêt de ces interfaces pour la réhabilitation des militaires et le retour au service actif après blessures graves.

Logistique

Sources :

- [Blockchain for military logistics | Article | The United States Army](#)
- [\(2\) The future of military logistics: how autonomous systems are shaping the battlefield of tomorrow | LinkedIn](#)
- [524. Weapons on Demand: How 3D Printing Will Revolutionize Military Sustainment | Mad Scientist Laboratory](#)
- [Autonomous Vehicles: New Technology Revolutionizes Army's Principles of Sustainment | Article | The United States Army](#)
- [Ruggedized Bioprinter Successfully Prints Medical Products in Austere Environment - Geneva USA](#)

Logistique autonome et intelligente

La chaîne logistique militaire s'automatise grâce à l'IA et à la robotique, pour livrer le bon matériel au bon endroit et au bon moment, sans intervention humaine. Des véhicules autonomes (camions sans conducteur) sont en test pour former des convois robotisés convoyant du ravitaillement sur des itinéraires dangereux. De même, des drones de transport peuvent acheminer du matériel médical ou des munitions sur le dernier kilomètre en contournant les obstacles. Ces systèmes réduisent les risques pour le personnel et augmentent la réactivité en évitant les erreurs humaines. L'IA logistique permet aussi d'optimiser les stocks et les itinéraires : elle anticipe les besoins, gère les entrepôts automatisés et coordonne l'envoi de ressources de manière prédictive. Enfin, des technologies de blockchain sont envisagées pour sécuriser et tracer les flux logistiques de bout en bout, garantissant l'intégrité des données de suivi des colis sensibles.

Cas d'usage potentiels : convois de camions autonomes suivant un véhicule leader ou entièrement pilotés par IA, livrant carburant et vivres à une base avancée sans mobiliser d'escorte humaine, drones de livraison larguant du matériel médical sur une position isolée en zone ennemie, évitant d'exposer un hélicoptère et son équipage, entrepôts militaires intelligents où des robots et l'IA gèrent automatiquement l'inventaire, le conditionnement et l'expédition du matériel aux unités, avec une traçabilité blockchain garantissant l'authenticité des pièces (lutte contre les sabotages de supply chain).

Niveau de maturité : Pilotes avancés. L'US Army a déjà mené des expérimentations de convois de camions robotisés sur route depuis plusieurs années (programme Leader-Follower). Des démonstrateurs de drones logistiques existent et certains ont été déployés pour des tests terrain. On estime une adoption progressive d'ici ~5 ans sur des tâches de soutien non critiques, le temps d'éprouver la fiabilité. L'IA de gestion logistique est, elle, déjà intégrée dans certains systèmes d'information militaires, mais son autonomie totale (prise de décision sans validation humaine) reste limitée par prudence.

Des spécialistes en logistique militaire décrivent « des opérations de supply chain intégralement gérées par des machines, du magasin jusqu'au front. On imagine des bases presque entièrement pilotées par des systèmes IA capables de prévoir la demande, allouer les ressources et déployer les livraisons de manière autonome ». Les avantages attendus sont une efficacité et une fiabilité sans précédent, en éliminant erreurs et retards.

Fabrication additive de pointe sur le terrain

L'impression 3D (fabrication additive) s'impose comme une solution logistique disruptive, permettant de fabriquer sur le terrain des pièces de rechange et du matériel à la demande. Au lieu d'attendre des livraisons longues et risquées, les forces déployées pourront produire localement des composants d'armes, de véhicules ou des drones entiers. Des imprimantes 3D robustes, éventuellement embarquées dans des conteneurs, pourront utiliser des plans numériques sécurisés pour imprimer tout objet nécessaire – du simple composant de moteur jusqu'à des structures plus complexes. Cela raccourcit énormément la chaîne d'approvisionnement et réduit la dépendance aux bases arrière. En parallèle, des progrès en matériaux imprimables (métaux avancés, composites, explosifs imprimés) étendent le champ d'application. Pour garantir l'authenticité et la qualité, la blockchain peut sécuriser le « fil numérique » de ces pièces, empêchant la falsification des fichiers de conception ou l'utilisation non autorisée.

Cas d'usage potentiels : un régiment en opération imprime sur place, en quelques heures, une pièce de char endommagée (pignon, joint...) à partir du plan 3D envoyé par l'arrière, rétablissant la disponibilité du véhicule sans délai, fabrication en avant-poste de drones

sur mesure : à partir de matériaux bruts et de plans numériques, production d'une flotte de petits UAV de reconnaissance adaptée au terrain local, ateliers mobiles d'impression 3D intégrés dans des conteneurs, déplacés au plus près du front pour fournir en continu munitions spéciales, pièces détachées critiques, voire des équipements médicaux (attelles, prothèses d'urgence).

Niveau de maturité : En progression rapide. Les armées américaine et française expérimentent l'impression 3D en contexte militaire depuis quelques années (impression de casques, de pièces de véhicule, etc.). On a vu dès 2022-2023 des makers improviser des armes ou drones imprimés en zone de conflit. Aujourd'hui, l'enjeu est d'industrialiser ces pratiques : des prototypes d'unités de fabrication additive déployables existent, et l'US Army vise une capacité généralisée à horizon 2030. La fiabilité des machines en conditions de terrain et la formation du personnel restent des défis à résoudre dans les 3-5 ans.

Un des articles de prospective analysé note que « la révolution de l'impression 3D bouleverse la logistique en permettant de raccourcir la chaîne d'approvisionnement et de fabriquer localement, réduisant vulnérabilité et délais. L'armée américaine envisage une approche hybride : stocker seulement les pièces les plus critiques et imprimer le reste à la demande au plus près du front. Des exemples concrets en Ukraine et au Moyen-Orient montrent déjà des combattants imprimant armes et drones pour pallier le manque d'équipements.

Capteurs avancés

Sources :

- [DARPA eyeing new quantum sensing program | DefenseScoop](#)
- [\(2\) AMR Future Brief| The Pioneering Role of Biotechnology in Transforming Military Operations | LinkedIn](#)
- ['Passive' Radar Can Give Soldiers Stealth in Urban Battlegrounds](#)
- [Armed with quantum sensors, France eyes leaps in electronic warfare](#)
- [NATO - News: Using quantum technologies to make communications secure, 27-Sep.-2022](#)
- [For Morphing Chem-Bio Threat, Best Defense Is More Defense](#)
- [Bringing New Technologies to Bear for Biosurveillance | RAND](#)

Capteurs quantiques pour navigation et détection

Les capteurs quantiques exploitent les propriétés de la physique quantique pour atteindre des sensibilités impossibles aux capteurs classiques. Dans un horizon de 3-10 ans, ils pourraient équiper des plateformes militaires pour deux applications majeures : la navigation PNT (positionnement, navigation, temps) alternative et la détection furtive. Par exemple, un accéléromètre quantique ultra-précis ou un capteur de champ magnétique quantique permettrait à un navire ou avion de se localiser avec précision en mesurant les anomalies du champ gravitationnel/magnétique terrestre – et ce même en cas de brouillage GPS. De même, des capteurs quantiques de nouvelle génération pourraient détecter des variations infimes de champ électromagnétique ou gravitationnel, révélant la présence de sous-marins, de tunnels ou d'appareils furtifs autrefois indétectables. La DARPA investit via son programme RoQS (Robust Quantum Sensors) pour rendre ces capteurs robustes aux contraintes du terrain (vibrations, interférences).

Cas d'usage potentiels :

- Navigation inertielle quantique : un sous-marin ou missile stratégique équipé d'une unité de navigation quantique maintient le cap avec une dérive quasi nulle, même sans GPS, grâce à des gyroscopes et horloges atomiques ultra-stables.
- Détection de structures enterrées : un avion de surveillance embarquant un gradiomètre quantique détecte depuis le ciel des vides souterrains ou bunkers via les anomalies de gravité, améliorant le renseignement sur des installations camouflées.
- Recherche anti-furtivité : un radar passif couplé à un capteur quantique de champ magnétique repère la signature d'un avion furtif en vol en mesurant la perturbation minuscule qu'il impose au champ magnétique terrestre.

Niveau de maturité : Prototype labo / début d'industrialisation. Les capteurs quantiques (horloges atomiques, gyromètres) existent en laboratoire avec des performances inégalées, mais sont souvent encombrants et sensibles. La tendance actuelle est à la

miniaturisation (ex. capteurs à atomes froids transportables). On s'attend à des démonstrations embarquées sur plateformes militaires d'ici 5 ans, et à des premières applications opérationnelles isolées (~10 ans) notamment pour la navigation dans les forces sous-marines.

Le Pentagone considère déjà que les capteurs quantiques offrent des capacités prometteuses en navigation alternative et ISR (renseignement, surveillance, reconnaissance. L'article de fin 2024 souligne que ces capteurs, éprouvés en laboratoire (mesure de champs magnétiques, de rotation, de gravité avec une précision extrême), doivent maintenant être intégrés sur des plateformes mobiles réelles – c'est l'objet du programme DARPA RoQS. L'objectif est de préserver les performances quantiques même en environnement mouvant, afin de doter le DoD de capteurs résistants au brouillage et offrant un avantage technologique net.

Biosenseurs et capteurs chimiques nouvelle génération

La menace NRBC (nucléaire, radiologique, biologique, chimique) impose des capteurs toujours plus réactifs et sensibles. Une tendance émergente est l'emploi de systèmes bio-inspirés ou vivants pour la détection. Des chercheurs développent par exemple des micro-organismes synthétiques programmés pour réagir à la présence de toxines ou d'agents pathogènes en émettant un signal mesurable. Ces biosenseurs pourraient être déployés sur le terrain (sous forme de bandes de capteurs, de poudres disséminables, etc.) pour servir d'alerte avancée d'une attaque chimique/biologique. Par ailleurs, les capteurs électroniques évoluent : de nouveaux détecteurs hyperspectraux et infrarouges, rendus plus performants par des matériaux comme le graphène ou des métamatériaux, pourront identifier des signatures chimiques à distance ou à travers des obstacles. Enfin, des systèmes passifs se développent – par exemple le radar passif ou capteur acoustique passif – utilisant l'environnement (ondes radio ambiantes, bruits) pour détecter sans dévoiler sa position. Cela s'avère particulièrement utile en zone urbaine ou pour la discrétion des forces spéciales.

Cas d'usage potentiels :

- Réseau de biosenseurs dispersables : de petits capteurs contenant des bactéries modifiées qui brillent ou changent de couleur en présence d'un neurotoxique de combat, permettant à une unité d'avoir en quelques minutes une cartographie du danger chimique.
- Détecteur portable multi-spectral : un soldat équipé d'un détecteur à base de graphène scanne un bâtiment et identifie à travers un mur des émanations de poudre ou d'explosifs, ou repère la signature infrarouge atypique révélant une cache d'armes.
- Radar passif de poche : un dispositif léger captant les ondes radio FM/TV ambiantes pour repérer le déplacement d'un drone ennemi en ville, sans aucune émission active (inspiré de systèmes comme le Silentium Maverick).

Niveau de maturité : Variable selon la technologie. Les capteurs chimiques électroniques classiques sont déjà employés, mais les versions améliorées (basées sur des nanomatériaux comme le graphène) sont en phase de prototypage avancé en laboratoire. Les biosenseurs sont en recherche appliquée : certains ont démontré la détection d'agents en conditions contrôlées, mais les déployer de manière fiable en opération nécessite de surmonter des contraintes (durée de vie des micro-organismes, fausses alertes). On peut espérer des premiers systèmes hybrides (bio-élément + électronique) testés sur le terrain sous 5 ans. Le radar passif, lui, a fait ses preuves dans l'industrie civile; des startups proposent déjà des versions militarisées pour la surveillance aérienne urbaine, ce qui suggère une possible adoption très prochaine dans les forces.

Les publications soulignent que les biosenseurs et systèmes de détection biologiques redéfinissent la défense NRBC : « Des biosenseurs portables détectant en continu les toxines ou signes précoces d'infection... des capteurs environnementaux identifiant agents chimiques, biologiques, radiologiques sur le terrain pour une alerte précoce ». De plus, l'essor de capteurs passifs est noté : un média de défense décrit un radar passif exploitant les ondes civiles qui « fournit la même information qu'un radar traditionnel (distance, vitesse) sans aucune émission, idéal en milieu urbain pour détecter drones et avions sans révéler la position des forces ».

Matériaux innovants

Sources :

- [Advancing Stealth: Chinese Scientists Develop Meta-Materials-Based Radar Cloaks – International Defense Security & Technology](#)
- [Army Researchers Dream New Self-Healing Material Will Lead to 'Terminator' Technology | Military.com](#)
- [\(3\) AMR Future Brief| The Pioneering Role of Biotechnology in Transforming Military Operations | LinkedIn](#)
- <https://www.defenseone.com/technology/2015/10/military-wants-vampire-drones-die-sun/122722/>

Métamatériaux furtifs et multifonctions

Les métamatériaux sont des matériaux artificiels conçus pour manipuler les ondes (électromagnétiques, acoustiques) de façon inédite. Dans la défense, ils ouvrent la voie à une nouvelle génération de revêtements furtifs et d'antennes compactes. Des métamatériaux à base de structures résonantes imprimées pourraient rendre un objet quasiment invisible sur de larges bandes de fréquences en courbant les ondes radar autour de lui – c'est le concept de la « cape d'invisibilité » désormais crédible pour certaines applications. Contrairement aux revêtements furtifs actuels limités en bande de fréquence, ces absorbeurs métamatériaux peuvent être ultra-minces et efficaces du radar L au radar X, sans pénaliser l'aérodynamisme. En outre, les métamatériaux servent à fabriquer des antennes ultraplates et à gain élevé pour communications et brouillage, ou des boucliers contre les infrarouges (camouflage thermique). La Chine notamment revendique des avancées majeures en intégrant des métamatériaux dans ses avions (réduction de 10 à 30 dB du signal radar sur une large gamme). Ces matériaux peuvent aussi conférer de la légèreté et de la robustesse (ex : structures alvéolaires plus résistantes).

Cas d'usage potentiels :

- Revêtement d'un drone par un film métamatériau adaptatif qui absorbe ou dévie les ondes radar sur tout le spectre des radars militaires, le rendant quasi indétectable tout en étant très léger.
- Antennes métamatériaux intégrées dans la carlingue d'un avion, sans appendice, offrant des communications longue portée ou du brouillage électronique très directionnel, avec une taille réduite de 80%.
- Camouflage actif de véhicule : un blindé recouvert d'un métamatériau optique qui module l'apparence visuelle et infrarouge du char (par ex, imite la température ambiante) pour le fondre dans le décor et échapper aux caméras thermiques.

Niveau de maturité : En cours de transition labo→terrain. Depuis les premières preuves de concept en 2006, on est passé à des démonstrateurs de capes radar 2D et de petites antennes métamatériaux. Certains chasseurs de 5e génération intègrent possiblement des éléments métamatériaux dans leurs antennes ou revêtements (informations classifiées). La R&D est intense : d'ici 3 à 5 ans, on peut s'attendre à des kits de métamatériaux appliqués sur des plates-formes existantes pour en mesurer les gains en furtivité. L'adoption large viendra quand les coûts baisseront et la durabilité en conditions réelles sera prouvée.

D'après l'article, « les métamatériaux s'imposent comme technologie transformatrice pour la furtivité, offrant un contrôle sans précédent des ondes. On peut désormais envisager des absorbeurs minces, larges-bandes, et même des dispositifs de type invisibilité optique en courbant la lumière ». Des rapports indiquent que la Chine a réalisé des percées (absorbeurs accordables, surfaces sélectives actives) permettant de rendre des avions plus furtifs, plus légers et moins coûteux à produire, en réduisant fortement leur signature radar sur 0,3–40 GHz. Enfin, l'intégration de métamatériaux dans les antennes améliorerait portée et précision du brouillage tout en réduisant la signature IR des appareils.

Matériaux auto-réparants et adaptatifs

Inspirés par la nature (peau, os), les chercheurs développent des matériaux capables de se réparer eux-mêmes après un endommagement. L'Armée américaine a par exemple créé un nouveau polymère époxy 3D printable qui peut se reconfigurer et se régénérer automatiquement lorsqu'il est cassé ou perforé. À terme, ce type de matériau pourrait conférer aux drones et robots une sorte de résilience « Terminator » : une aile de drone se fissure en vol, le matériau se ressoude ; un robot subit un impact, sa carapace polymère absorbe le choc puis se répare. Certains de ces matériaux ont en plus une mémoire de forme : ils changent de forme en réponse à un stimulus (chaleur, champ magnétique) puis reviennent à l'état initial. Couplés avec des capteurs, on parle de matériaux « intelligents » capables de s'adapter à leur environnement sans intervention. Par exemple, un blindage pourrait durcir ou s'assouplir selon l'impact attendu. Ces innovations visent à augmenter la durabilité des équipements et réduire le besoin en maintenance.

Cas d'usage potentiels :

- Un drone de reconnaissance en matériaux auto-cicatrisants qui peut voler à travers des obstacles : s'il subit de petites déchirures sur ses ailes flexibles, celles-ci se recollent en quelques minutes sous l'effet de la chaleur dégagée par l'électronique.
- Un véhicule terrestre autonome avec une coque en polymère spécial capable de combler automatiquement des trous causés par des éclats d'obus, préservant ses composants internes.
- Des composants d'armes à feu ou de machines imprimés en matériau auto-réparant qui prolongent leur propre durée de vie en réduisant l'usure (par exemple, un silencieux de fusil qui se reconstitue pour atténuer l'érosion due aux gaz brûlants).

Niveau de maturité : Recherche appliquée / prototypage. Les premiers matériaux auto-réparants existent (revêtements polymères qui se « referment » sous l'effet de la chaleur ou de l'humidité). Dans le civil, on a démontré des bétons auto-cicatrisants ou des peintures de voiture qui s'auto-lissent. Pour les applications de défense, l'ARL (Army Research Lab) a présenté en 2020 un polymère imprimable se réparant et changeant de forme. On en est au stade de démonstrateurs en laboratoire (petites pièces se ressoudant). L'intégration sur un système complet (drone, robot) pourrait advenir d'ici 5 ans dans le meilleur des cas, avec des fonctions limitées. La vision long-terme (plateforme quasi-organique se reconfigurant comme dans Terminator 2) est plutôt à 10+ ans, dépendant de progrès en chimie des matériaux et en énergie embarquée.

L'article de Military.com titrait que l'ARL et Texas A&M conçoivent « un polymère 3D imprimable qui peut changer de forme et se guérir de lui-même », l'envisageant pour de futurs véhicules aériens et robotiques. Le chercheur principal évoquait une plateforme future aux caractéristiques de reconfiguration du T-1000 de Terminator 2. Cette analogie illustre l'ambition derrière ces matériaux : fournir structure, détection et réponse simultanément, en s'adaptant sans contrôle externe aux dégâts subis.

Matériaux bio-sourcés et transitoires (éphémères)

Deux tendances complémentaires émergent : l'utilisation de matériaux d'origine biologique pour les équipements, et la création de matériaux transitoires qui disparaissent volontairement après usage. D'une part, les biosynthèses permettent de produire des matériaux performants : par exemple, des armures en biopolymères inspirés de la soie d'araignée offrent une protection élevée tout en étant plus légères et flexibles que les Kevlar traditionnels. Des vêtements ou blindages pourraient ainsi être cultivés par des micro-organismes, réduisant les coûts et la dépendance à certaines matières premières stratégiques. D'autre part, le besoin opérationnel de ne pas laisser de traces sur le terrain a conduit DARPA à lancer des programmes comme VAPR et ICARUS visant des drones et capteurs autodestructibles. Il s'agit de concevoir des matériaux (notamment polymères) qui, sur commande ou au bout d'un certain temps, se dégraderont en quelques heures en ne laissant quasi aucun résidu détectable. L'exemple est un mini-drone de livraison dont la structure en polymère spécial se sublime en gaz au lever du soleil, évitant qu'il tombe aux mains de l'ennemi. Ces matériaux éphémères garantissent la furtivité logistique et la sécurité technologique (aucun équipement sensible à récupérer par l'adversaire).

Cas d'usage potentiels :

- Armure corporelle bio-sourcée : un gilet pare-balles tissé à partir d'une soie d'araignée synthétique extrêmement résistante et légère. Après usage, le gilet pourrait être composté ou fondu pour recyclage, réduisant l'empreinte logistique.
- Drone de ravitaillement éphémère : largué de nuit avec du sang pour une unité isolée, il est programmé pour s'auto-détruire au lever du jour – sa structure en polymère spécial se volatilise sans bruit en ~30 minutes. L'ennemi ne peut ni détecter ni récupérer ce drone après sa mission.
- Capteurs jetables : de petits capteurs (caméras, micros) déposés en zone ennemie, fabriqués en électronique transitoire (sur substrat en soie ou en verre soluble). Ils collectent du renseignement pendant 24h puis se dissolvent sous l'effet de l'humidité, ne laissant aucune trace exploitable.

Niveau de maturité : Progression notable ces dernières années. Les matériaux bio-sourcés sont déjà utilisés dans certaines applications (ex : fibre de lin dans des composites). Les biopolymères ultra-résistants, comme la soie synthétique, sont encore coûteux mais les procédés s'améliorent (possibles applications d'ici 3-5 ans pour du textile militaire haute performance). Les matériaux transitoires, eux, ont fait l'objet de démonstrations : DARPA a annoncé dès 2015 avoir réussi à faire disparaître de petites structures polymères et certains composants électroniques fragiles. En 2020, un drone concept a été testé, se désagrégeant partiellement. On

peut s'attendre à ce que d'ici 2-3 ans des capteurs éphémères soient disponibles pour les forces spéciales. Les drones complets évanescents sont un challenge plus grand (voler tout en étant frangible) mais un prototype opérationnel est envisageable ~2030.

Un rapport Allied Market Research mentionne « le développement de matériaux biosynthétiques, tels que des armures ou vêtements en biopolymères, offrant protection et durabilité accrues sur le champ de bataille. Sur les matériaux transitoires, le programme DARPA ICARUS a été largement médiatisé : « développer des avions de livraison qui disparaissent en moins de 4 heures après leur mission... en s'appuyant sur les progrès en polymères sublimables (solide→gaz). Defense One parlait de *« drones vampires qui meurent au lever du soleil » pour imager cette innovation.

Cybersécurité

Sources :

- <https://defensescoop.com/2024/10/24/dod-cryptographic-modernization-effort-challenges/>
- [Pentagon Warns AI Warfare Risks Unknown, Launches SABER Program to 'Red Team' AI Battlefield Systems - The Debrief](#)
- [DARPA Selects Researchers to Accelerate Use of Fully Homomorphic Encryption](#)
- [Silent Swarm Exercise Accelerates Navy's Path To Distributed Electronic Warfare Future](#)
- [AI in Defense: Navigating Concerns, Seizing Opportunities](#)

Cryptographie post-quantique et communications sécurisées

L'avènement des ordinateurs quantiques menacera à moyen terme les algorithmes de chiffrement actuels. Un adversaire disposant d'une telle puissance pourrait casser en quelques heures des communications autrefois secrètes. En anticipation, un grand effort de migration cryptographique est en cours : de nouveaux algorithmes dits post-quantiques (PQC) viennent d'être standardisés et devront être déployés avant que la menace ne se concrétise. Ces algorithmes (ex : CRYSTALS-Kyber, Dilithium, etc.) résistent aux attaques quantiques connues et remplaceront RSA, Diffie-Hellman et autres dans les systèmes militaires. Le défi est colossal car il faut mettre à jour des millions d'équipements et réseaux, du niveau stratégique jusqu'aux radios tactiques. Parallèlement, des solutions de communication quantique (comme la distribution quantique de clés, QKD) sont explorées pour certaines liaisons ultra-sensibles, offrant une sécurité prouvable (toute interception modifie le message). Enfin, des techniques comme le double chiffrement (double-wrap) ou l'emploi en parallèle de plusieurs schémas cryptographiques sont envisagées en transition pour renforcer la confiance. L'objectif global est de garder une longueur d'avance sur les capacités de calcul adverses.

Cas d'usage potentiels :

- Mise à niveau des réseaux de communication militaires (satellites, radios, etc.) avec des suites cryptographiques post-quantiques : par ex., une radio logicielle sur le terrain utilise Kyber pour échanger ses clés de session au lieu du Diffie-Hellman classique.
- Utilisation de liens quantiques pour communications stratégiques : un câble fibre optique entre deux centres de commandement emploie la QKD pour échanger des clés, garantissant le secret des ordres de lancement.
- Chiffrement homomorphe côté renseignement : des données classifiées restent chiffrées même pendant leur traitement sur un cloud partagé, grâce à des algorithmes homomorphes permettant de calculer sans déchiffrer, assurant qu'une fuite de données ne révèle rien d'utile (encore très coûteux en calcul aujourd'hui).

Niveau de maturité : Standardisation en cours, déploiements pilotes. En 2024, le NIST a finalisé un premier ensemble d'algorithmes post-quantiques. Le Département de la Défense américain prévoit migrer ses systèmes critiques vers ces algos d'ici 2035, un calendrier serré compte tenu de l'ampleur de la tâche. Certains équipements récents intègrent déjà des solutions PQC en test. La communication quantique reste limitée à des démonstrations (QKD sur quelques dizaines de km de fibre ou via un satellite expérimental chinois). On peut la voir se généraliser sur des liaisons gouvernementales fixes sous 5-10 ans. Le chiffrement homomorphe est plus jeune : la DARPA a un programme (DPRIVE) pour accélérer son utilisation en réduisant le coût calculatoire, on en est aux prototypes matériels.

L'article DefenseScoop cite le Deputy CIO du Pentagone indiquant que la modernisation cryptographique est désormais une priorité absolue, avec le besoin de « développer à temps des algorithmes résistants aux quantiques pour contrer ce sur quoi pourrait travailler l'adversaire. En août 2024, le NIST a publié 3 nouveaux algorithmes post-quantiques finalisés et vise une migration des systèmes critiques d'ici 2035. Par ailleurs, DARPA souligne l'intérêt d'approches innovantes comme le chiffrement homomorphique permettant de sécuriser les données « qu'elles soient au repos, en transit ou en cours d'utilisation », bien que son coût soit un frein qu'un accélérateur matériel dédié pourrait lever.

IA offensive, attaques adversariales et cyberdéfense de l'IA

L'intelligence artificielle n'est pas que bénéfique, elle devient aussi une arme à double tranchant dans le cyberspace. On voit émerger des menaces comme les attaques adversariales contre les systèmes d'IA : un ennemi peut exploiter les faiblesses d'un algorithme de vision ou de décision embarqué (par exemple en manipulant ses données d'entrée) pour le tromper. Cela pourrait faire identifier faussement une cible ou neutraliser un véhicule autonome. DARPA a d'ailleurs lancé le programme SABER pour constituer une équipe de red teaming spécialisée en IA, chargée d'attaquer nos systèmes IA afin d'y déceler les vulnérabilités avant l'ennemi. Parallèlement, les acteurs malveillants utilisent l'IA de leur côté : génération de deepfakes de plus en plus crédibles pour des opérations d'influence ou usurpations d'identité, élaboration de malware évolutifs pilotés par IA, automatisation de la recherche de failles zero-day par des algorithmes. Face à cela, la cyberdéfense s'adapte en incorporant l'IA elle-même (détection d'anomalies réseau par apprentissage, analyses comportementales automatisées) et en développant des contre-mesures aux attaques adversariales (IA robustes, filtres). On parle aussi de plus en plus de Zero Trust étendu aux modèles d'IA : vérifier l'intégrité et l'authenticité des modèles déployés (pas de backdoor insérée par un adversaire).

Cas d'usage potentiels :

- Des hackers d'État utilisent un LLM malveillant pour générer en masse des courriels de phishing hyper-personnalisés et quasiment indétectables, afin de tromper des personnels militaires – obligeant à renforcer les entraînements anti-phishing et les filtres d'email par IA.
- Lors d'un conflit, l'ennemi envoie de faux signaux et images spécialement calibrés (attaques adversariales) pour leurrer les systèmes de reconnaissance automatisés d'un drone : la caméra IA du drone voit un char ami là où il y a un char ennemi camouflé, par exemple.
- En réponse, les armées mettent en place une équipe "Red Team IA" qui teste toutes les nouvelles plateformes autonomes (drones, robots) en les attaquant virtuellement avec des scénarios adversariaux, afin de corriger les failles avant déploiement.

Niveau de maturité : Menace naissante, prise de conscience élevée. Des attaques adversariales réussies ont été démontrées en laboratoire (y compris sur des véhicules autonomes civils). Aucune utilisation massive n'est encore connue publiquement sur le terrain militaire, mais le Pentagone anticipe activement ce risque. Les grands commandements (DOD, DHS) ont émis en 2023-2024 des directives pour durcir les modèles d'IA et surveiller l'utilisation malveillante de l'IA générative. On peut s'attendre à ce que d'ici 1-3 ans, des incidents impliquant des deepfakes ou des leurres IA se produisent lors d'opérations, si ce n'est déjà le cas de façon dissimulée. La course est engagée entre offense et défense IA.

Le DARPA a déclaré en 2024 : « les attaques adversariales 'théoriques' sur l'IA n'ont pas encore été observées en opération, donc les risques restent mal connus, d'où le lancement de SABER pour évaluer et mitiger les vulnérabilités des systèmes IA sur le champ de bataille. Le programme SABER va réunir une équipe d'experts pour tester les systèmes autonomes militaires à l'aide d'attaques IA avancées, afin de développer des stratégies de défense. Par ailleurs, le département Homeland Security aux USA a averti que les adversaires vont « tirer parti de l'IA pour produire de la désinformation plus crédible et des cyberattaques plus sophistiquées » dès 2024, ce qui pousse à investir dans des contre-mesures basées sur l'IA également.

Énergie

Sources :

- [Department of Defense Breaks Ground on Project Pele Microreactor | Department of Energy](#)



cdr@mind2shake.com
Agitateur & Innovations
71/73 rue Desnouettes 75015 Paris
SIRET | 888 850 815 00026

- [U.S. Army Seeks Microreactor Nuclear Power Plant Solutions for Military Bases | Microgrid Knowledge](#)
- [Raytheon to Build Power Beaming Solutions for US Army](#)
- [POWER Program Selects Teams to Design Power Beaming Relays](#)
- [Batteries as a Military Enabler - War on the Rocks](#)
- [Rechargeable Lithium Metal Battery Technology Revolutionizes Drone Capabilities for Defense Applications | AUVSI](#)
- [Israeli Firm Unveils 'Groundbreaking' Military Battery System](#)

Micro-réacteurs nucléaires portables

Pour garantir une source d'énergie fiable et continue sur les théâtres d'opération reculés, les armées misent sur de mini-réacteurs nucléaires transportables. Il s'agit de réacteurs compacts (quelques mégawatts) tenant dans un conteneur, capables d'alimenter une base avancée en électricité pendant plusieurs années sans ravitaillement en combustible. Des projets comme Project Pele aux États-Unis développent des micro-réacteurs à haut flux refroidis au gaz capable d'être déplacés par route ou avion. L'idée est d'assurer l'alimentation des systèmes d'armes énergivores (radars, lasers), des communications et du soutien de vie, tout en réduisant drastiquement les convois de carburant (point vulnérable). Ces réacteurs intègrent des sécurités passives avancées pour éviter tout accident (arrêt automatique en cas de problème) et des protections contre les menaces (blindage contre-attaques). À l'horizon 2030, on prévoit le déploiement de prototypes sur certaines bases tests. Si ces centrales miniatures tiennent leurs promesses, elles changeront la logistique énergétique militaire en offrant de l'énergie abondante, sur place et sans dépendre de fournisseurs extérieurs.

Cas d'usage potentiels :

- Une base opérationnelle dans une région austère (arctique ou désert) installant un micro-réacteur 5 MW pour couvrir ses besoins : alimentation des systèmes anti-aériens, désalinisation de l'eau, recharge de véhicules électriques et drones, etc., le tout sans une goutte de fioul à convoier.
- En situation de catastrophe, l'armée déploie un réacteur portable pour restaurer rapidement le courant sur un aéroport ou un hôpital, soutenant ainsi une mission humanitaire ou le rétablissement d'infrastructures critiques.
- Flotte navale : un porte-drones ou un futur navire de moindre tonnage équipé d'un micro-réacteur au lieu d'un réacteur classique, lui conférant autonomie et compacité (concept exploré pour des navires de surface autonomes robustes).

Niveau de maturité : Prototype proche du déploiement. Le DoD américain a lancé des appels d'offres et compte déployer un prototype de micro-réacteur sur une base d'ici 2030. Le projet Pele a franchi l'étape de conception détaillée en 2022 et la construction du prototype a démarré en 2023. D'autres pays (Russie, Chine) développent aussi des petits réacteurs mobiles (notamment pour l'arctique). Il reste à valider la sûreté en exploitation réelle et la logistique (transport, démantèlement). Probablement que dès la fin de la décennie, une ou deux bases isolées seront alimentées par cette technologie à titre expérimental, avant une adoption plus large si le retour d'expérience est concluant.

L'article de Microgrid Knowledge rapporte : « L'armée prévoit de déployer un prototype de micro-réacteur sur une installation aux États-Unis d'ici 2030. En cas de succès, la technologie pourrait être utilisée sur des bases dans le monde entier. La Défense y voit un moyen de renforcer la résilience énergétique des bases face aux pannes et sabotages, grâce à une source fiable, continue et sans carbone. Le Congrès US a souligné l'importance de mener la course sur ces réacteurs pour équiper les sites critiques en énergie ininterrompue dans les environnements austères.

Transmission d'énergie sans fil à distance

La puissance dirigée n'est pas réservée aux armes laser : elle peut aussi servir à transporter l'énergie. La vision est d'acheminer de l'électricité à un équipement distant par faisceau laser ou micro-ondes, éliminant ainsi la nécessité de câbles ou de transporter des batteries. En 2024, l'armée américaine a confié à un industriel le développement de systèmes de power beaming capables d'envoyer des kilowatts sur plusieurs kilomètres. Concrètement, une station émettrice convertit de l'électricité en un rayon (laser infrarouge collimaté, ou faisceau radio) pointé vers une cible réceptrice (panneau photovoltaïque spécial ou antenne). Le récepteur reconvertit le rayon en électricité utilisable. Cette technologie permettrait par exemple de ravitailler en vol un drone électrique, d'alimenter un

capteur en hauteur en permanence, ou de fournir de l'énergie à une unité au sol depuis un avion ou un satellite. Les avantages stratégiques sont considérables : moins de carburant et de batteries à transporter, possibilité d'alimenter des opérations discrètement depuis l'arrière, réduction de la dépendance à des points de ravitaillement vulnérables. Les efforts actuels cherchent à améliorer le rendement de conversion et la sécurité (éviter tout danger pour le personnel traversant le faisceau).

Cas d'usage potentiels :

- Un essaim de drones de surveillance à longue endurance qui se rechargent en vol : un avion relais vole à haute altitude et balaie les drones avec un laser d'alimentation, prolongeant indéfiniment leur mission sans qu'ils aient à atterrir.
- Une base avancée dépourvue d'approvisionnement en fuel reçoit de l'énergie depuis l'arrière via un réseau de relais optiques au sol (miroirs dirigeant le faisceau) : une centrale à l'arrière envoie 10 kW par laser jusqu'à 50 km via des stations intermédiaires, alimentant le camp isolé.
- Capteurs ou balises disséminés en territoire hostile fonctionnant sans pile : un drone ou satellite passe périodiquement leur envoyer de l'énergie par micro-ondes focalisées, assurant leur fonctionnement continu.

Niveau de maturité : Démonstrations initiales. La DARPA a lancé en 2022 le programme POWER pour réaliser un relais optique aéroporté capable de transmettre ~10 kW sur de longues distances. En 2023, des essais ont réussi à envoyer quelques kilowatts sur 1 km avec un laser, et à alimenter un drone léger en vol stationnaire. Raytheon a reçu un contrat fin 2024 pour développer ces technologies pour l'Armée de Terre. On peut envisager un premier déploiement limité (par ex. recharger un drone à partir d'une station au sol) d'ici 3 à 5 ans. Toutefois, transmettre de grosses puissances sur des dizaines de km avec fiabilité reste un défi technique (diffraction, météo, alignement précis). Il est raisonnable de penser que dans ~10 ans, les unités de terrain auront des générateurs sans fil point-à-point opérationnels pour certaines applications de niche.

Un communiqué de novembre 2024 indique : « Le DoD a confié à Raytheon un contrat pour développer des technologies d'alimentation sans fil par énergie dirigée pour l'US Army ». L'objectif est de créer des émetteurs et récepteurs capables de tests longue distance conformément aux besoins des systèmes habités et non-habités. Raytheon souligne que cette approche réduira le besoin d'emporter du fuel et des batteries, optimisant la durée des opérations et diminuant la dépendance à des dépôts logistiques vulnérables. Ces efforts s'inscrivent dans la stratégie du Pentagone pour assurer la distribution d'énergie en combat moderne, y compris via le programme DARPA POWER inauguré en 2022 pour des relais optiques aéroportés.

Stockage d'énergie de nouvelle génération (batteries avancées)

Les batteries sont devenues vitales pour alimenter drones, véhicules électriques, équipements du soldat et armes à énergie dirigée. Les prochaines générations de batteries offriront beaucoup plus d'énergie et de puissance pour un poids donné, tout en étant plus sûres. Parmi les technologies émergentes figurent les batteries à électrolyte solide (dites batteries tout-solide), qui promettent une densité énergétique supérieure de 50% ou plus et un risque d'incendie réduit par rapport aux lithium-ion actuelles. D'autres chimies comme le lithium-soufre ou le lithium-air sont explorées pour atteindre des densités deux à cinq fois supérieures, ce qui se traduirait par des drones volant 70% plus loin ou des radios fonctionnant des jours sans recharge. En parallèle, des améliorations d'architecture (nanostructuration des électrodes, batteries bipolaires) permettent d'augmenter la puissance de décharge – crucial pour des lasers ou radars mobiles nécessitant un appel de courant intense. Le défi est aussi d'assurer l'approvisionnement : diminuer les métaux critiques (cobalt, nickel) et diversifier les sources pour ne pas dépendre de fournisseurs uniques. Enfin, l'armée investit dans des traitements et diagnostics pour prolonger la durée de vie et l'utilisation en conditions extrêmes (froid polaire, chaleur désertique).

Cas d'usage potentiels :

- Un drone de combat électrique bénéficiant d'une batterie tout-solide offrant 50% d'autonomie en plus que ses prédécesseurs Li-ion – par ex., 12 heures de vol au lieu de 8, élargissant considérablement son rayon d'action.
- Des armes laser mobiles montées sur véhicules, rendues possibles par de nouvelles batteries à très fort débit de puissance pouvant fournir l'énergie requise pour plusieurs tirs lasers de suite, sans générateur externe.

- Équipement du fantassin : grâce aux batteries Li-S, chaque soldat porte une batterie deux fois plus légère pour alimenter radios, lunettes de vision nocturne et capteurs, allégeant d'autant son fardeau ou lui permettant d'opérer plus longtemps sans ravitaillement.

Niveau de maturité : En développement actif. Les batteries tout-solides sont en phase de prototypage avancé dans l'industrie automobile avec des mises sur le marché annoncées vers 2025–2026. On peut escompter des versions militarisées peu après (tests en 2025–2027). Le lithium-soufre a déjà volé sur des petits drones expérimentaux. Le Royaume-Uni et d'autres ont des programmes pour qualifier ces chimies dans des applications aérospatiales d'ici 5 ans. L'innovation incrémentale se poursuit également : en 2024, une firme a présenté une batterie standard 6T pour véhicules militaires offrant 6 fois l'énergie d'une batterie plomb-acide de même format (donc adoption facilitée). La DIU (Defense Innovation Unit) américaine a lancé en 2024 un effort pour accélérer l'adoption de batteries commerciales avancées adaptées aux besoins militaires (robustesse, températures extrêmes. On verra probablement dès 3 ans des améliorations notables sur le terrain (batteries de véhicules et drones plus performantes), et des ruptures plus franches (solid-state, Li-air) vers la fin de la décennie.

Un article stratégique souligne que « le monde libre doit renforcer sa capacité en batteries et viser les breakthroughs comme les batteries tout-solide, qui seraient game-changers aussi bien commercialement que militairement ». Dans la pratique, une entreprise israélienne a dévoilé en 2024 une batterie véhicule normée 6T affichant « 4400 Wh, soit six fois plus qu'une batterie plomb de même poids, et 50% de plus que toute autre 6T lithium-ion concurrente signe que les progrès sont rapides et concrets. Le directeur énergie du DIU a noté que le DoD « n'a jamais été très bon en batteries, on faisait du sur-mesure coûteux, on veut changer cela en adoptant le meilleur du commercial adapté au militaire, d'où l'effort pour booster une filière locale de batteries haute performance, alors que la Chine domine dans ce secteur actuellement.

Systèmes autonomes

Sources :

- [Drone Wars: Developments in Drone Swarm Technology - Defense Security Monitor](#)
- [USAF 'Loyal Wingmen' Receive Fighter Drone Designations for First Time](#)
- [From drone swarms to exoskeletons, Army charts path for robotic future](#)
- [Thales Unveils Next-Generation Autonomous Drone Swarms Powered by AI](#)

Essaims de drones autonomes et combat collaboratif

On assiste à l'émergence d'essaims de drones capables d'agir de concert de manière autonome, inaugurant une nouvelle forme de supériorité numérique sur le champ de bataille. Un essaim se compose de dizaines voire centaines de drones (aériens, terrestres, navals) coordonnés par des algorithmes de swarm intelligence s'inspirant des colonies d'abeilles ou de fourmis. Au lieu d'être téléopérés individuellement, ils communiquent entre eux pour se répartir les missions (reconnaissance, attaque saturante, brouillage, logistique), s'adapter aux pertes et aux obstacles, le tout avec une supervision humaine minimale. Les récents conflits ont montré l'impact décisif de l'emploi combiné de drones, poussant les armées à investir dans des logiciels de contrôle unifié : par exemple, la Suède teste une interface permettant à un soldat de diriger jusqu'à 100 drones simultanément via des commandes groupées. Aux États-Unis, le programme Replicator vise à déployer des milliers de drones peu coûteux et autonomes d'ici 2025, afin de submerger les défenses adverses par la quantité. Couplés à des plateformes habitées (concept de « loyal wingman » où un drone est l'équipier d'un avion de combat piloté), ces essaims collaboratifs promettent de redéfinir la stratégie militaire en rendant possible des attaques saturantes à bas coût et des opérations multi-domaines ultra-agiles.

Cas d'usage potentiels :

- Nuée de micro-drones kamikazes : un essaim de 200 petits drones explosifs fond sur une formation de blindés – la défense anti-aérienne en abattra beaucoup, mais l'intelligence collective de l'essaim trouvera les brèches pour que suffisamment atteignent

les cibles, neutralisant des équipements à coût disproportionné (quelques milliers de dollars le drone vs des missiles anti-char à plusieurs millions).

- Reconnaissance répartie : des dizaines de drones aériens et terrestres se relaient pour surveiller une zone urbaine, se communiquant les zones fouillées et les cibles repérées. Sans commande centrale forte, ils patrouillent de façon autonome et coopérative, garantissant qu'aucun coin n'échappe à l'œil de l'essaim.
- « Loyal wingmen » aériens : un chasseur F-35 volant en mission est accompagné de 2 drones de combat autonomes. Ceux-ci exécutent les ordres du pilote (attaquer telle cible, éclairer telle zone radar) de façon intelligente et peuvent sacrifier leur appareil pour protéger l'avion habité. L'US Air Force développe ainsi ses Collaborative Combat Aircraft (CCA), récemment désignés comme drones de combat à part entière (YFQ-42 et 44) marquant « un nouveau chapitre de la guerre aérienne alliant humains et machines ».

Niveau de maturité : En cours de démonstration terrain. Les principes algorithmiques existent (tests du Pentagone dès 2016 avec le swarm Perdix largué par F-18). Depuis, la capacité des essaims a grandi : contrôle de 40 drones en essaim en Chine, de 100 drones en Suède en test. Replicator vise une accélération très proche (2025). On peut s'attendre à une première utilisation de véritables essaims autonomes en combat d'ici 1 à 3 ans, peut-être sous forme de drones kamikazes coordonnés, si ce n'est déjà arrivé de manière limitée. La fiabilité, les communications sécurisées et la gestion des règles d'engagement autonomes sont des obstacles plus opérationnels que technologiques. Du côté des loyal wingmen, deux prototypes américains ont volé et reçu une désignation officielle en 2025, avec un objectif de mise en service vers 2028. Les Australiens et Européens ont aussi des démonstrateurs. Ainsi, la décennie 2020s verra l'entrée progressive de ces systèmes en unités, initialement avec forte supervision humaine, puis de plus en plus autonomes.

La GAO américaine définit un drone swarm comme « au moins trois drones coordonnés pouvant mener une mission de manière autonome avec supervision minimale », en soulignant l'usage d'IA et de machine learning pour naviguer malgré le brouillage GPS ou radio et opérer en environnement dégradé. L'article de Forecast International note qu'en janvier 2025, la Suède a dévoilé un programme permettant à un soldat de contrôler 100 drones simultanément, démonstration prévue lors d'un exercice en terrain complexe. Sur le plan doctrinal, les essaims transforment la guerre en rendant des essaims de drones bon marché capables de déborder des défenses coûtant des millions, offrant une alternative résiliente et polyvalente aux missiles traditionnels. Enfin, l'US Air Force a récemment officialisé ses prototypes de drones wingmen, le général Allvin déclarant « c'est symbolique, mais cela montre que nous entrons dans une nouvelle ère du combat aérien collaboratif humain-machine ».

Véhicules autonomes terrestres et systèmes robotiques

Sur terre, l'autonomie gagne aussi du terrain, depuis les robots de transport jusqu'aux véhicules de combat sans équipage. L'Armée intègre progressivement des plateformes robotiques pour décharger le soldat des tâches pénibles ou dangereuses. Par exemple, le programme SMET/DUST consiste en de petits véhicules autonomes qui suivent un groupe d'infanterie en portant le barda (munitions, eau, batteries) ou évacuent un blessé. Des convoyeurs automatisés sont testés pour le ravitaillement : un camion leader conduit par un humain peut être suivi par 3 ou 4 camions autonomes "suiveurs" dans un convoi, réduisant le personnel exposé sur la route. Dans le combat direct, on voit apparaître des UGV (Unmanned Ground Vehicles) armés, du petit robot chenillé antichar au véhicule de la taille d'un buggy équipé d'une tourelle téléopérée. À l'avenir, ces robots pourraient avancer en première ligne en éclaireurs ou appui feu, commandés par les unités derrière. L'accent est aussi mis sur l'interopérabilité : l'Armée US développe une architecture commune (CMOSS) pour que drones aériens, robots terrestres et soldats connectés puissent partager capteurs et contrôles. Enfin, l'exosquelette, bien que porté par l'humain, est considéré dans cette famille robotique : des armatures motorisées allégeant la charge du fantassin ou augmentant sa force sont expérimentées pour augmenter l'endurance et réduire les blessures.

Cas d'usage potentiels :

- Convois logistiques robotisés : en opération, une colonne de camions ravitailleurs traverse une zone à risque d'IED sans conducteur dans chaque cabine, pilotés à distance ou en autonome sur un trajet préprogrammé. S'il y a une embuscade, seules des machines sont prises à partie, les conducteurs sont à l'arrière en sécurité.
- Mule robotique d'infanterie : une section d'infanterie en marche est suivie par un robot à roues portant 200 kg de matériel. Ce robot navigue en suivant le signal du chef de groupe ou via GPS, et peut revenir seul à la base se recharger une fois sa mission accomplie.

- Drone terrestre armé : lors d'un combat urbain, des petits chars robots (UGV de 1 tonne) sont envoyés en éclaireurs dans les rues, engageant les ennemis embusqués avec leur mitrailleuse. Les soldats les suivent à distance plus sûre. L'IA du robot lui permet d'éviter les obstacles, de détecter des silhouettes hostiles et éventuellement d'ouvrir le feu en mode autonome restreint (ou sur validation d'un opérateur).

Niveau de maturité : Progression continue, premières adoptions. L'armée française a utilisé des robots mule (Optio) au Mali pour évaluation, l'armée américaine a atteint ses objectifs à court terme de robots logistiques et EOD depuis 2017. Les automated convoys roulent en test depuis des années aux USA (plusieurs milliers de km parcourus en mode autonome). On anticipe dans les 2-3 ans un déploiement initial de ces convois robotisés en conditions réelles logistiques. Pour les robots de combat : la Russie a tenté en Syrie des UGV armés (Uran-9) avec succès mitigé, mais la technologie s'améliore. D'ici 5 ans, on verra très probablement des robots de combat intégrés en appui d'unités (Israël et la Russie y travaillent activement). L'exosquelette a déçu par le passé (prototypes trop lourds), mais de nouveaux modèles plus légers sont en test au Canada, en France... Leur généralisation reste incertaine (~10 ans peut-être pour un usage logistique ou médical).

L'article de DefenseNews titrait « Des essaims de drones aux exosquelettes, l'armée trace la voie d'un futur robotisé », notant que drone swarms, convois automatisés et exosquelettes sont désormais à l'horizon proche pour l'US Army. La stratégie RAS 2017 a déjà concrétisé certains objectifs comme alléger le fantassin et automatiser le ravitaillement partiel. Stuart Hatfield (spécialiste robots à l'Army) a listé en 2024 les projets en cours : drones filoguidés, système autonome tactique de ravitaillement aérien, robot transport moyen, mule DUST, vision à la première personne pour drones de reconnaissance, et exosquelette. Cela montre la diversité des systèmes autonomes terrestres en développement, dont certains (mule, transport autonome) devraient arriver d'ici la fin de la décennie. Les tendances montrent qu'augmenter le nombre de robots par unité et les faire coopérer avec les troupes sera un facteur décisif de supériorité tactique.