



ESSAIMS

MENACES & OPPORTUNITÉS



Ce rapport a été rédigé pour l'état-major de la marine en exécution du marché n°2022.1050092078, relatif à l'étude prospective et stratégique n°2022-01 intitulée « essais de drones aériens : menaces et opportunités ». Conformément à l'expression de besoin, mentionnée dans son résumé, elle est orientée vers le combat aéromaritime.

Ce rapport d'étude a été livré le 22 mai 2023.

Il résulte d'une collaboration en groupement entre les sociétés :

- Carbon01 SAS, spécialiste de l'intégration air-surface, au titre de sa compétence aéronautique,
- EIRL François Legras, spécialiste des systèmes multi-agents et de l'intelligence artificielle,
- Pair Work SAS, mandataire du groupement, au titre de sa compétence en matière de capacités des forces aéromaritimes.

Ont pris part à cette étude :

Pour Carbon01 SAS, MM. Ludovic Sauzier et Eric Travaillot,

Pour EIRL François Legras, M. François Legras,

Pour Pair Work SAS, MM. Pierre Herjean, Guy Philibert (pour les aspects relatifs à l'autodéfense) et René Celton (pour son expertise en matière d'armes micro-ondes de forte puissance).

L'expertise de l'interaction laser-matière a fait l'objet d'une prestation au groupement de la part de l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis dont la contribution a été pilotée par M. Lionel Merlat, responsable du laboratoire d'interaction onde-matière.

L'équipe ne déclare aucun lien d'intérêt.

Cette étude est basée sur des documents ou des connaissances en source ouverte ainsi que sur la compétence des intervenants dans leurs domaines d'excellence. Elle ne contient pas d'information protégée.

Ce document est propriété de L'Etat qui possède l'intégralité des droits d'auteur sur l'étude. Aucune reproduction, communication, adaptation ou exploitation ne peut avoir lieu sans son accord écrit préalable.

SOMMAIRE

RESUME	8
INTRODUCTION	10
L'ESSAIM, UN SYSTEME MULTI-AGENTS SUR-ADDITIF	11
LES TECHNOLOGIES SOUS-JACENTES	12
- IA DES AGENTS, IA DE L'ESSAIM : L'AUTONOMIE COLLABORATIVE	12
- LE CADRAGE DE L'AUTONOMIE COLLABORATIVE	13
- LES BRIQUES TECHNOLOGIQUES DE L'ESSAIM	14
o LES LIENS DE L'ESSAIM	14
o LES CHARGES UTILES DE L'ESSAIM	15
o LES VECTEURS DE L'ESSAIM	15
LES SYSTEMES DE MISE EN ŒUVRE D'ESSAIMS DE DRONES AEROMARITIMES ET LEURS PERFORMANCES	17
- L'AVANCE TECHNOLOGIQUE AMERICAINE	18
o L'AUTONOMIE COLLABORATIVE AU SERVICE D'UNE GRANDE AMBITION	18
o LES PREMIERES IOC AUX ETATS-UNIS	19
o LES PROGRAMMES US EN GESTATION	21
o LES MULTIPLES EXPERIMENTATIONS AMERICAINES	23
□ PREMIERS JALONS	24
□ « STAND-IN, AFFORDABLE MASS »	24
• NETWORKED COLLABORATIVE AND AUTONOMOUS WEAPONS	25
• VECTEURS COMPACTS	26
• « REMOTE CARRIERS » & « LOYAL WINGMEN »	26
□ AILERS ROBOTIQUES	27
o TYPOLOGIE DES VECTEURS AUX ETATS-UNIS	28
□ RPAS : UN MODE DE MISE EN ŒUVRE BIENTÔT PREPONDERANT	28
□ PORTEURS ROBOTIQUES : VERS L'ADOPTION	29
□ NCAWs : LA GENERALISATION	29
□ VECTEURS COMPACTS : L'ACULTURATION	30

o	UNE BITD AMERICAINE EN ORDRE DE BATAILLE	30
o	SYNTHESE DES INITIATIVES AUX ETATS-UNIS	31
-	RESTE DU MONDE : ENTRE SUIVISME ET PROLIFERATION	31
o	PREVALENCE DE L'EMPLOI DES ESSAIMS SCRIPTES ET TELEOPERES	32
o	AMORCE D'UNE PROLIFERATION DES MUNITIONS RODEUSES EN ESSAIM	32
o	DECLINAISONS DES PROJETS PHARES AMERICAINS	34
o	AUKUS : UNE COOPERATION RENFORCEE	34
o	SYNTHESE DES INITIATIVES HORS ETATS-UNIS	35
CAS D'USAGE VIS-A-VIS D'UNE FORCE : LE CHAMP DES POSSIBLES		35
-	VECTEURS, CHARGES UTILES ET MISE EN OEUVRE	36
-	LES MOYENS DE LANCEMENT	37
-	LE DELICAT SUJET DE LA RECUPERATION	39
-	EMPLOI POSSIBLE DES ESSAIMS DE DRONES EN CONTEXTE AEROMARITIME	40
LES OPPORTUNITES OFFENSIVES DES ESSAIMS DE DRONES POUR UNE FORCE A LA MER		42
-	UNE SITAC « SUR-ADDITIVE »	42
-	UN CHOIX POUR « L'ANTI-SCOUTING »	43
-	DE NOUVELLES OPTIONS D'ENGAGEMENT	44
-	VIABILITE DES MODES D'ACTION ENVISAGES	48
o	ROBUSTESSE : LES POINTS DE VIGILANCE	49
o	L'APPROCHE CAPACITAIRE « DORESE »	50
LA MENACE DES ESSAIMS DES DRONES		51
-	REALITE DE LA MENACE, MENACE DE REFERENCE	51
-	SCENARIO D'ATTAQUE RETENU	53
VULNERABILITES EXPLOITABLES DES DIFFERENTS SYSTEMES D'ESSAIMS DE DRONES		53
-	VULNERABILITES EXPLOITABLES PAR TYPE D'ESSAIM	53
-	IMPACT DE CES VULNERABILITES PAR TYPE D'ESSAIM	54
-	EVALUATION DES HYPOTHESES SOUS-JACENTES	55
-	EFFICACITE DES MOYENS CIBLANT LES VULNERABILITES	56
-	EFFICIENCE DES MOYENS CIBLANT LES VULNERABILITES	60

- SYNTHÈSE DE LA PERTINENCE DES MOYENS CONSIDÉRÉS AUX HORIZONS DE L'ÉTUDE	62
TACTIQUES ET EFFECTEURS : FOCUS SUR LES ARMES À ÉNERGIE DIRIGÉE	63
- LES ARMES LASER À HAUTE ÉNERGIE (HEL)	63
- LES ARMES MICRO-ONDES À FORTE PUISSANCE (HPM)	64
o POUR DES EFFETS « HARD KILL »	65
o POUR UN EFFET « SOFT KILL »	66
- LA SUSCEPTIBILITÉ DES VECTEURS DE L'ESSAIM	66
o AUX HEL	67
o AUX HPM	67
VULNÉRABILITÉS DES FORCES AÉROMARITIMES VIS-À-VIS DE LA MENACE DES ESSAIS DE DRONES	68
- VULNÉRABILITÉS D'UNE FORCE CIBLÉE PAR UN ESSAIM	68
- CAPACITÉS D'UNE FORCE À CONTRER L'ESSAIM	68
o DÉTECTION	69
o IDENTIFICATION	70
o NEUTRALISATION	70
o COMMAND AND CONTROL	72
- SYNTHÈSE	73
CONCLUSION	73
ANNEXE I : BRIQUES TECHNOLOGIQUES DE L'ESSAIM	75
ARCHITECTURES DE DÉCISION INDIVIDUELLES	75
- ARCHITECTURE REACTIVE	75
- ARCHITECTURE DÉLIBÉRATIVE	76
TRAITEMENTS EMBARQUÉS AVANCÉS	76
- DÉTECTION / IDENTIFICATION OPTRONIQUE	77
- LOCALISATION	78
- CONTRÔLE HIÉRARCHIQUE	78
INTEGRATION DANS UN ESSAIM	78
ARCHITECTURES DE COORDINATION	78
- COORDINATION REACTIVE	79
o BOIDS	79

o TÂCHES PLUS COMPLEXES	79
- TRAVAIL D'EQUIPE	81
- DISCUSSION	83
SOBRIETE DANS LA COMMUNICATION	83
- REDUCTION DU TRAFIC	83
- COMMUNICATION VIA L'ENVIRONNEMENT	84
SUPERVISER UN ESSAIM	84
- SUPERVISION D'ESSAIM REACTIF	85
- PLAYBOOK	86
- SUPERVISION ET DELEGATION : DISCUSSION	88
EVOLUTIONS 2025 A 2030	88
ANNEXE II : PRINCIPALES REALISATIONS AUX ETATS-UNIS	89
- Manned-Unmanned Teaming eXpanded (MUMT-X)	90
- Organic Precision Fire (Mounted) (OPF(M))	91
- ALTIUS 600 et Air Launch Effects (ALEs)	92
- MQ-25 Stingray	93
- Netted Emulation of Multi-Element Signature against Integrated Sensors (NEMESIS)	94
- Close In Covert Autonomous Disposable Aircraft (CICADA)	95
- Perdix	96
- DASH-X Remedy	97
- Low-Cost Unmanned aerial vehicule Swarming Technology (LOCUST)	98
- V-BAT	99
- Collaborative Operations in Denied Environment (CODE)	100
- Golden Horde	101
- Carrera Speed Racer	102
- Gremlins	103
- Sparrowhawk	104
- LongShot	105
- Unmanned Tactical Aerial Platform (UTAP)	106
- Low Cost Attritable Strike Demonstrator (LCASD)	107
- Skyborg, Autonomous Attritable Aircraft Experiment	108
- Have Raider	109
- Air Combat Evolution (ACE)	110

ANNEXE III : ARMES LASER : POINTS CLES	111
TECHNOLOGIE	111
PROTECTION DES PERSONNES : DISTANCES DE SECURITE, CADRE LEGAL	113
- VLE, DNRO ET REFLEXIONS SPECULAIRES	113
- CADRE LEGAL	113
- CONSEQUENCES	114
AUTRES FACTEURS DETERMINANTS	114
- LA DENSITE DE PUISSANCE	114
- LA GEOMETRIE DU FAISCEAU	115
- LE COUPLAGE LASER - CIBLE	116
- LA VULNERABILITE DES DISPOSITIFS ELECTRO-OPTIQUES	119
- LA TOURELLE	119
- L'IMPACT DES CONDITIONS ATMOSPHERIQUES	121
- EXEMPLE ET ANALYSE D'UNE ARME EMBARQUEE	121
ANNEXE IV : ARMES HPM : POINTS CLES	123
DEUX TYPES D'ARMES TRES DIFFERENTES QUI NE PRODUISENT PAS DU TOUT LES MEMES EFFETS	123
MODES D'ACTION, TECHNOLOGIES ET ORDRES DE GRANDEUR	124
- "FRONT DOOR" & "BACK DOOR": LES COUPLAGES CHAMP ELECTROMAGNETIQUE – CIBLE	124
- ETAT DE L'ART	125
o POUR DES EFFETS « HARD KILL » DE NIVEAU 3 A 5	125
o POUR UN EFFET « SOFT KILL » DE NIVEAU 2	126
o COUPLES ARMES - PORTEURS	126
- ORDRES DE GRANDEUR, CONTRAINTES ASSOCIEES, EXEMPLES	127
o POUR DES EFFETS DE NIVEAU 3 A 5	127
o POUR UN EFFET DE NIVEAU 2	129
o SEUILS ASSOCIES AUX DIFFERENTS EFFETS	129
- QUELQUES REALISATIONS EMBLEMATIQUES	129
o POUR DES EFFETS « HARD KILL » DE NIVEAU 4 ET 5	129
o POUR UN EFFET « SOFT KILL » DE NIVEAU 2	132
o QUELQUES REPERES	133
UNE VULNERABILITE SIGNANTE	133
ANNEXE V : EFFET THERMIQUE SUR L'ELECTRONIQUE EMBARQUEE	135

RESUME

L'étude porte sur l'utilisation envisageable des drones aériens en essaim (en incluant les munitions rodeuses) dans le combat aéromaritime futur en frange littorale mais également en haute mer. Elle s'intéresse également aux vecteurs pour déployer ces essais. Il s'agit de répondre à deux questions :

- Quelle menace les essais de drones représentent-ils vis-à-vis d'une force aéromaritime ?
- Comment intégrer les essais de drones à la manœuvre offensive aéromaritime ?

et ce, en cinq étapes, qui sont autant d'objectifs :

- Recenser les différents systèmes de mise en œuvre d'essais de drones aéromaritimes parmi les alliés et les compétiteurs, leurs performances et les évolutions attendues/prévisibles aux horizons 2025 et 2030, décrire les briques technologiques requises pour la mise en œuvre d'essais.
- Identifier les différents « cas d'usage » des essais de drones vis-à-vis d'une force à la mer notamment en identifiant les potentiels vecteurs/porteurs (surface, aéroportés, sous-marins, banalisés) depuis lesquels ces essais de drones peuvent être mis en œuvre.
- Proposer les modes d'action pour utiliser des essais de drones, depuis des plateformes navales ou aéroportées mises en œuvre depuis des plateformes navales pour accroître/multiplier les capacités offensives d'une force à la mer.
- Identifier les vulnérabilités exploitables des différents systèmes d'essais de drones et proposer des tactiques/effecteurs pour lutter contre ce type de menace.
- Produire une analyse de la vulnérabilité des forces aéromaritimes vis-à-vis de cette menace en fonction de leur situation (à quai, en haute mer, en eaux littorales, navigation isolée ou en groupe, senseurs disponibles...). Faire une analyse sous l'angle détection/identification/neutralisation.

Conduite par une équipe pluridisciplinaire rassemblant les compétences requises, l'étude produit les résultats suivants, en correspondance avec les objectifs énoncés :

Que l'on s'attache aux publications scientifiques, aux flux de financements, aux faits de guerre ou aux informations disponibles, force est de constater que la technologie des drones aériens en essaim est désormais mature et se diffuse. Elle signe le passage des automates aux robots et rend prophétique l'affirmation de l'amiral Raoul Castex : « l'efficacité des armes est multipliée par leur action solidaire ».

Les Etats Unis en sont les incontestables leaders et misent beaucoup sur cette technologie pour faire masse et conserver leur suprématie militaire sans accroître les effectifs. Sous forme de munitions rodeuses en essaim, de premières capacités opérationnelles apparaissent déjà chez les Marines et au sein du commandement des opérations spéciales. Les programmes en gestation sont ambitieux, à l'image de l'emblématique MQ-25 Stingray, destiné à intégrer les groupes aériens embarqués pour en assurer le ravitaillement en vol, et qui exploite les mêmes technologies. A base de missiles de croisière, les munitions en essaim atteignent la phase d'acquisition à travers le projet « Golden Horde Colosseum ». En parallèle, l'effort d'expérimentation ne faiblit pas, qu'il s'agisse de concrétiser des essais de vecteurs compacts, de porteurs déportés aéroportés (ou « remote carriers »), d'avions sans pilotes (lancés depuis la surface et souvent dénommés « loyal wingmen »), ou de drones téléopérés en service auxquels cette aptitude est conférée. En revanche, le concept d'ailier robotique évoluant en symbiose avec les avions de combat pilotés est encore dans les limbes, mais activement exploré.

Ailleurs, les tendances sont : au suivisme, notamment parmi les grandes nations (Chine, Russie, Inde), à la coopération anglo-saxonne (autour de l'axe AUKUS) ou à la prolifération de munitions rodeuses, souvent conçues par de nouveaux entrants (Afrique du Sud, Turquie, Emirats Arabes Unis, Espagne).

L'essaim peut être défini comme un système multi-agents dont le bénéfice est d'être sur-additif, c'est-à-dire de dépasser largement, dans ses effets, les gains résultant de la seule juxtaposition. Lorsqu'il ne suit pas un script préétabli ou n'est pas la résultante de multiples vecteurs, téléopérés par autant de pilotes, on parlera d'autonomie collaborative, approche la plus sur-additive qui combine deux types d'intelligences artificielles, déjà anciennes dans leur principe :

- L'approche réactive (années 90), illustrée, dans sa plus simple expression, par l'aspirateur « Roomba » : la machine perçoit son environnement et y réagit ; pour parvenir à des comportements complexes, cette approche combine des comportements simples ;
- L'approche délibérative (années 60), illustrée, dans sa plus simple expression, par le robot du jeu d'échec : pour se déterminer, la machine envisage les futurs possibles, sous l'hypothèse des enchaînements envisageables, afin de se rapprocher des buts poursuivis.

Pour l'exploiter au combat, l'homme cadre par délégation l'autonomie pour qu'elle soit prédictible et n'induisse aucune gêne. C'est le verrou technologique décisif levé par les Etats-Unis au XXI^{ème} siècle via la technologie des « Playbooks », modèles d'action contraints qui offrent une gamme limitée d'options et sont inspirés de la métaphore des tactiques de jeu, prédéfinies, pour chaque match, par les entraîneurs de football américain. La transparence dans l'action est ainsi déplacée en phases de préparation et d'analyse.

Pour lancer les essais on retrouve les plates-formes en service, notamment les avions de transport tactiques, voire, à terme, les lanceurs spatiaux. A la mer, l'éventuelle récupération revient plutôt aux bâtiments de surface ; elle peut s'avérer plus délicate.

En charge utile des vecteurs offensifs, l'originalité vient de l'arme à micro-ondes de forte puissance, qui exploite la vulnérabilité de l'électronique des armes et équipements, directement exposée à ses effets.

En complément d'un existant qu'ils valorisent et rééquilibrent, plus qu'ils ne le remplacent, les essais de drones aériens servent à établir la situation tactique, dénier cette faculté à l'adversaire ou l'engager. Sur le volet de la surveillance, sans solliciter davantage le potentiel aérien des aéronefs dotés d'équipages ni les exposer aux armes adverses, ils concrétisent des ambitions nouvelles, résultant des élongations accrues du combat naval ou de l'irruption de la guerre électronique cognitive. Ils sont également en mesure de compléter la veille air et anti-missiles, y compris balistiques, en exploitant des senseurs optroniques infrarouges de détection et de pistage. En matière d'engagement, ils permettent une frappe antinavire de précision, incapacitante à moindre coût, et offrent une option de déni d'accès aux pays dépourvus de marine ou d'aviation. Aptes à coordonner rapidement des effets différents au sein de dispositifs complexes, ils sont bien adaptés à la suppression des défenses aériennes ennemies. En version compacte, ils constituent aussi une nouvelle forme d'artillerie, ayant troqué la foudroyance pour l'allonge, la précision, la versatilité, la manœuvre et la masse ; elle trouve son meilleur emploi pour l'appui, notamment l'appui feu naval.

Revers de la médaille, l'excellente aptitude offensive des essais en fait une menace redoutable car résiliente, réactive et sans vulnérabilité spécifique. Furtive, aussi, pour les munitions rodeuses, détectées avec un préavis d'une à deux minutes par les radars dédiés. Face à elles, aucun effecteur n'est entièrement satisfaisant et, à défaut de masquage ou de camouflage, ce sont les armes dures qui seront sollicitées. Ces munitions rodeuses en essaim constituent une menace à proximité des côtes, en particulier lors d'opérations amphibies ou de déminage. Un navire marchand peut très bien les lancer en haute mer.

Amorçant une prolifération, destinés à faire masse, plus susceptibles de s'exposer au feu adverse, les essais de drones aériens opérant en autonomie collaborative sont susceptibles de remodeler les structures de forces et de commandement, de modifier l'équilibre des potentiels militaires et de faire évoluer les procédés de la tactique navale, tant par les opportunités offensives qu'ils concrétisent, que par la menace qu'ils font peser sur la liberté d'action des forces. Leur emploi est un enjeu d'interopérabilité. C'est aussi un défi pour la préparation des forces, car l'acquisition et le maintien des savoir-faire tactiques associés passent nécessairement par la simulation, surtout pour les armes collaboratives.

INTRODUCTION

Aux Etats-Unis, l'aptitude au fonctionnement en essais autonomes constitue désormais la norme pour une nouvelle génération de drones aériens dont la gamme s'étend jusqu'au drone ravitailleur embarqué sur porte-avions. Une ligne de force pour dégager des marges financières, faire rapidement masse face aux compétiteurs, s'exposer sans réticence à l'attrition, sans accroître les effectifs ni céder la moindre avance technologique. Une option réfléchie, qui anticipe un bénéfice opérationnel substantiel, face à une nouvelle conflictualité dont le conflit ukrainien est un premier symptôme.

Le robot, agent autonome, dissocie davantage l'homme de l'arme. Opéré en essaim, le drone aérien ouvre la voie à une plus grande distribution du feu et à une dilatation de la manœuvre. Son emploi réduit la latence décisionnelle dans l'action pour saisir des opportunités fugaces ou réagir aux initiatives ennemies. Il ouvre aussi la porte à des dispositifs très étoffés, au-delà de la charge mentale acceptable par l'homme. Son emploi efficace repose sur une préparation rigoureuse qu'il est illusoire et préjudiciable de rectifier en conduite. Une arme autonome qui, bien programmée et correctement supervisée, s'adapte sans délai à l'évolution du contexte et à l'irruption d'événements nouveaux, au point de démentir en partie l'idée « qu'aucun plan ne résiste au premier contact avec l'ennemi », suivant le mot de Helmuth Karl Bernhard von Moltke, dit l'aîné. C'est typiquement l'arme des premiers jours d'affrontement, lorsque les potentiels militaires se confrontent sans avoir été altérés et remaniés par l'usure du conflit.

Le robot floute la notion de cobelligérance. Hors alliance formelle, il élargit les options de soutien à un pays à l'heure où la préemption de territoires par sanctuarisation agressive devient une option assumée par certaines puissances nucléaires. Livrés massivement au déclenchement de la crise ou déployés en phase de prévention, des drones aériens autonomes en essaim sont susceptibles de changer l'équilibre des forces et de contribuer au déni d'accès sans déploiement effectif de troupes. Engagés, ils peuvent être opérés en toute discrétion par celui qui les a fournis. Il s'agirait là d'un niveau d'engagement supérieur à celui que l'on observe aujourd'hui en Ukraine de la part des Etats-Unis.

Face à une menace forcément conventionnelle, du moins peut-on l'espérer, les robots aériens en essais peuvent constituer un volet de la riposte par dissuasion conventionnelle dans une approche qui n'est pas sans rappeler la logique interstitielle promue en son temps par Guy Brossollet dans son essai sur la non-bataille et les concepts de « diffused warfare » et « virtual mass » formalisés par Yedidia Groll-Yaari et Haim Assa. En outre, un tel engagement dissymétrique préserve l'essentiel du potentiel militaire de celui qui y a recours, ce n'est pas là son moindre avantage.

L'effort américain pour se doter de drones aériens évolués, agissant en autonomie collaborative, doit être lu à l'aune de la crise de Taïwan, miroir de celle de Cuba, où les rôles sont inversés et où l'arme nucléaire, si elle cadre la confrontation, ne peut l'interdire. Ici, la prime au défenseur ne joue pas sur le plan qualitatif : autant la Chine peut facilement tirer avantage de l'usage accessoire d'essaims sommaires et rustiques, destinés à leurrer et saturer, comme peuvent le faire ses vieux chasseurs J-6 et J-7 dronisés, autant l'Amérique doit recourir à une technologie d'autonomie évoluée pour prévenir ou contrer efficacement les agressions chinoises en environnement contesté. L'essor des drones aériens en essaim relève aussi du dialogue stratégique et de la posture, autant que de la démarche capacitaire.

On le voit, le sujet dépasse l'effet de mode, d'autant que la menace, déjà proliférante des vecteurs compacts en essais de munitions rodeuses, trouve mal sa parade à l'horizon 2030.

L'étude cherche à définir l'essaim de drones aériens, à en identifier les briques technologiques, à en recenser les exemples. Elle en déduit les opportunités offensives pour le combat aéromaritime et identifie les parades possibles.



L'ESSAIM, UN SYSTEME MULTI-AGENTS SUR-ADDITIF

L'essaim de drones aérien, objet de cette étude, y est défini comme un système aérien multi-agents. Lorsqu'il ne suit pas un script préétabli ou n'est pas la résultante de multiples vecteurs téléopérés par autant de pilotes, on parlera d'autonomie collaborative pour en caractériser le fonctionnement.

La finalité d'une mise en œuvre en essaim est d'être sur-additive, c'est-à-dire de dépasser largement dans ses effets ou ses bénéfices les gains résultant de la seule juxtaposition¹. Ainsi, le phénomène de saturation est un exemple simple de sur-additivité, résultant de la seule colocalisation du nombre. Cette sur-additivité s'accroît lorsque des tâches différentes et complémentaires des agents sont accomplies simultanément et en coordination. Elle sort renforcée lorsque la résilience de l'ensemble s'enrichit de l'aptitude à compenser instantanément les pertes. Elle va plus loin en réaffectant de manière dynamique les tâches prioritaires. L'enjeu d'un essaim est d'être franchement sur-additif et de le rester. Revers de la médaille, son intégration mal maîtrisée à un dispositif de haut niveau peut en dégrader la performance et rendre l'ensemble sous-additif : c'est le défi posé aux pays les plus avancés et le motif de l'attention portée à la collaboration homme/machines (« man-unmanned teaming » en anglais). A titre d'exemple, le savoir-faire démontré par l'OTAN en matière d'opérations aériennes illustre la sur-additivité résultant de l'emploi coordonné des moyens, quand les opérations aériennes russes en Ukraine manifestent la difficulté à exprimer une sur-additivité à partir d'une simple juxtaposition de moyens, pourtant performants.

Une autre motivation pour l'adoption de fonctionnements en essaim est de retourner le paradigme de la première génération de drones : passer des nombreuses personnes nécessaires à la mise en œuvre d'un seul RPAS² à un unique superviseur pour un essaim de drones à l'efficacité accrue. Beaucoup y voient une solution à la pénurie de militaires ainsi qu'une piste de réduction de coût³. C'est aussi cela la sur-additivité de l'essaim.

Une partie de ce qu'on appelle « l'intelligence artificielle » est au cœur du fonctionnement en autonomie collaborative et conditionne la sur-additivité de l'essaim qui y a recours. Par facilité, nous adopterons le terme d'essaim « intelligent » pour qualifier ce type de fonctionnement, tandis que les essaims qui juxtaposent des agents à travers un script préétabli seront qualifiés de « scriptés » et ceux ayant recours à la coordination humaine de multiples vecteurs pilotés à distance seront appelés « téléopérés ». Le terme humanisant « intelligent » ne doit pas induire en erreur et il n'est pas inutile de rappeler que les algorithmes auxquels il se réfère interviennent au niveau des procédés, n'expriment pas de volonté propre, n'ont pas d'intuition et ne font preuve d'aucune vertu guerrière. Tout au plus optent-ils entre diverses représentations symboliques dans un champ des possibles limité, au regard des données qui leur sont accessibles. Plus que jamais, le vieil adage trivial des informaticiens « bullshit in : bullshit out » s'applique, et l'essaim ne peut se prémunir des biais cognitifs introduits lors de sa mise en œuvre.

On comprend dès lors que, pour envisager des modes d'action élaborés, l'acceptabilité et la performance d'un système multi-agents en autonomie collaborative résultent d'un niveau de délégation maîtrisé et s'appuient sur une représentation partagée du réel.

On entrevoit aussi que, pour le commandement, la transparence dans l'action d'un essaim autonome est illusoire ; la pratique démontre aussi que toute intervention humaine dans les modalités d'accomplissement d'une tâche en sous-performe le résultat : c'est sans appel. La réussite de la collaboration homme/machine se concentre donc sur la conception de l'essaim, la préparation de sa tâche et le dépouillement en boucle courte, une fois son action accomplie.

En corollaire, pour intégrer l'essaim « intelligent » à une action offensive, la transition de la notion de

¹ En 2018, une étude de l'US Army considérait qu'un fonctionnement en essaim offensif pouvait accroître la létalité de 50% et réduire les pertes d'autant ("Swarm Weapons: Demonstrating a Swarm Intelligent Algorithm for Parallel Attack", School of Advanced Military Studies US Army Command and General Staff College Fort Leavenworth, Kansas, Maj (US Air Force) Sean Williams).

² Remotely Piloted Aircraft System.

³ C'est une des affirmations de Peter W. Singer, stratège au think tank New America et qui fait autorité en matière de guerre des drones.

« kill chain » vers celle de « kill web » doit être envisagée, dès lors que certaines phases d'une séquence d'engagement, voire toutes, sont susceptibles d'échapper à l'intervention temps réel d'un opérateur⁴. Il en va ainsi de l'affectation dynamique des armes constituées par les différents vecteurs de l'essaim, pour ne citer que cet exemple. On échange alors une moindre visibilité dans l'action au bénéfice d'une létalité accrue, conséquence d'une supériorité décisionnelle qui exploite sans délai les capacités latentes.

On le voit, la collaboration homme/machine, c'est-à-dire la bonne prise en compte du facteur humain, constitue bien la clé d'accès à la capacité de mise en œuvre d'essaims « intelligents » et aux gains qui en résultent. A défaut, seuls les modes d'action les plus primitifs et, potentiellement, les moins sur-additifs, restent accessibles, besoin bien souvent couvert par des essaims scriptés ou téléopérés.

LES TECHNOLOGIES SOUS-JACENTES

Un panorama plus détaillé des technologies nécessaires à la mise en œuvre des essaims de drones figure en annexe I. Les éléments les plus saillants en sont repris ci-dessous.

- IA DES AGENTS, IA DE L'ESSAIM : L'AUTONOMIE COLLABORATIVE

Deux approches d'IA sont combinées pour mettre en œuvre un essaim fonctionnant en autonomie collaborative :

- L'approche réactive illustrée, dans sa plus simple expression, par l'aspirateur de type Roomba qui perçoit son environnement et y réagit ; en combinant des comportements simples on parvient à mettre en œuvre des comportements complexes ;
- L'approche délibérative illustrée, dans sa plus simple expression, par les jeux d'échec où la machine envisage les futurs possibles sous l'hypothèse des différents enchaînements envisageables afin de les comparer aux buts du jeu pour choisir l'action qui y mène ou en rapproche le plus.

L'approche délibérative donne une représentation symbolique de son environnement à l'agent. Cette représentation est une abstraction des sorties des capteurs de l'agent, l'agent manipule ensuite ces symboles en interne grâce à un « modèle du monde » et décide de ses actions. On peut résumer le principe de cette architecture par : percevoir - modéliser - planifier - agir. Un agent délibératif perçoit son environnement, il est capable de mettre à jour un modèle de cet environnement pour prédire son évolution, il planifie ses actions dans l'optique de satisfaire ses buts et il agit en fonction de ces plans. Il est possible de décrire une architecture délibérative comme un ensemble de règles (les modèles du monde et des actions, ainsi que les règles de comparaison entre mondes possibles et buts) et d'états internes (l'état courant du monde et les mondes possibles) sur lesquels opèrent ces règles. Un agent délibératif manipule des structures de données symboliques de manière dynamique, en mémoire.

L'approche réactive considère que « le monde est son meilleur modèle ». Dans sa version la plus simple, cette approche ne comporte pas d'état interne, les sorties des capteurs sont directement traitées par de simples circuits électriques qui calculent en continu le signal à envoyer aux effecteurs. Quand il en a, un agent réactif n'a que des états internes statiques du type « cible détectée (oui/non) » ou encore « dernière position de la cible ». Bien qu'en général très robuste, un système multi-agents qui fonctionne par coordination, et utilise des agents réactifs, n'est capable ni d'accomplir des tâches complexes, ni de

⁴ Un modèle connu de « kill chain » est le "F2T2EA" ; il comprend les phases suivantes, qui toutes sont susceptibles de se dérouler suivant un mode automatique, une fois que la tâche d'engager la cible a été attribuée à une IA et aux moyens qu'elle opère ou perçoit (les termes anglais ont été conservés à dessein) : Find, Fix: (locate), Track, Target (Select an appropriate weapon), Engage, Assess.

s'adapter facilement à une nouvelle tâche. Pour obtenir des comportements plus élaborés, il faut que les agents soient dotés de buts, et plus généralement d'attitudes propositionnelles envers leur environnement. On désigne par attitude propositionnelle une modalité telle que la croyance, le désir, l'intention ou même l'espoir, envers une proposition ayant trait au monde. Par exemples : « je crois que la cible est illuminée » ou encore « j'ai l'intention de tirer ».

Concrètement, un robot moderne « avancé » utilise une architecture hybride : un système de type délibératif « pilote » le comportement abstrait du robot en planifiant et replanifiant régulièrement, tandis que des sous-systèmes réactifs assurent les fonctions les plus concrètes telles que la locomotion, la détection, l'utilisation des charges utiles, etc. Cette approche hybride est celle de chaque agent, c'est aussi celle de l'essaim en tant que tel. Il y a bien deux IA : celle de l'agent qui relève de sa charge utile et celle de l'essaim.

On le voit, ici, pas de place pour un fonctionnement en boîte noire, pas de « deep learning » ou de recours massif à des données d'apprentissage⁵.

- LE CADRAGE DE L'AUTONOMIE COLLABORATIVE

Les approches de l'IA appliquée au contrôle robotique se situent sur un spectre entre les approches dites délibératives et les approches réactives, développées respectivement dans les années 60 et 90. Ces technologies ont aujourd'hui un bon niveau de maturité et les enjeux de recherche en robotique sont maintenant plus axés sur l'interaction physique avec le monde (locomotion, manipulation, perception, etc.).

En revanche, les recherches sur les technologies permettant à l'homme de cadrer efficacement l'action d'un essaim sont plus récentes et moins stabilisées. Le paradigme qui fait référence est celui du partage d'autorité et en particulier le contrôle par délégation où le superviseur confie dynamiquement certaines décisions et en garde d'autres. Militaires et scientifiques américains ont adapté de concert cette notion pour la rendre compatible d'une ressource humaine comptée, dont on cherche à alléger la charge mentale : elle est néanmoins suffisante pour aller de l'avant vers la délégation de tâches en situation d'hostilités.

A cet effet, depuis le début du siècle, les Etats-Unis ont développé la technologie des « Plays » en s'appuyant sur la métaphore des tactiques de jeu prédéfinies, pour chaque match, par les entraîneurs de football américain ; les « Plays » sont rassemblés en « Playbooks », catalogues prédéfinis et partagés de modes d'exécution de tâches. Le principe général de cette approche est de permettre à un acteur, le superviseur, de décider de manière granulaire de la délégation de tâches à un autre acteur, le subordonné. Cette délégation peut être plus ou moins conséquente, ajustée suivant différents niveaux⁶.

Objets de plusieurs publications scientifiques, notamment par M. Chris Miller, les « Plays » sont des modèles d'action contraints qui offrent une gamme limitée d'options pour les agents subordonnés. Ainsi, les « Playbooks » sont un moyen pratique, humain et efficace de déléguer ou de transférer une « autorité », une « responsabilité » et des ressources limitées à un « subordonné » robotique en codifiant l'intention d'un superviseur sur la base de représentations partagées, pour accomplir une ou plusieurs « macro-tâche », dans un contexte et un environnement évolutif. Cette approche vise à accroître la performance face à l'imprévisible tout en réduisant la charge de travail opérateur. Elle est bien en phase avec les contraintes immuables d'emploi des forces (hiérarchie, discipline, contrôle du feu et de la manœuvre, délégation, initiative, pour ne citer qu'elles). Elle relève des procédés, en cohérence avec l'usage classique de la documentation tactique pour structurer l'action. Le système de drones effectue une ou plusieurs tâches : il n'a pas la capacité de raisonnement "mission".

⁵ En revanche, ces technologies peuvent être exploitées pour le traitement embarqué des capteurs.

⁶ Les publications scientifiques en mentionnent sept.

Les systèmes de préparation de mission associés sont principalement fondés sur des menus déroulants ou des commandes vocales très simples. Une fois paramétré et déployé avec un plan d'équipe (issu du Playbook), et tout en restant dans le cadre fixé, l'essaim est largement autonome dans l'exécution pour sélectionner des comportements adaptés aux tactiques prescrites, eux-mêmes découpés en actions élémentaires, combinées par la machine. Ces multiples actions, entreprises en parallèle par l'essaim sur un tempo élevé, réduisent alors considérablement la lisibilité de son action pour le superviseur.

Il n'est peut-être pas inutile de rappeler que, si la manière de déléguer est une chose, la tâche elle-même en est une autre. A partir du moment où une liaison montante est maintenue avec l'essaim, il est bien sûr possible, par exemple, de mettre fin à sa tâche, d'en transférer la supervision ou d'en mettre à jour les cibles.

La levée du verrou technologique du contrôle par délégation, en lien avec la simplification des exigences de supervision par l'exploitant, est à l'origine du développement spectaculaire de l'autonomie collaborative aux Etats-Unis : c'est bien là que se situe le point d'inflexion qui a déclenché la montée vers les TRL les plus élevés.

- LES BRIQUES TECHNOLOGIQUES DE L'ESSAIM

Hors système de lancement⁷ ou de récupération, l'essaim est considéré suivant :

- Trois sous-ensembles :

- Les vecteurs qui le composent ;
- Leur charge utile ;
- La coordination, au sens large, du système multi-agents ;

- Et trois typologies, déjà évoquées :

- Essaim scripté, qui se conforme strictement à un script préétabli (d'un point de vue technique c'est l'essaim des spectacles lumineux et d'un point de vue militaire, ce sont les salves de Shahed-136 iranien ou, en leur temps, de V1) ;
- Essaim téléopéré, où chaque vecteur est mis en œuvre à distance par un opérateur dédié à cette tâche (on retrouve ici un mode opératoire fréquemment mis en œuvre par différentes milices armées au Levant, c'est aussi celui retenu pour les attaques ukrainiennes contre les ports de Crimée et c'est très probablement la technologie sous-jacentes des chasseurs J-6 et J-7 « dronisés » de l'APL) ;
- Essaim « Intelligent », c'est-à-dire fonctionnant en autonomie collaborative (collaboration entre agents et entre hommes et agents ; on retrouve ici la plupart des expérimentations américaines).

Au titre des briques technologiques, on considèrera successivement les liens, les charges utiles et les vecteurs, en faisant, autant que de besoin, la distinction entre chaque type d'essaim.

o LES LIENS DE L'ESSAIM

On en distingue trois :

- Le lien de navigation peut être divers : liaison GNSS pour un positionnement par satellite, lien inter-agents pour une navigation collaborative en réseau maillé (« mesh » en anglais) ou

⁷ On parle souvent de « ruche » pour décrire les dispositifs de lancement dédiés qui permettent une mise en œuvre presque simultanée et en tous cas très rapide des vecteurs de l'essaim. Le temps nécessaire pour être lancé, se constituer et entamer sa tâche est un critère essentiel de la performance d'un essaim.

réception de balises en « waypoints » ou destinées au marquage de cible. Pratique, précis et facile à mettre en œuvre, le recours au positionnement GNSS constitue une option pour les trois types d'essaim qui peuvent aussi recourir à la navigation inertielle ou au « map matching », au-dessus de la terre. Très accessible, la navigation par satellite est souvent privilégiée pour la conception des essaims artisanaux.

- Un lien vers le C2 est nécessaire dès qu'une interaction avec un superviseur est envisagée, c'est un cas des plus fréquents pour l'essaim « intelligent », c'est systématique pour un essaim téléopéré. Ce lien est évidemment absent d'un essaim scripté, où, à la rigueur, limité à l'envoi d'un « mission abort ».
- Un lien interne à l'essaim, imposé par le principe même d'autonomie collaborative, qui requiert aussi le recours à une IA de l'essaim qui a été décrite précédemment.

L'importance des liens pourrait faire croire que les échanges sont denses et plus facilement interceptables. Il n'en est rien. Les IA des agents et des essaims ont adopté des échanges frugaux, minimisés au maximum. Mesh, évitement de fréquence, recours au satellite ou communication implicite via l'environnement⁸ raréfient d'autant les occasions d'interception.

○ LES CHARGES UTILES DE L'ESSAIM

On ne s'attardera pas ici à décrire par le menu les capteurs et effecteurs qu'il est possible de panacher, qui sont la raison d'être de l'essaim et lui permettent de produire son effet. Reste que, pour son fonctionnement propre, un essaim « intelligent » ou téléopéré a besoin de capteurs pour percevoir son environnement.

L'essaim « intelligent » a pour particularité d'assurer un traitement embarqué des capteurs, que l'on désigne souvent par le terme anglais de « edge computing » ou « edge ». Ce traitement lui est nécessaire pour percevoir son environnement et s'y déplacer, mais aussi pour accomplir la tâche qui lui a été déléguée. Il est indispensable pour limiter les flux et parce que les débits élevés provenant simultanément d'un grand nombre de sources excèderaient les capacités humaines et la bande passante disponible.

Le principe même de l'autonomie collaborative impose le recours à une IA de l'agent, qui a été décrite précédemment, et dont le support électronique et logiciel constitue un autre composant de la charge utile.

Capteurs, effecteurs, « edge » et IA de l'agent constituent les charges utiles potentielles des vecteurs d'un essaim.

○ LES VECTEURS DE L'ESSAIM

Les agents d'un essaim ne diffèrent pas fondamentalement de vecteurs classiques : on retrouve une structure propulsée, à voilure fixe ou multicoptère, un autopilote et un système de navigation. Cependant, les vecteurs intégrés dans un essaim « intelligent » se caractérisent par une forte densité d'électronique embarquée et la présence de liens de communication sophistiqués. Il en résulte une plus forte consommation électrique, un besoin d'évacuer davantage de chaleur (présence d'ouïes d'aération et signature infrarouge légèrement accrue), le choix de communications robustes (sélection éventuelle de matériaux perméables aux ondes électromagnétiques comme, par exemple, le kevlar⁹, traitement soigné des antennes) ; à la clé, une contrainte d'intégration forte et une réalisation un tant soit peu soignée.

⁸ Par exemple, perception d'une désignation laser qui déclenche le tir.

⁹ Retenu pour cette raison pour la réalisation du fuselage du drone Perdix (Design and Development of a High-Altitude, In-Flight-Deployable Micro-UAV par Tony S. Tao, Massachusetts Institute of Technology, Lincoln Laboratory).

Le tableau suivant rassemble les différentes briques technologiques suivant la typologie de l'essai :

Sous-ensemble	Briques associées	Type d'essai		
		Scripté	Téléopéré	« Intelligent »
Coordination	Lien de navigation	<i>En option</i>		
	Lien vers le C2		Indispensable	<i>En option mais fréquent</i>
	Lien interne		Indispensable	
	IA de l'essaim		Indispensable	
Charge utile	Effecteurs	<i>En option, suivant finalité</i>		
	Capteurs	<i>En option</i>	Indispensable	
	Edge computing			Indispensable
	IA de l'agent			Indispensable
Vecteur	Autopilote	Indispensable		
	Navigation			
	Structure			
	Propulsion	Indispensable mais fonction de l'architecture retenue		
	Moteurs de rotor			
	Actionneurs de gouvernes			

Cette grille de lecture adopte un découpage en composants élémentaires des essais, eux-mêmes décrits suivant une typologie précise. Dans la réalité, les frontières peuvent être moins strictes. Un essai offensif « intelligent » peut adopter en phase d'approche un fonctionnement scripté, propice à sa discrétion. Un autre, dédié à l'ISR et ne regroupant qu'une poignée d'agents, peut être volontairement dépourvu de « edge » dédié à sa tâche, remplacé par un traitement optimisé des flux vidéo par un ou plusieurs opérateurs. Enfin, une interface collaborative peut permettre à un unique opérateur de superviser en essai « intelligent » des RPAS qui seront chacun pilotés via leur liaison de télé-opération d'origine. Trois exemples qui sont autant d'approches hybrides mais réalistes. D'ailleurs, la notion de « Plays » intègre, comme une option parmi d'autres, le recours ponctuel à la télé-opération.

Un essai peut être homogène, constitué de vecteurs identiques mettant en œuvre une même charge utile. Il peut aussi être hétérogène avec des vecteurs différents et un panachage de senseurs et d'effecteurs. Ainsi, un drone sophistiqué et récupérable, équipé de capteurs de vision nocturne, peut apporter sa capacité tous temps au reste de l'essai, composé de vecteurs à effet cinétique qui en sont dépourvus¹⁰.

Les éléments décrivant l'essai et ses technologies devraient rester stables aux horizons 2025 et 2030 ; les progrès résulteront surtout de la mise en pratique. Les essais artisanaux sont déjà une réalité. Sur cette période, ils devraient encore largement reposer sur les approches scriptées et téléopérées, tandis

¹⁰ C'est l'association en un seul système des drones d'AeroVironment : la gamme Puma pour l'ISR et les Switchblades pour la frappe, à ceci près que tout est aujourd'hui intégralement opéré par l'homme.

que les essais industriels, tout en recourant davantage à l'autonomie collaborative, vont progressivement entrer en service dans les pays les plus avancés en commençant par les Etats-Unis. Une tendance qui concerne également et de plus en plus le domaine aéromaritime où certaines réalisations font référence.



LES SYSTEMES DE MISE EN ŒUVRE D'ESSAIS DE DRONES AEROMARITIMES ET LEURS PERFORMANCES

Incontestablement, les Etats Unis sont les plus avancés en matière d'essais de drones. S'appuyant sur 40 ans de recherche, intensifiées depuis 20 ans, ils atteignent désormais des niveaux de maturité technologique élevés et se situent clairement dans une logique de déploiement massif de systèmes sophistiqués, à vocation offensive pour la plupart. Ce constat s'appuie sur l'observation des expérimentations conduites, l'évolution des publications scientifiques, la corrélation des financements et des maturités technologiques¹¹, l'importance des initiatives industrielles non financées, le développement des démarches organiques¹² et les contraintes implicites des programmes d'acquisition en cours¹³. L'idée maîtresse mise en avant autour de cette robotisation du champ de bataille est d'obtenir un effet de masse, associé à une « foudroyance décisionnelle » qui accroisse significativement l'efficacité des armes, surtout dans les premiers jours d'un conflit. Les changements d'administration de ces dernières années ne remettent pas fondamentalement en cause cette approche : outre-Atlantique, beaucoup considèrent que le recours massif aux drones aériens collaboratifs est une bonne manière, voire la seule, de maintenir la parité avec la Chine tout en dissuadant la Russie de profiter d'un conflit en Asie pour intervenir militairement en Europe. Dans le domaine des avions de combat, la « loi d'Augustine¹⁴ » prévaut ; elle conduit à acquérir une supériorité qualitative au prix d'une sophistication technologique de plus en plus coûteuse qui, en retour, réduit inexorablement les volumes d'acquisition. Pour y échapper, le recours massif aux drones aériens collaboratifs, produits en grande série et à bas coût, permet de conserver la masse requise et ouvre un nouveau champ d'affrontement technologique où l'Amérique peut légitimement se prévaloir d'un avantage. En termes d'emploi, l'avènement des essais est parfaitement en ligne avec l'évolution des doctrines : « Multi-Domain Operations » et « Mosaic Warfare ».

Alliés ou compétiteurs, ne sont pas en reste. Ils répliquent les approches américaines sans plus-value notable si ce n'est, au gré de leurs cultures, de simplifier le contrôle de l'essaim par l'homme ou de s'en interdire certains usages. Les projets ou expérimentations dévoilés relèvent aussi du discours stratégique et de la posture. Côté anglo-saxon, c'est un champ de coopération privilégié où l'alliance AUKUS semble trouver un point d'application concret. En Asie, les projets ambitieux fleurissent déclinant les « Loyal Wingmen » américains. Sur l'ensemble des acteurs mondiaux impliqués dans le sujet, ce sont les munitions rodeuses de petite taille agissant en essaim qui sont aujourd'hui les plus

¹¹ Ainsi, la courbe de financement des SBIR (Small Business Innovation Research) liés aux essais de drones aériens est typique d'une évolution classique depuis les TRL (Technology Readiness Level) bas, faiblement financés, vers les TRL élevés qui absorbent des montants plus importants et concernent davantage d'entreprises. Le franchissement de la « vallée de la mort » est net. C'est la phase de montée rapide vers les TRL élevés qui voit arriver les grandes entreprises, ce qui se constate également dans le cas des essais.

¹² Approche DOTMLPF (Doctrine, Organization, Training, Matériel, Leadership and education, Personnel, and Facilities, auxquels on rajoute parfois Policy) et qui correspond en France à l'approche capacitaire DORESE (Doctrine, Organisation, Ressources humaines, Equipements, Soutien, Entraînement).

¹³ Ceux dont le fonctionnement « en essaim » est implicite (Collaborative Combat Aircraft (CCA) du Next Generation Air Dominance (NGAD), par exemple).

¹⁴ Du nom de Norman Ralph Augustine, ancien sous-secrétaire à l'Army et ancien président de Lockheed Martin qui a mis en évidence que le coût des avions de combat croissait de manière exponentielle, ce qui est toujours le cas aujourd'hui (Loi d'Augustine n°16).

répandues et amorcent une prolifération.

Des technologies plus rudimentaires, mais déjà accessibles, offrent des capacités asymétriques à des acteurs irréguliers, affranchis des contraintes légales occidentales et désireux d'adopter des modes d'action offensifs saturants ou distribués. Au-delà de 2030, ces mêmes acteurs pourraient détourner des technologies civiles plus évoluées si le développement de l'Advanced Air Mobility (AAM) / Urban Air Mobility (UAM) se confirmait. L'aspect dual de la technologie d'essaim pourrait dans ce cas la rendre, à terme, encore plus nivelante.

Il convient, bien sûr, de se montrer prudent sur les niveaux de maturité perçus dans la mesure où la nature largement immatérielle de la technologie entretient l'incertitude sur les capacités réelles. Pour autant, les nombreuses publications scientifiques, les réalisations civiles de systèmes multi-agents, l'existence de logiciels libres de droit¹⁵ et une certaine stabilisation des approches technologiques depuis 10 ans permettent d'élaborer des essais de bonne tenue, éligibles à un premier éventail de capacités militaires.

Il est, certes, parfaitement exact de noter, qu'au vu de l'information accessible, aucun système industriel opérationnel de mise en œuvre d'essaim de drones aéromaritime n'a fait la démonstration documentée de ses capacités à la date du 30 décembre 2022¹⁶. Néanmoins, au-delà de l'emploi régulier d'essaims bricolés¹⁷, téléopérés ou scriptés, nous assistons d'ores et déjà à des acquisitions de petits drones aériens collaboratifs fabriqués en série, la plupart du temps des munitions rodeuses¹⁸, susceptibles de prendre part, de manière encore marginale mais bien réelle, au combat aéromaritime. La généralisation d'armes offensives en essaim et l'arrivée de premiers porteurs collaboratifs nous semble devoir intervenir avant 2030. L'avènement de véritables UCAV¹⁹ faisant équipe en environnement contesté avec les plates-formes habitées sur le spectre complet des missions dévolues à ces dernières ne nous semble pas envisageable dans le cadre temporel de l'étude et reste encore incertaine.

Le recensement des systèmes d'essaims s'appuie sur l'exemple américain pour présenter les technologies sous-jacentes et leurs évolutions avant d'inventorier les réalisations des autres acteurs et de les évaluer à l'aune de cette référence incontournable.

- L'AVANCE TECHNOLOGIQUE AMERICAINE

o L'AUTONOMIE COLLABORATIVE AU SERVICE D'UNE GRANDE AMBITION

Les drones, et en particulier leur fonctionnement collaboratif, tiennent une place significative dans l'approche américaine des conflits de haute intensité. Partant de l'hypothèse qu'il faudra affronter à très grande distance, et éventuellement sur deux fronts, des puissances militaires proches de la parité, la supériorité aérienne, et même la supériorité tout court n'est plus tenue pour acquise ni même atteignable. Les opérations en environnement contesté pour contrer déni d'accès et interdiction de zone épousent les concepts de « Multi-Domain Operations » et de « Mosaic Warfare » où la rapidité de décision est essentielle, sanctionnant le passage des « kill chains » aux « kill webs » et élargissant ainsi la boucle OODA²⁰ aux dimensions d'un vaste dispositif partiellement robotisé où certaines « décisions »

¹⁵ Soar, par exemple, qui, depuis 40 ans, est utilisé pour des travaux de recherche scientifique. (Soar n'est plus un acronyme)

¹⁶ Date à laquelle est arrêté notre inventaire.

¹⁷ Ces essaims de drones rudimentaires constituent une menace réelle et sont pris en compte à ce titre dans l'étude. Les exemples en sont nombreux et récents : attaque de la base aérienne de Hmeimim, attaque d'installations pétrolières en Arabie Saoudite, attaque de Sébastopol.

¹⁸ Charge de quelques kilos pour ceux qui ont une vocation offensive.

¹⁹ Unmanned Combat Air Vehicle aux aptitudes cohérentes avec celles des avions de combat habités les plus performants.

²⁰ Boucle "Observe→Orient→Decide→Act" théorisée en 1960 par John R. Boyd (USAF).

se prennent en une fraction de seconde. Les formations collaboratives de drones aériens offensifs sont alors destinées aux actions « stand in », en prolongement des vecteurs habités qui demeurent au maximum en « stand off ». Aux premiers l'exécution de tâches complexes et hiérarchisées, aux seconds l'expression de la volonté humaine et l'initiative en continuité de la préparation de mission. Les agents autonomes sont particulièrement aptes aux reconfigurations rapides du combat moderne en haute intensité ; ils sont destinés à en accroître la fulgurance, sur un tempo élevé, propre à la robotisation de l'engagement. A cet égard, deux programmes, « Vanguard » de l'AFRL²¹ et « Future Vertical Lift », de l'US Army Aviation, esquissent un véritable schéma directeur de l'autonomie collaborative offensive. Dans le premier, des drones aériens, agissant en essaims, délivreront des armements collaboratifs et autonomes. Dans le second, en extension de vecteurs habités, ils assureront une vaste gamme de tâches allant de l'ISR à la guerre électronique offensive en passant par la frappe. On retrouve une même ambition dans le programme UCAAS²² qui, dès 2026, s'attache, à déployer sur porte-avions le MQ-25 « Stingray » : « simple » ravitailleur en vol à son IOC²³, il ouvre la voie à un emploi beaucoup plus étendu des drones embarqués, orienté vers l'ISR et la frappe. Dans la même veine, les essais effectués cet été par le NAVAIR²⁴ envisagent la supervision simultanée de quatre drones depuis un F/A-18 pour un emploi offensif assumé où, suivant la métaphore du football américain, le pilote agit en « quarterback » de sa ligne offensive, constituée de drones délivrant des munitions collaboratives autonomes en réseau. C'est le concept du Collaborative Combat Aircraft (CCA)²⁵, ailier robotique du Next Generation Air Dominance (NGAD), auquel les programmes et expérimentations précédemment citées ouvrent la voie, dans la perspective affichée d'une mise en service dans la prochaine décennie, prélude d'un groupe aérien embarqué robotisé à 60% à l'horizon 2045.

Destinée à préserver l'avantage militaire des Etats-Unis vis-à-vis de la Chine, l'autonomie collaborative des drones est vue comme une panacée, offrant un avantage décisif sans exiger une ressource humaine plus nombreuse ni des crédits plus conséquents. Pour autant, la viabilité du concept est fonction de l'aptitude des essaims à coopérer en sécurité avec l'homme, résister aux brouillages ou cyberattaques et assurer une létalité minimale en fonctionnement dégradé. Ces points ne sont pas négligés et ce n'est pas un hasard si le programme Vanguard englobe le Navigation Technology Satellite (NTS-3).

Les résultats obtenus et les limites auxquelles se frottent les Américains sont passés en revue à travers les premières capacités déployées, les programmes lancés et les expérimentations entreprises, trois facettes des acquisitions qu'il convient de passer en revue pour se faire une idée de l'évolution en cours outre-Atlantique.

○ LES PREMIERES IOC AUX ETATS-UNIS

Trois systèmes en service y affichent d'ores et déjà, et de manière crédible, une capacité de drones en essaim. Résumés dans le tableau ci-dessous, ils illustrent bien le virage américain vers les technologies d'autonomie collaborative. Ils sont issus de démarches « bottom-up » pragmatiques qui capitalisent sur des cas d'usage concrets (retrait des OH-58D Kiowa entraînant l'exploitation improvisée de console RPAS en tranche arrière d'UH-60 Black Hawk en précurseur de MUMT puis MUMT-X, décrit brièvement ci-dessous et de manière plus complète en annexe II, comme tous les autres systèmes américains recensés dans l'étude) et sur la maturité de produits sur étagère (munitions rodeuses modifiables comme les Hero-120 ou possédant une capacité native à opérer en essaim, comme les ALTIUS-600M et 700M). S'ils ont tous une forte tonalité aéroterrestre, ils sont exploitables pour le combat aéromaritime, directement ou via des produits qui en seraient dérivés. A minima, tous les vecteurs ont fait l'objet d'expérimentations en milieu marin.

²¹ Air Force Research Laboratory.

²² Unmanned Carrier Aviation Air System

²³ Initial Operational Capability.

²⁴ Naval Air Systems Command

²⁵ A la différence du NGAD, le CCA est ouvert à l'interopérabilité (prise de contrôle par une unité alliée) et à la coopération industrielle...sur la base de spécifications US, bien entendu.

	Baptême	Points saillants	Dominante technologique	Situation
2004-	MUMT-X	Supervision de RPAS par hélicoptère d'attaque	Logicielle	Acquisition US Army
2011-	ALTIUS-600M	Lancé au tube de tout porteur, notamment aéronef	Vecteur	Acquisition SOCOM
2019-2021	OPF(M) ²⁶	Munition rodeuse tirée d'USV	Logicielle	Acquisition USMC

 Essaim destiné à une mise en œuvre depuis un porteur aérien.

 Essaim destiné à une mise en œuvre depuis un bâtiment de surface

 Essaim susceptible d'être mis en œuvre par tout type de porteur, y compris sous-marin²⁷

Le programme Organic Precision Fires (Mounted), OPF-(M), de l'USMC pourrait déployer rapidement une première capacité de frappe aéromaritime en essaim, basée sur la munition rodeuse israélienne Hero-120²⁸ qui a été testée sur cible maritime.

En 2022, le SOCOM a fait l'acquisition de munitions rodeuses ALTIUS-600M²⁹ qui affichent clairement leur capacité à être utilisées en essaim et dont le fabricant est très impliqué dans les projets d'autonomie collaborative militaires, en particulier le développement des « Air Launch Effects » (ALE), du programme « Future Vertical Lift » de l'US Army, destinés à doter les hélicoptères de combat d'effecteurs déportés en essaim. Conçus d'emblée avec le plus grand soin pour être lancés d'aéronef, servis par une aérodynamique de qualité et une autonomie accrue, les drones de la gamme ALTIUS d'Anduril matérialisent un saut qualitatif et font désormais référence pour les essaims de petits vecteurs lancés au tube. Ces drones capitalisent sur leur remarquable aptitude à être largués de tous types d'aéronefs y compris dans les configurations les plus exigeantes, comme le stationnaire à très basse altitude ou dans les turbulences de proximité d'un aéronef à voilure fixe. Dans tous les cas, et au prix de nombreux essais, ces drones atteignent une forte probabilité de retrouver rapidement leur enveloppe de vol normale, quelles que soient les contraintes de lancement. Conçus d'emblée pour un résultat optimisé, les drones ALTIUS ne sont pas un simple assemblage de sous-ensembles autour de l'incontournable autopilote Piccolo Nano (désormais propriété de Collins Aerospace). La gamme ALTIUS établit une nouvelle norme en termes de mise en œuvre, de rayon d'action et d'intégration de charges utiles variées.

Le système MUMT-X³⁰ installé sur les dernières versions des hélicoptères AH64- Apache³¹ apporte dans le domaine aéroterrestre une capacité de mise en œuvre simultanée de plusieurs drones, MALE³² ou tactiques, qui, au titre des essaims, peut être considérée comme un premier seuil appliqué à l'ISTAR³³. La transposition de la technologie au domaine aéromaritime est tout à fait réaliste et fait l'objet d'expérimentations³⁴. Dans MUMT-X, les drones restent des RPAS, mais, vu de l'opérateur, et même

²⁶ Organic Precision Fire (Mounted).

²⁷ A terme, dans le cas de l'ALTIUS, dans sa version 500 qui, pliée, est de taille « A ».

²⁸ Charge de 4,5 Kg, portée 30 Nq, autonomie 1 h, vitesse 65 Nds. Susceptibles d'être mis en œuvre par les Long Range USV de l'USMC, les Hero-120 acquis par les Etats-Unis sont produits par l'entreprise américaine Mistral Inc.

²⁹ Charge de 3 Kg, portée ~200 Nq, autonomie 2,5 h, vitesse 90 Nds.

³⁰ Manned-Unmanned Teaming eXpanded, évolution du MUMT, dont les premières versions sont en service depuis 2014 et dont la phase de R&D a débuté en 1997. Le contrat de la partie « communications » a été notifié à L3Harris en décembre 2020 pour une fin d'exécution en juin 2023 ; une version export du produit L3 existe, destinée en particulier au Maroc, aux Pays-Bas, au Qatar, aux Emirats Arabes Unis et au Royaume Uni.

³¹ Apache AH-64E V6 : 690 devraient être en service en 2025.

³² Medium Altitude Long Endurance.

³³ Intelligence, Surveillance, Target Acquisition, and Reconnaissance.

³⁴ A titre d'exemple, un MQ-1C Gray Eagle et un AH-64 Apache ont travaillé de concert à l'occasion de l'exercice RIMPAC 2018 pour localiser et faire engager une cible de surface par des moyens US Army (HIMARS notamment), lors d'un SINKEX.

au sens capacitaire, le système fonctionne comme un essaim, ce que traduit bien son nom de baptême.

Ces trois réalisations montrent que l'autonomie collaborative investit le champ de bataille, certes de manière encore marginale mais bien réelle, y compris pour le combat aéromaritime.

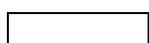
○ LES PROGRAMMES US EN GESTATION

Aux Etats-Unis, cinq programmes en cours de réalisation relèvent d'une démarche ambitieuse et sont autant de ruptures potentielles à considérer à l'horizon 2025.

	Baptême	Points saillants	Dominante technologique	Statut
2002-	MQ-25 Stingray	Drone de combat pour porte-avions ³⁵	Vecteur et logicielle	IOC en 2026 ³⁶
2014-	NEMESIS ³⁷ / NOMAD ³⁸	Lourres actifs décalés persistants réutilisables	Vecteur	Innovative Naval Prototype
2020-	ALEs ³⁹	Effecteurs déportés consommables lancés au tube par aéronefs	Vecteur	IOC en 2023
2022-	HVLRPS et HVLRPF ⁴⁰	Munitions rodeuses pour USV et UUV	Vecteur Lanceur	Prototypes en 2024
2022-	Golden Horde Colosseum	Armes autonomes collaboratives en essaim	Logicielle	Phase d'acquisition en 2023

 Essaim destiné à une mise en œuvre depuis un porteur aérien.

 Essaim destiné à une mise en œuvre depuis un bâtiment de surface

 Essaim susceptible d'être mis en œuvre par tout type de porteur, y compris sous-marin⁴¹

Capitalisant sur deux décennies d'expérimentations, le programme UCAAS⁴² est destiné à déployer, au sein des groupes aériens embarqués des porte-avions américains, cinq drones ravitailleurs autonomes, a priori intégrés aux flottilles d'E-2. Destinés à économiser le potentiel des chasseurs embarqués et à accroître leur allonge, ces drones MQ-25 Stingray seront également expérimentés pour des tâches d'ISR, voire de frappe. A travers ce programme, qui prévoit l'acquisition de 72 drones, c'est le délicat sujet de l'intégration dans l'environnement complexe du porte-avions qui fait l'objet de toutes les attentions de l'US-Navy, au point que le drone embarqué soit en mesure d'opérer en silence radio. Ces drones seront supervisés depuis l'Unmanned Aviation Warfare Center du porte-avions et depuis les aéronefs de guet aérien. Ils devront également interagir en essaim avec les formations de chasseurs embarqués lors des phases de ravitaillement en vol à longue distance. Si les tâches de sécurité au-dessus du porte-avions consommeront sans doute une part non négligeable de leur potentiel, ce ne sont pas les seules que l'US-Navy ambitionne de confier à ses MQ-25, qui préfigurent aussi les

³⁵ Issu des programmes Joint Unmanned Combat Air Systems (J-UCAS), Unmanned Carrier-Launched Surveillance and Strike (UCLASS) (avec le X-47B qui, outre ses aptitudes au catapultage et à l'appontage, sera le premier drone à être ravitaillé en vol en 2015), CBARS (Carrier-Based Air Refueling System) puis UCAAS (Unmanned Carrier Aviation Air System). Sept prototypes participent aux essais.

³⁶ Déploiement complet de longue durée à bord d'un porte-avions pour des tâches de ravitaillement en vol. L'acquisition auprès de Boeing de 72 MQ-25 est prévue. Le drone est désormais en « low-rate initial production ».

³⁷ Netted Emulation of Multi-Element Signature against Integrated Sensors, programme qui va bien au-delà du seul sujet NOMAD.

³⁸ Netted Offboard Miniature Active Decoy.

³⁹ Air Launch Effect (effecteurs déportés lancés par hélicoptère du programme Future Vertical Lift de l'US Army Aviation).

⁴⁰ High-Volume Long-Range Precision Strike (HVLRPS pour USVs) and Fires (HVLRPF pour UUVs).

⁴¹ La mise en œuvre de NOMAD depuis un sous-marin n'est pas envisagée.

⁴² Unmanned Carrier Aviation Air System.

Collaborative Combat Aircraft (CCA) du Next Generation Air Dominace (NGAD). Par sa taille et ses capacités, le MQ-25 Stingray est éligible à une classification dans la catégorie des UCAV, même si son panel de tâches réalisables est encore des plus restreints. Un an après l'IOC, le premier déploiement est programmé pour 2026 à bord de l'USS Theodore Roosevelt, basé sur la côte ouest.

NEMESIS est un programme de leurres multi-milieux, coordonnés en réseau, qui simule de manière cohérente les diverses signatures des plates-formes navales. Dans la continuité des essais NOMAD de l'Office of Naval Research, un des volets de NEMESIS s'attache aux leurres actifs décalés persistants, les « Distributed Decoy and Jammer Swarms » (DDJS). Forcément peu documenté, cet aspect consiste à répartir dans l'environnement de la force des essaims de drones aériens brouilleurs réutilisables, continuellement alimentés en nouveaux vecteurs, à mesure que les précédents sont récupérés pour être reconditionnés. Il est ainsi possible de simuler une force là où elle n'est pas ; il est également envisageable de leurrer les missiles hypersoniques qui ne laissent pas le temps aux leurres classiques de se déployer. Compte tenu des trajectoires et des vitesses adoptées par ces armes, leur cible est très difficile à anticiper ; en revanche, leur autodirecteur radar, très contraint par les effets des hautes vitesses sur les matériaux de l'enveloppe, aura des performances limitées qui le rendent potentiellement sensible aux brouillages, même peu élaborés. Lancé par tube, récupéré verticalement sur un pont plat et dégagé, le drone NOMAD adopte une configuration bi-rotor pour mieux résister aux vents forts ; il est permis d'avoir encore des doutes sur la généralisation de cette architecture.

Les Air Launch Effects (ALE) sont les effecteurs déportés en essaim qui seront lancés par les hélicoptères du programme de renouvellement de la composante hélicoptères de l'US Army : « Future Vertical Lift ». Ils pourront également être mis en œuvre par les machines en parc, une fois mises à niveau. S'il demeure aéroterrestre à ce stade, ce type d'effecteur consommable déporté pourrait trouver une pertinence pour le combat aéromaritime⁴³.

Dans le cadre du contrat « Autonomous Swarm/Strike-Loitering Munitions », Raytheon s'est vu confié la réalisation des « High Volume Long Range Precision Strike » (HVLRRPS) et « High Volume Long Range Precision Fire » (HVLRRPF) destinés, respectivement, aux USV et aux UUV. Les munitions seront dérivées du drone Coyote Block3, évolution du Block1, largement exploité à des fins d'expérimentation par l'US-Navy dans le cadre des expérimentations Low Cost Unmanned aerial vehicle Swarming Technology (LOCUST) de l'Office of Naval Research. A ce stade, les projets HVLRRPS et HVLRRPF pourraient être uniquement expérimentaux.

Capitalisant sur l'autonomie collaborative mise au point dans le cadre du projet « Collaborative Operations in Denied Environment⁴⁴ » (CODE), l'expérimentation de munitions collaboratives en réseau (Networked Collaborative Autonomous Weapons, NCAW) « Golden Horde » débouche sur l'initiative « Golden Horde Colosseum », dont la transition vers une phase d'acquisition est prévue en 2023. Orientée en priorité vers les Networked Enabled Weapons (NEW) en dotation, elle vise à les intégrer dans un même ensemble collaboratif, principalement grâce à des évolutions logicielles. La salve de missiles de croisières en essaim devrait comprendre l'AGM-158 JASSM ER⁴⁵ (dont il existe une version antinavire LRASM⁴⁶), le leurre/brouilleur offensif AGM-160 MALD X⁴⁷ ; le futur SiAW⁴⁸ est également cité comme cible, voire la bombe JDAM-ER. A noter que l'AGM-158 est susceptible de mettre en œuvre la charge micro-onde à forte puissance HiJENKS⁴⁹ permettant ainsi une grande variété d'effets,

⁴³ Deux types d'ALE, lancés par tube et aptes à une mise en œuvre en essaim, sont spécifiés : poids : 80 à 100 kg ; vitesse : 350, voire 600 nds ; autonomie : 30 à 60 mn à 190-300 Nq, pour l'un ; poids : 22 à 45 Kg ; vitesse : 120, voire 205 nds ; autonomie : 30 à 60 mn à 50-80 km et CU DLIR (passive uniquement), pour l'autre. DLIR pour : Detect, Identify, Locate, Report.

⁴⁴ Les logiciels d'autonomie collaborative qui résultent de CODE sont propriété du gouvernement américain.

⁴⁵ Joint Air-to-Surface Stand-off Missile - Extended Range.

⁴⁶ Long Range Anti-Ship Missile.

⁴⁷ Miniature Air Launched Decoy. C'est à la base un leurre, décliné ensuite aussi en brouilleur au gré des versions

⁴⁸ Stand In Attack Weapon dont l'évaluation opérationnelle est attendue en 2027.

⁴⁹ High-power Joint Electromagnetic Non-Kinetic Strike (HiJENKS), successeur de CHAMP (Counter-electronics High power Microwave Advanced Missile Project, conçu pour équiper le missile de

notamment pour les missions SEAD⁵⁰ qui, plus que toute autre, semblent motiver le concept de NCAW. Golden Horde Colosseum fait partie des programmes « Vanguard » qui bénéficient d'une attention particulière de l'Air Force et d'un processus accéléré.

L'existence de ces cinq programmes souligne la maturité des technologies d'autonomie collaboratives, désormais transposables sur des cas d'usage précis et pour des capacités structurantes.

○ LES MULTIPLES EXPERIMENTATIONS AMERICAINES

Le milieu de la précédente décennie a vu se multiplier les initiatives pour appliquer à la défense les avancées de l'autonomie collaborative. Ce virage vers une phase de développement a été rendu possible par des années de maturation à faible investissement qui ont permis de bâtir des algorithmes robustes et d'affiner les concepts d'emploi.

La quinzaine d'expérimentations listées dans le tableau ci-dessous recouvre les deux principaux axes d'effort des armées américaines :

- Les senseurs et effecteurs déportés autonomes pour faire masse ;
- La compatibilité homme/machines pour accroître leur imbrication dans les dispositifs aériens habités.

Si le premier axe est à dominante technologique, le second relève davantage du facteur humain et absorbe en fait l'essentiel des crédits de montée en maturité⁵¹.

	Baptême	Points saillants	Dominante technologique	Suite en prototype ou programme
2006-2019	CICADA	Micro-drone taille CD éjecté en vol et opérant en essaim scripté	Vecteur	Non
2013-2017	Perdix	Micro-drone taille leurre aéro, éjecté en vol	Vecteur et logicielle	Non
2015-2017	Have Raider	Interaction chasseur – ailier autonome	Facteur Humain	LCASD et Skyborg
2015	UTAP-22 ⁵²	Aéronef « attritable » équipé d'une soute et de points d'emport	Logicielle	LCASD
2016-2021	LOCUST ⁵³	UAV groupe I pliable en taille « A » ⁵⁴	Logicielle	HVLRPS et HVLRPF ⁵⁵
2016-2019	Remedy	Vecteur déporté de GE cognitive	Vecteur	Non
2016-2022	Gremlins	Senseur/effecteur déporté, rodeur, récupérable en vol et réutilisable	Vecteur	Inconnue
2016-2019	CODE ⁵⁶	Armes en espace contesté	Logicielle	Golden Horde
2016-	LCASD ⁵⁷	Aéronef « attritable », équipé d'une soute et de points d'emport	Vecteur	Skyborg
2018-	Skyborg	UCAV reposant sur le logiciel Autonomy Core System (ACS)	Vecteur et logicielle ⁵⁸	Prototype en 2023, à terme, CCA/NGAD

croisière AGM-86, retiré en 2019). HiJENKS et fruit d'un effort conjoint entre l'Office of Naval Research (ONR) et l'Air Force Research Laboratory (AFRL).

⁵⁰ Suppression of Enemy Air Defense.

⁵¹ C'est particulièrement vrai si l'on observe la répartition des crédits SBIR (Small Business Innovation Research) affectés au sujet depuis 20 ans.

⁵² Unmanned Tactical Aerial Platform.

⁵³ Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle Swarming Technology.

⁵⁴ Taille « A » : 91,44 cm de long (3 pieds), 12,38 cm de diamètre (4,875 pouces). (Bouée acoustique).

⁵⁵ High-Volume Long-Range Precision Strike (HVLRPS pour USVs) and Fires (HVLRPF pour UUVs).

⁵⁶ Collaborative Operations in Denied Environment.

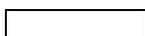
⁵⁷ Low Cost Attritable Strike Demonstrator, matérialisé, entre autres, par le XQ-58 Valkyrie.

⁵⁸ Et très probablement aussi facteur humain.

2019-2022	Golden Horde	Armes autonomes collaboratives en essaim	Logicielle	GH Colosseum, phase d'acquisition en 2023
2019-	Air Combat Evolution	Supervision de drones collaboratifs par pilote de chasse	Facteur Humain	Non arrêtée
2020-	SparrowHawk	Senseur/effecteur déporté, rodeur, récupérable en vol et réutilisable	Vecteur	Non arrêtée
2020-	Carrera Speed Racer	Effecteur déporté consommable	Vecteur et logicielle	Non arrêtée
2020-	LongShot	Effecteur déporté air-air consommable	Vecteur	Non arrêtée
2021-	V-BAT	UAV ISR: envol vertical/vol horizontal (configuration "tail-sitter")	Logicielle	APFIT ⁵⁹

 Essaim destiné à une mise en œuvre depuis un porteur aérien.

 Essaim destiné à une mise en œuvre depuis un bâtiment de surface

 Essaim susceptible d'être mis en œuvre par tout type de porteur, y compris sous-marin

■ PREMIERS JALONS

Bon marché, porté par le Naval Research Laboratory et l'Office of Naval Research, Close-in Covert Autonomous Disposable Aircraft (CICADA) a permis des expérimentations basiques en essais scriptés. Lancés empilés par tube, au format bouée acoustique (taille « A »), ou en vrac depuis un avion de transport, il n'a pas démontré de capacité dans le domaine aéromaritime, au-delà du recueil d'informations météorologiques ou NRBC. Il fait partie de ces vecteurs lancés au tube⁶⁰ qu'il s'agisse de ceux de taille « A » ou de ceux mis en œuvre au moyen du Common Launch Tube (CLT)⁶¹, de taille plus conséquente, plus apte à lancer des drones aux capacités significatives.

Perdix est constitué de micro-drones, pliés à la taille d'un leurre aéronautique, et conçus pour être éjectés en masse depuis un ou plusieurs avions de chasse. Il s'agit d'un bel exercice de style, particulièrement propice à la communication, au moment où l'approche Playbook lève le principal verrou technologique pour accéder aux TRL les plus élevés. Très légers, les drones expérimentés étaient dépourvus de charge utile. Pour autant, Perdix fait date dans la concrétisation d'essaims de drones « intelligents » : en 2016, 103 drones opérant de concert ont pu adopter diverses formations et démontrer la résilience de l'ensemble en environnement dégradé.

Capteur ESM déporté du EA-18 Growler, Remedy est mis en œuvre au moyen d'un conteneur à sous-munitions modifié, de diamètre 40 cm. Il s'agit d'un vecteur expérimental, destiné à être supervisé depuis l'EA-18. S'il n'a pas de suite directe, il est tout à fait cohérent avec les perspectives d'emploi des « Remote-carriers ».

■ « STAND-IN, AFFORDABLE MASS »

Au-delà des balbutiements, dignes d'éloges, de CICADA, Perdix ou Remedy, les armes en essaim proprement dites sont principalement portées par les expérimentations ALTIUS, déjà évoquée, LOCUST, CODE et Golden Horde Colosseum. Cet effort, on l'a vu, se concrétise déjà en programmation pour les sujets les plus mûrs.

⁵⁹ Accelerate the Procurement and Fielding of Innovative Technologies. Programme pilote mis en place en 2022 pour accélérer le déploiement de l'innovation. Les 10 mio\$ alloués restent modestes et concernent donc un déploiement expérimental qui témoigne néanmoins d'une maturité élevée.

⁶⁰ Une version tirée par canon est également mentionnée.

⁶¹ Diamètre 7 pouces longueur 4 pieds.

• NETWORKED COLLABORATIVE AND AUTONOMOUS WEAPONS

Valorisant les armes en réseau (ou NEWs pour Network Enabled Weapons) et capitalisant sur la délégation par Playbooks, CODE (pour Collaborative Operations in Denied Environment) vise à accroître la résilience et l'efficacité d'une salve de missiles de croisière exposée aux contre-mesures adverses. Navigation collaborative, communications en réseau maillé, gestion dynamique des trajectoires et de l'attrition, engagement collaboratif sont quelques-uns des bénéfices attendus de CODE. Ils illustrent bien la sur-additivité d'un fonctionnement en essaim⁶², d'autant que CODE a été conçu pour qu'un unique superviseur suffise aux éventuelles interventions humaines. CODE est le nom de baptême de l'expérimentation, c'est aussi celui du logiciel qui est propriété de l'Etat américain.

Golden Horde concrétise les avancées de CODE en validant au polygone de tir le concept de "Networked Collaborative and Autonomous (NCA) Weapons⁶³," à travers le fonctionnement en essaim de 6 GBU-53 II StormBreaker, modifiées en « CSDB-1 » (Pour Collaborative Small Diameter Bomb). A ce stade, le porteur n'est plus qu'un largueur. En ce sens, les NCAWs sont l'armement idoine pour des drones porteurs, opérant eux-mêmes en essaim. Ils ouvrent également la voie à une massification accrue des salves en exploitant des avions de transport pour les délivrer, voire, à terme, des lanceurs spatiaux. Ainsi, le Rapid Dragon de Lockheed Martin⁶⁴, désormais en service, permet d'aérolarguer des palettes de missiles de croisière (par grappes de 4 à 9 vecteurs). Ceux-ci reçoivent sous voile leurs éléments de ciblage, indépendamment du largueur. Pendant la descente, les missiles sont alors lancés en bon ordre, sans gêne mutuelle. Pour un fonctionnement en essaim, ils peuvent ensuite adopter la formation requise⁶⁵. Les capacités d'emport annoncées sont de 12 missiles pour un C-130 et de 45 pour un C-17. Rapidement, d'autres armes vont être qualifiées pour compléter les AGM-158 JASSM et LRASM, à savoir les ADM-160 MALD et JDAM-ER⁶⁶. Ce dispositif valorise considérablement les aéronefs de transport, largement répandus dans les forces aériennes, même les plus modestes, beaucoup plus nombreux que les bombardiers et pouvant s'accommoder de pistes beaucoup plus sommaires que ces derniers. Ainsi, une « ruche » est d'ores et déjà opérationnelle pour mettre en œuvre les premiers essais de NCAWs.

Le succès de Golden Horde ouvre la voie à Golden Horde Colosseum qui vise à progresser rapidement vers l'industrialisation et le déploiement de NCAWs. L'ambition affichée est de passer à une phase d'acquisition dès 2023.

⁶² Ce type de fonctionnement n'est pas sans rappeler celui revendiqué, dès les années 80, pour le missile antinavire russe P-700 Granit (ou 3K45, dénommé SS-N-19 Shipwreck par l'OTAN), supposé évoluer en essaim à basse altitude et guidé par un des missiles, opérant plus haut pour assurer et transmettre les désignations d'objectifs radar aux autres. En cas de perte du missile évoluant à plus haute altitude, un autre missile devait automatiquement prendre sa place. S'il est impossible de vérifier cette affirmation à partir de sources ouvertes, l'approche est symptomatique du bénéfice attendu d'un essaim autonome et, surtout, de l'ancienneté des réflexions sur le sujet.

⁶³ Dans la suite NCAWs.

⁶⁴ Safran fait également partie du consortium.

⁶⁵ A noter que le système semble avoir été conçu pour être opéré en toute discrétion par le pays qui l'a fourni, indépendamment de la nationalité du largueur qui agit comme un « proximi ». En tout cas, il le permet, illustrant à merveille l'expression « network is weapon », chère, en son temps, au « Network Centric Warfare ».

⁶⁶ Le récent tir d'essai « Quicksink2 » de l'US Air Force Research Laboratory met en œuvre une munition de ce type modifiée par un kit destiné à la rendre apte à un emploi antinavire. C'est une nouvelle capacité qui est conçue pour traiter les navires peu ou pas défendus : navires de commerce, auxiliaires, engins de débarquement ; typiquement le genre de flotte hybride nécessaire à la Chine pour envahir Taïwan et qui est peu à peu mise sur pied. Le kit testé tire parti de l'approche WOSA (Weapon Open System Architecture) qui vise autant à réduire les coûts qu'à multiplier les effets. Les armes bénéficiant de ce type d'architecture sont particulièrement adaptées à un emploi en essaim.

• VECTEURS COMPACTS

Exploitant des vecteurs compacts, l'expérimentation LOW Cost Unmanned aerial vehicle Swarming Technology (LOCUST) de l'Office of Naval Research met en œuvre des Coyote Block1 de Raytheon, stockés pliés, prêt pour le tir, dans un conteneur de taille « A ». Les déclinaisons potentielles de ce vecteur rustique sont des candidates aux programmes HVLRRPS/HVLRPF, NEMESIS et ALE, déjà évoqués. LOCUST a franchi un palier en 2016, avec la mise en œuvre à la mer d'un essaim d'une trentaine de vecteurs. Il aurait été employé pour de la désignation d'objectif lors du Sinkex de Unmanned Systems Integrated Battle Problem (UxS IBP), en 2021.

Dans cette même gamme de vecteurs, le drone V-Bat de Shield AI, s'il affiche une première finalité ISR, peut être décliné en munition rodeuse. Il adopte une architecture « tail-sitter », particulièrement bien adaptée à sa mise en œuvre depuis tous types de navires. Comme LOCUST, V-BAT apparaît davantage comme un produit que comme un simple support d'expérimentation.

Bien que de taille modeste, ces engins participent à l'effet de masse et à la saturation qui en résulte et ce, d'autant plus, qu'ils ne sont détectés que tardivement.

• « REMOTE CARRIERS » & « LOYAL WINGMEN »

L'expérimentation de senseurs ou d'effecteurs déportés en essaims se traduit en différentes déclinaisons collaboratives du format missile de croisière, qu'il s'agisse de porteurs largués en vol (Projets Gremlins, SparrowHawk, Speed Racer ou LongShot) ou dotés d'une puissance propulsive comparable mais lancés depuis la surface (UTAP-22⁶⁷, LCASD, Skyborg, MQ-28 Ghost Bat). Les premiers sont regroupés sous le terme de « remote carriers » tandis que les seconds sont facilement qualifiés de « loyal wingmen ». Tous visent néanmoins une action dans la profondeur et non une proximité d'aillier. Au-delà des expérimentations citées, les « remote carriers » trouvent leur concrétisation dans les Collaborative Combat Aircraft du programme Next Generation Air Dominance (NGAD)⁶⁸, option qui avait déjà été évoquée pour le B-21 Raider et finalement écartée.

Si beaucoup de choses sont publiées, le concept reste parfois un peu flou, car de multiples approches sont mises en avant qui pourraient entraîner l'éviction de certaines capacités ou l'irruption de nouvelles. De ce fait, les positions des intervenants au débat se figent rapidement dans des postures non dénuées d'arrière pensées. Plusieurs facteurs déterminants sont évoqués :

- Leur manière d'être assorti en vitesse, furtivité et survivabilité aux autres composants d'un dispositif aérien, ce qui conditionne autant leur coût que leur recevabilité ;
- Leur caractère « attritable », qualificatif choisi à dessein, par opposition aux avions pilotés dont la destruction ou l'avarie sont difficilement considérées ou douloureusement ressenties, compte tenu de leur coût unitaire, de leur délai d'approvisionnement et de la difficulté à remplacer l'éventuelle perte, temporaire ou définitive, du pilote. Un porteur « attritable » peut être exposé au feu ennemi autant que de besoin et sa perte n'est pas un drame : il désinhibe l'offensive⁶⁹ ;

⁶⁷ Susceptible d'être également lancé depuis un aéronef (F-15 par exemple).

⁶⁸ On pourrait dire « des » programmes puisqu'Air Force et Navy ont chacun le leur.

⁶⁹ Le problème de la maîtrise de l'attrition des avions d'arme ne date pas d'hier. En 1940, il explique la « retenue » de la RAF pendant la campagne de France, avant de justifier la stratégie des « petits paquets » pendant la bataille d'Angleterre. Aujourd'hui, on peut y voir l'explication de l'engagement limité des forces aériennes russes en Ukraine, peu soucieuses de voir éroder un potentiel aérien précieux dont le seul rôle n'est pas de vaincre leur voisin slave. C'est ce que généralise Benoist Bihan en parlant de « l'impossibilité de remplacer rapidement les pertes subies (qui) transforme d'un coup un risque maîtrisé en un quitte ou double aux effets potentiellement désastreux ».

- Leur coût unitaire, qui découle, entre autres, des considérations précédentes : 2 mio\$ constitue aujourd'hui un coût pivot objectif, autour duquel s'agrègent les différentes approches expérimentales ;
- Leur supervision, qui relance le débat monoplace/biplace, dans le cas du chasseur ;
- Leur mise en œuvre depuis des avions de chasse (avec en corollaire le débat sur une dégradation acceptable ou pas de leur furtivité dans le cas d'un emport externe) ou de transport (au bénéfice d'un nouvel équilibre dans la composition des forces aériennes) ;
- L'écart de maturité entre une version « air-surface », que l'on imagine assez bien, et une version « air-air », plus exploratoire.

Les porteurs, lancées depuis le sol, ou « loyal wingmen » font également l'objet de plusieurs expérimentations et les réflexions précédentes leurs sont applicables, s'agissant de l'intégration assortie à un dispositif aérien, du rapport à l'attrition, du coût unitaire, de la supervision et de la maturité différenciée entre « air-surface » et « air-air ». Dans cette catégorie, dérivé du BQM-167A Skeeter, une cible lancée par catapulte et récupérée sous parachute, l'UTAP-22⁷⁰ Mako est devenu la bête de somme des essais en autonomie collaborative. Mis en œuvre de manière similaire, le XQ-58A Valkyrie du programme LCASD (Low Cost Attritable Strike Demonstrator) en est un prolongement⁷¹. Tout comme le MQ-28 Ghost Bat de Boeing, il se place en convergence avec le programme Skyborg (ou Autonomous Attritable Aircraft Experiment AAAX), ces deux aéronefs étant mis en œuvre depuis une piste. Avec quelques centaines de kilos de charge utile, ces engins ont une capacité d'emport relativement réduite au regard de la dizaine de tonnes d'armement qui constituent la norme pour un chasseur-bombardier, certes beaucoup plus coûteux. Ce sont plutôt des charges utiles d'ISR ou de guerre électronique qui sont mises en avant ou bien des munitions ou drones compacts, tous sujets qui nécessitent un positionnement « stand-in », en ligne avec le concept d'emploi esquissé pour ces porteurs. En haut du spectre, l'emport de missiles air-air, comme l'AIM-120 AMRAAM est envisagé : c'est le projet LongShot de la DARPA. Si, au premier abord, l'emport unitaire de ces divers drones peut sembler réduit, il reste séduisant, au regard du coût d'acquisition et du prix de l'heure de vol, d'autant que l'on s'attend à générer bien davantage de sorties, à la fois à la journée et sur le cycle de vie de l'engin.

Quoi qu'il en soit, les investissements sur fonds propres⁷² démontrent l'intérêt marqué des industriels pour ces nouveaux porteurs, destinés à agir en autonomie collaborative au sein de dispositifs aériens complexes, distribués et étendus.

Certaines expérimentations entretiennent le flou sur leur finalité en suggérant qu'elles s'attachent à la réalisation d'un véritable ailier robotique, autrement plus exigeant en matière de technologie.

■ ALIERS ROBOTIQUES

En effet, pour ce qui relève du respect des règles d'engagement et de comportement ou de la lisibilité des actions, la compatibilité homme/machines atteint un premier niveau, désormais jugé acceptable, pour les projets évoqués dans les paragraphes précédents. C'est, pour beaucoup, le bénéfice du recours généralisé, et déjà évoqué, à la technologie des Playbooks pour cadrer l'action des essaims, au point de la rendre compatible avec les exigences de l'usage de la force et les principes du commandement. En revanche, l'imbrication transparente et temps réel d'agents robotiques aux dispositifs aériens, porte une exigence de sécurité, de confiance et d'interaction homme/machines qui n'a pas encore trouvé de solution pleinement satisfaisante. Cet aspect fait l'objet des expérimentations Have Raider I et II et Air Combat Evolution (ACE), projets ambitieux dont les résultats s'inscrivent

⁷⁰ Pour Unmanned Tactical Aerial Platform.

⁷¹ Tous deux sont conçus et fabriqués par Kratos.

⁷² Par General Atomics pour le SparrowHawk, mis en œuvre et récupéré par un drone MALE (MQ-1C par exemple). Par Lockheed Martin pour le Speed Racer, très orienté F-35. Par Boeing pour le MQ-28 Ghost Bat, développé en Australie mais dont un exemplaire a été rapatrié aux Etats-Unis.

davantage dans le long terme, au-delà du créneau étudié, bien que certains résultats partiels pourraient se concrétiser plus tôt, à l'IOC du MQ-25 Stingray mais aussi à travers Skyborg et son logiciel Autonomy Core System (ACS), qui est propriété de l'Etat.

○ TYPOLOGIE DES VECTEURS AUX ETATS-UNIS

Aux horizons de l'étude, quatre grandes familles de vecteurs aériens destinés à être exploités principalement en autonomie collaborative se dégagent de l'inventaire qui vient d'être fait des réalisations américaines. Il s'agit :

- Des porteurs, « remote carriers » aéroportés ou « loyal wingmen » lancés depuis la surface ;
- Des armes collaboratives en réseau ou « NCAWs », principalement des missiles de croisière ;
- Des vecteurs compacts, englobant des drones tactiques et de contact, ayant diverses finalités offensives et dont beaucoup sont lancés au tube : la majeure partie d'entre eux relève d'une nouvelle forme d'artillerie qui n'est pas en mesure de remplacer l'ancienne⁷³.
- Des RPAS en dotation, rendus aptes à l'autonomie collaborative par incrément capacitaire.

Cette typologie est bien adaptée à l'ensembles des réalisations, y compris hors Etats-Unis. Les paragraphes suivants s'intéressent aux évolutions anticipables de ces vecteurs aux horizons de l'étude ; là aussi, ce qui est valable en Amérique l'est ailleurs, au moins en tendance.

■ RPAS : UN MODE DE MISE EN OEUVRE BIENTÔT PREPONDERANT

Les RPAS en service peuvent être rendus aptes à l'autonomie collaborative par l'adjonction d'une nacelle dédiée⁷⁴ ou en les intégrant tels quels dans un système de supervision qui allège le travail de l'opérateur, au point de rendre fluide et efficace la mise en œuvre simultanée de plusieurs drones MALE⁷⁵ ou tactiques par une seule personne. Cela change moins les capacités intrinsèques de ces drones que leur aptitude à évoluer dans des environnements plus contestés où à accomplir des tâches plus complexes en extension de moyens habités sans le support d'une supervision tierce. Les drones ainsi exploités en autonomie collaborative sont alors davantage en « stand in » et les vecteurs habités qui les exploitent en « stand off ». Les tâches sont accomplies avec une coordination accrue et une plus grande robustesse du dispositif en cas d'agression des liens de pilotage ou de navigation, ou bien lorsque des menaces se démasquent soudainement. Les tâches confiées peuvent s'enchaîner sans autre intervention humaine que la supervision de comportements préétablis. Ainsi, plusieurs drones pourront trianguler une menace, le plus apte et le mieux placé pourra en effectuer la désignation au profit d'un drone tireur, requis automatiquement, et qui engagera sur simple perception d'une désignation laser amie. Cette fluidité de l'engagement est directement supervisée par les éléments au contact ; elle accroît leur réactivité pour tirer parti des événements et engager en premier à distance de sécurité. La transposition de cette approche aéroterrestre au domaine aéromaritime est mature aux horizons de l'étude ; elle est cohérente avec les ambitions croissantes en matière de tenue de situation tactique et l'inflation des distances minimales d'approche qui limite la réponse que peuvent y apporter les aéronefs habités.

Cette nouvelle manière d'exploiter les drones télépilotes permet leur mise en œuvre au sein de la force par des personnels dont ce n'est pas la tâche première ou exclusive (Contrôleur tactique, équipage

⁷³ Elle n'en a ni la foudroyance, (on arrive aujourd'hui à Mach5 en vitesse de bouche) ni encore le caractère tous temps.

⁷⁴ Pod Agile Condor pour les MQ-9 ou MQ-1C, par exemple.

⁷⁵ C'est le MUMT-X.

d'aéronef de combat). Le pilotage effectif à distance, par action manuelle sur les commandes de vol ou gestion de l'autopilote, cesse alors d'être le mode de mise en œuvre prépondérant. En corollaire, l'exploitation directe et en autonomie collaborative d'un ou plusieurs drones MALE ou tactiques par un unique opérateur polyvalent signe la fin, ou tout au moins la marginalisation progressive, des équipes de pilotages à distance, telles qu'on a pu les voir opérer ces trente dernières années, depuis l'expansion de ce type d'engins : un nouveau mode d'exploitation qui est davantage en phase avec une logique d'engagement majeur et s'inscrit en rupture des pratiques de la guerre contre le terrorisme, dont l'emploi à distance des RPAS est emblématique.

■ PORTEURS ROBOTIQUES : VERS L'ADOPTION

Vecteurs connectés, les « remote carriers » et « loyal wingmen » permettent potentiellement à un dispositif aérien d'étendre son action, notamment en espace contesté, de la déporter, de la différer, de la prolonger, de la rendre plus fréquente, plus saturante, plus imprévisible, plus résiliente, plus réactive, moins facilement quantifiable ou anticipable. Ils constituent également une réponse à la portée accrue, voire supérieure, de certaines armes adverses, notamment russes ou chinoises⁷⁶. Ils permettent enfin d'étendre le concept de zone d'interception assurée, ou « no-escape zone », popularisé par le missile air-air Meteor.

C'est un choix séduisant pour accroître le format des forces aériennes en s'affranchissant de la loi d'Augustine, précédemment citée, et de la pénurie chronique de pilotes. Mais, ce faisant, une nouvelle ventilation des crédits d'équipement apparaît entre vecteurs pilotés et agents robotiques (sans oublier leurs éventuels porteurs, qui ne sont pas forcément des chasseurs-bombardiers). En dépit des orientations arrêtées, le sujet fait débat et ne sera pas épuisé par un unique examen budgétaire annuel. Pour cette raison, mais aussi parce que l'adoption de ces vecteurs robotiques déportés suppose une refonte des procédés de mise en œuvre de l'arme aérienne, leur arrivée sera probablement progressive et passera par une phase de démonstration de capacité, d'évaluation opérationnelle, voire d'engagement au combat.

Ce sont les aéronefs en service les plus récents qui seront les premiers à les exploiter, d'abord pour des tâches simples de ravitaillement en vol, de diversion et de leurrage, puis, progressivement, pour l'ISR, la frappe air-surface ou le brouillage électromagnétique. L'engagement « air-air » offensif ne devrait devenir réalité qu'au-delà de l'horizon de l'étude, sous réserve que de nouveaux missiles à longue portée ne lui soient préférés ; la détection passive d'aéronefs adverses ou de missiles assaillants pourrait constituer un premier incrément de cette nouvelle capacité, comme peuvent le suggérer les essais d'un MQ-20 Avenger autonome équipé d'IRST⁷⁷ ou les préparatifs de l'expérimentation, à partir d'un F-15, d'un UTAP-22, porteur d'un détecteur de missile (Missile Approach Warning Systems (MAWS)).

■ NCAWs : LA GENERALISATION

Les Network Enabled Weapons (NEW) constituent un standard à partir duquel il est possible d'évoluer vers les Networked Collaborative Autonomous Weapons, les NCAWs, en déclinant une version idoine. Force est de constater que les briques se mettent en place de manière cohérente pour constituer, autour des AGM-158C LRASM et JASSM-ER et de l'ADM-160 MALD X, les premiers essaims de missiles de croisière fonctionnant en autonomie collaborative. Après CODE qui lève les verrous logiciels, Golden Horde entreprend la démonstration physique, prolongée par Colosseum pour atteindre les TRL les plus élevés, tandis que Rapid Dragon valide entre-temps le dispositif de lancement rapide et massif, nécessaire au déploiement de l'essaim. On peut remarquer la cohérence du calendrier et constater aussi que la production d'AGM-158 LRASM et JASSM-ER va rapidement être doublée, en phase avec

⁷⁶ En particulier les missiles air-air et les missiles balistiques antinavires.

⁷⁷ Lockheed Martin Legion Pod

la transition annoncée.

Certes, une autre interprétation est possible en considérant justement qu'en 2023 l'accent est mis sur la production de masse à court terme, peu propice à l'intégration d'évolutions aussi conséquentes, généralement issues d'un processus de validation long et progressif. D'aucun souligneront que, sans même fonctionner en autonomie collaborative, l'AGM-158 est doté de caractéristiques qui lui assurent déjà une certaine supériorité, ce qui pourrait permettre d'en différer quelque peu le fonctionnement en essaim.

Aussi bien, les deux interprétations de la décision de doubler la production de ces missiles peuvent être toutes les deux valables et constituer deux phases successives, tuilant la fabrication des deux versions de l'arme.

Les nouveaux missiles sont aussi susceptibles de matérialiser la mise en service progressive des NCAWs. Par exemple, le Stand-in Attack Weapon (SiAW), arme supersonique qui cible en particulier les systèmes de défense aérienne intégrés et offrira une grande facilité de mise à niveau logicielle. Son entrée en service est attendue vers la fin de la décennie. De par sa taille, le plus gros des ALEs⁷⁸ envisagés entre aussi dans cette catégorie.

■ VECTEURS COMPACTS : L'ACULTURATION

Encore rares, les vecteurs compacts fonctionnant en essaim n'en sont pas moins une réalité. A cet égard, le développement des ALEs pour l'US Army Aviation devrait avoir des retombées aéromaritimes, de même que les récentes acquisitions du SOCOM ou de l'USMC. Les vecteurs compacts constituent une alternative offensive interstitielle, entre missiles et artillerie ; ils offrent aussi un appoint significatif pour une ISR « stand-off » mais plus ambitieuses. Portés par une maturité élevée, une intégration accessible et de multiples expérimentations, ils devraient trouver progressivement leur place au sein de l'arsenal de l'US-Navy aux horizons de l'étude.

○ UNE BITD AMERICAINE EN ORDRE DE BATAILLE

La revue des expérimentations permet de constater que tous les acteurs se sont mis en ordre de bataille pour avancer à marche forcée : travail en plateau, regroupant industriels et étatiques, implication des forces et structures organiques, intensification des essais, réorientations rapides des crédits, mobilisation accélérée des financements, via des bouquets de processus contractuels dérogatoires, partage interarmées systématique, continuité des orientations en dépit les changements d'administration, recours obligatoire aux architectures ouvertes propriétés de l'Etat, initiatives industrielles, sur fond propres ou avant notification.

Tous les projets de drones aériens destinés au combat aéromaritime intègrent désormais, explicitement ou implicitement, un fonctionnement en autonomie collaborative qui est appelé à devenir un standard de leur mise en œuvre, quel que soit le nombre de drones supervisés.

La coopération interarmées sur le sujet est totale, à tel point qu'une même technologie peut être améliorée successivement par des armées différentes, comme l'illustre le développement des Playbooks qui sont portées depuis 2017, par le projet OFFSET⁷⁹ de la DARPA, qui s'appuie sur un support et un environnement terrestre mais dont les avancées trouveront à s'appliquer dans tous les domaines. En revanche, chaque composante oriente ses efforts dans sa logique de milieu. Ainsi, l'US-

⁷⁸ Poids : 80 à 100 kg ; vitesse : 350, voire 600 nds ; autonomie : 30 à 60 mn à 190-300 Nq.

⁷⁹ OFFensive Swarm Enabled Tactics qui a pour support l'action d'essaims hétérogènes (jusqu'à 250 drones terrestres et aériens) en environnement urbain et s'attache à progresser en matière d'autonomie collaborative et de « human-swarm teaming ». Dans une approche « top-down », le bénéfice attendu d'OFFSET est de bien refléter les intentions du commandant en décrivant les capacités de l'essaim en langage tactique courant.

Navy s'attache à la bonne intégration des essais aux plates-formes navales, l'US Army en optimise l'exploitation par ses opérateurs non-dédiés et l'US Air Force fait progresser la compatibilité homme/machines pour les applications les plus exigeantes. En caricaturant, on peut dire que l'US Air Force est souvent dans une approche « top – down » quand l'US Army fait dans le « bottom-up » et que l'US Navy adopte une démarche pragmatique.

Côté architecture, l'approche étatique américaine consiste à imposer la séparation physique des sous-ensembles, suivant trois grandes fonctions :

- Le drone proprement dit avec une architecture propriétaire, très adhérente au vecteur ;
- Le système de mission, dont l'architecture ouverte est imposée et qui assure le « edge » pour traiter les données des capteurs, naviguer ou assurer un contrôle hiérarchique d'autres agents ;
- Un dispositif d'autonomie collaborative, lui aussi en architecture ouverte, voire propriété de l'Etat.

Une telle approche est propice aux développements accélérés et parallèles, favorisant, voire forçant, les coopérations, au bénéfice d'une compatibilité accrue des systèmes. Ainsi, la porte est maintenue grande ouverte pour les nouveaux entrants et les coûts d'ensemble sont maîtrisés. Au résultat, et à titre d'exemple, un drone MQ-25 Stingray de Boeing est supervisé via la console MD-5 Ground Control Station de Lockheed Martin.

○ SYNTHÈSE DES INITIATIVES AUX ETATS-UNIS

Aux Etats-Unis, les technologies d'autonomie collaborative ont quitté la validation en environnement représentatif pour le prototypage en environnement opérationnel, l'industrialisation et les premières IOC.

Soucieuses d'éviter les critiques assimilant les essais de drones à des SALA⁸⁰, les autorités américaines en ont longtemps vanté l'aspect « semi-autonomes », en lien avec la technologie des Playbooks, très représentative de cette approche, centrée sur le respect inconditionnel des règles d'engagement et le primat de l'action humaine. L'évolution récente du contexte international autorise désormais une communication plus offensive, basée sur la simple mention d'un « niveau approprié de décision humaine », certes conforme à la doctrine établie en 2012, mais qui ne veut rien dire et, surtout, ne ferme aucune option.

Très ambitieuse, à travers le programme emblématique de drone ravitailleur MQ-25 Stingray, l'US NAVY est en pointe pour concrétiser les technologies d'autonomie collaborative développées en son sein ou en interarmées. Tous les porteurs et domaines de lutte sont concernés par cette évolution dont les premières capacités opérationnelles deviendront réalité aux horizons de l'étude mais dont les développements les plus aboutis ne seront sensibles qu'au-delà.



- RESTE DU MONDE : ENTRE SUIVISME ET PROLIFERATION

Quatre tendances peuvent être dégagées de l'observations des différentes initiatives entreprises hors des Etats-Unis :

- Une coopération anglo-saxonne renforcée autour des Etats-Unis et déclinant l'axe AUKUS ;
- Un suivisme des Etats-Unis, notamment de la part de grands pays (Chine, Russie, Inde) ;

⁸⁰ Systèmes d'Armes Létales Autonomes ou LAWS pour Lethal Autonomous Weapon Systems.

- Un début de prolifération des munitions rodeuses en essaim, souvent alimenté par une offre en provenance de puissances de second rang ou d'acteurs industriels émergents ;
- La prévalence de technologies téléopérées ou scriptés sur les théâtres d'opérations (Ukraine, Moyen-Orient) ou de tension (Taïwan).

○ PREVALENCE DE L'EMPLOI DES ESSAIMS SCRIPTES ET TELEOPERES

La perception des essaims de drones résulte de l'emploi qui peut en être fait depuis quelques années au Moyen-Orient⁸¹, en Lybie⁸² ou en Ukraine⁸³. De ce qui est accessible ou observable, il peut être déduit qu'il s'agit, presque à chaque fois⁸⁴, de drones aériens scriptés ou téléopérés, le plus souvent artisanaux, parfois industriels mais sommaires. Ces essaims agissent surtout de jour, parfois à des elongations très importantes, occasionnellement avec d'autres moyens, pour les compléter ou faire diversion (missiles de croisière ou balistiques, par exemple). En dehors des réalisations artisanales, la Turquie et l'Iran sont les principaux fabricants de ces drones aériens utilisés en essaim. Ceux-ci sont particulièrement bien adaptés à une frappe en premier par surprise et l'Iran met en service une flotte de navires destinés à mettre en œuvre simultanément de nombreux drones aériens téléopérés⁸⁵. Le cas de la Chine a été précédemment évoqué à travers la dronisation de vieux chasseurs J-6 et J-7 exploitant ces mêmes technologies.

Ce type d'essaim offensif cherche à conjuguer la surprise, conséquence d'une détection tardive, et la saturation. Une exploitation médiatique du fait d'arme est fréquemment associée à ce type d'attaque, propre à marquer les esprits, quand bien même les résultats seraient des plus réduits.

Ces dispositifs, relativement simples, peuvent être réalisés à partir de composants sur étagère. Souvent mis en œuvre en environnement terrestre, ils sont exploitables en combat aéromaritime, surtout pour une première frappe.

○ AMORCE D'UNE PROLIFERATION DES MUNITIONS RODEUSES EN ESSAIM

Hors Etats-Unis, la déclinaison des munitions rodeuses en essaims de drones fait l'objet d'une offre industrielle variée qui amorce une prolifération de petits vecteurs offensifs, conçus dès l'origine pour un emploi en essaim, parfois en autonomie collaborative. Ces réalisations sont souvent le fait de nouveaux entrants. Les lancements au tube prédominent et l'emploi visé est le plus souvent aéroterrestre. Seules

⁸¹ On pense, par exemple, aux attaques de DAESH sur les bases aériennes russes en Syrie et à la frappe des Houthis sur les terminaux pétroliers saoudiens.

⁸² Le rapport final du Groupe d'experts sur la Lybie, créé par la résolution 1973 (2011) du Conseil de sécurité de l'ONU, en date du 8 mars 2021, fait état de l'action autonome de drones turcs Kargu-2, programmés pour attaquer, sans qu'il soit besoin d'établir une connexion des données entre l'opérateur et la munition. Le Kargu-2 est réputé avoir une capacité à agir en essaim.

⁸³ Attaque des unités russes à proximité ou dans le port de Sébastopol.

⁸⁴ A l'exception notable d'Israël, premier pays à utiliser des essaims de drones en contre-guérilla. Sujet bien réel mais assez peu documenté.

⁸⁵ Ce sont surtout les gardiens de la révolution qui sont à l'œuvre en modifiant à cette fin des navires marchands. Ainsi, les porte-conteneurs Shahid Mahdavi and Shahid Bagheri de 240 m de long sont en cours de modification, principalement par l'adjonction d'une vaste extension sur bâbord, destinée à augmenter la surface de pont d'envol. Le premier devrait rejoindre la flotte en 2023. Ils viendront compléter le Shahid Roudaki de 150 m de long, le Lavan de 93 m de long, le Delvar de 64 m de long et peut être aussi le Makran de 228 m de long, lui aussi doté d'une vaste plateforme aéronautique.

sont citées dans le tableau ci-dessous les offres les plus emblématiques, justiciables d'un emploi en combat aéromaritime, au moins en environnement portuaire ou côtier.

Baptême	Fabricant	Pays	Caractéristiques saillantes de l'essaim et de ses vecteurs				
N-Raven	Paramount Advanced Technologies	Afrique du Sud	L'usage aéromaritime est mentionné. Attendue pour 2024. (Lancement par catapulte à confirmer)				
			Poids/CU(Kg)	Architecture	Portée (Nq)	Autonomie	Vitesse (nds)
			41/10	Aile volante	130	2	100
Koub BLA	Zala Aero Group (Société Kalachnikov)	Russie	Proposé pour un usage maritime. Lancé par catapulte.				
			Poids/CU(Kg)	Architecture	Portée (Nq)	Autonomie	Vitesse (nds)
			?/3	Aile volante	20	30 mn	40-70
Drone40 & Drone 155	DefendTex	Australie	Quadcopters, principalement aéroterrestres, lancés au tube				
			Poids/CU(Kg)	Architecture	Portée (Nq)	Autonomie	Vitesse (nds)
			0,3/ ?	Plié Ø40 mm	10	1h	40
			30/10	Plié Ø155 mm	40	2h	70
The Attack Drone	Pride Systems	Arménie	Aéroterrestre, lancé par conteneur et fusée. Une exploitation en essaim a été avancée.				
			Poids/CU(Kg)	Architecture	Portée (Nq)	Autonomie	Vitesse (nds)
			5/?	Tandem plié	40	1h	40-100
ALPAGU	STM	Turquie	Lancés au tube pour un emploi aéroterrestre				
			Poids/CU(Kg)	Architecture	Portée (Nq)	Autonomie	Vitesse (nds)
			3,7/0,4	Pliée	5	15 mn	40
Hunter 2-S	Edge	Emirats Arabes Unis	Lancé au tube (21 drones en 60s).Autonomie collaborative.				
			Poids/CU(Kg)	Architecture	Portée (Nq)	Autonomie	Vitesse (nds)
			13/2	Pliée	20	45 mn	50
CH-901	China Aerospace Science and Tech. Corp.	Chine	Lancé au tube ou d'aéronef				
			Poids/CU(Kg)	Architecture	Portée (Nq)	Autonomie	Vitesse (nds)
			9/3,5	Tandem plié	8	1h	55-150
CATS ⁸⁶ ALFA-S ⁸⁷	HAL	Inde	Largué en vol en sous-munitions d'un conteneur-planeur au format missile de croisière, lui-même largué en vol				
			Poids/CU(Kg)	Architecture	Portée (Nq)	Autonomie	Vitesse (nds)
			25/8	Tandem plié	>50	1,5h	60
LISS ⁸⁸	Escribano	Espagne	Autonomie collaborative.				
			Poids/CU(Kg)	Architecture	Portée (Nq)	Autonomie	Vitesse (nds)
			7/	Plié taille "A"	5	45 mn	?

 Essaim destiné à une mise en œuvre aéromaritime, ou tout au moins présenté comme tel.

 Essaim susceptible de constituer une menace en environnement portuaire ou côtier.

⁸⁶ C'est l'un des composants du Combat Air Teaming System.

⁸⁷ Air Launched Flexible Asset Swarm. Il s'agit d'une coopération entre Newspace Research & Technologies, HAL et l'US Air Force Research Laboratory.

⁸⁸ Long-range Intelligent Security System.

Certains de ces produits sont disponibles à l'achat, d'autres font l'objet d'une promotion commerciale en avance de phase pour tester un marché prometteur qui devient très actif.

Une mention particulière pour Israël qui semble très avancé en la matière avec des produits comme Torch-X RAS d'Elbit Systems, destiné à planifier et superviser l'action collaborative d'agents hétérogènes. Si le combat urbain tient une place importante dans l'approche israélienne des essais, les industriels du pays sont aussi une référence en matière de munitions rodeuses⁸⁹ et il ne fait guère de doute qu'ils ne sont pas en retard pour y appliquer les technologies d'autonomie collaborative, dont de nombreuses indications donnent à penser qu'ils ont une bonne maîtrise.

Taïwan affiche une capacité SEAD, basée sur des munitions rodeuses Jian Hsiang en essaim, et qui vise sans ambiguïté les groupes aéronavals de l'APL. Le vecteur n'est pas sans rappeler le Harpy d'IAI.

○ DECLINAISONS DES PROJETS PHARES AMERICAINS

Les projets américains les plus ambitieux trouvent rapidement leur pendant parmi les pays qui en défient l'hégémonie ou montrent de grandes ambitions géopolitiques. Ainsi, les expérimentations autour de ce que l'on a appelé, un peu vite, les « loyal wingmen »⁹⁰ ont leurs pendants en Russie (Grom), en Chine (FH-97A) et en Inde (CATS Warrior). La Corée du Sud décline aussi le concept (KUS-LW). Certains vont plus loin encore avec des engins supersoniques, comme Singapour (Arrow) voire hypersoniques comme la Chine (MD-22).

En montant en gamme, les UCAV, proches cousins, sont aussi largement représentés, en Russie (S70 Okhotnik et SKAT), en Chine (Dark Sword (supersonique), GJ-11 Sharp Sword et CH-7) en Inde (Ghatak) et en Turquie (Kizilelma et Anka-3), voire en Ukraine (ACE One⁹¹), du moins avant la guerre. Au titre des projets stoppés, on peut citer le Taranis britannique.

La Russie décline les « remote carriers » à travers le Molniya de Kronstadt qui, à l'image du Gremlins pourrait être récupéré, à terme, par un avion de transport Il-76.

La marine russe met en avant sa capacité d'échange de données entre le drone tactique Forpost et les avions de patrouille maritime Tu-142 Bear F/J, capacité qui devrait être étendue aux drones MALE ALTIUS-U et Orion ainsi qu'au S70 Okhotnik. A terme, d'autres type d'avions de patrouille maritime pourraient être concernés. Une approche qui pourrait signer l'amorce d'un fonctionnement en essaim.

Une incertitude demeure sur les capacités réelles, compte tenu de la nature même de la technologie, essentiellement logicielle. Pour autant, rien ne semble aussi avancé que les réalisations américaines. C'est particulièrement vrai pour le MQ-25 Stingray. Un certain nombre de ces projets pourraient relever de l'affichage ou de la velléité.

○ AUKUS : UNE COOPERATION RENFORCEE

A plus bas niveau de bruit, Australie et Royaume-Uni sont des pays qui comptent dans le développement des technologies d'essaim et une coopération approfondie avec les Etats-Unis sur le sujet est perceptible. Il est vrai que les Britanniques offrent une contribution recherchée, dans un domaine dont ils ont fait une priorité. L'acquisition, pour équiper les F-35 d'outre-Manche, du missile SPEAR 3 (Select Precision Effects At Range), potentiellement prévu pour fonctionner en essaim, notamment sur des missions de type SEAD, l'activation d'une petite unité⁹² dédiés aux multiples expérimentations en essaim, l'existence de projets ambitieux et susceptibles d'être ouverts à la

⁸⁹ HAROP et HARPY chez IAI, Firefly chez Rafael, gamme Hero chez UVision et Ninox chez Spear.

⁹⁰ XQ-58A Valkyrie, Skyborg, MQ-28 Ghost Bat.

⁹¹ Air Combat Evolution One, de la firme éponyme.

⁹² Squadron 216, en particulier.

coopération, tel le « loyal wingman » LANCA (Lightweight Affordable Novel Combat Aircraft⁹³) et sa déclinaison embarquée Vixen⁹⁴, la tenue de grands exercices dédiés (« unmanned warrior » puis « autonomous warrior » et « robotic experimentation and prototyping ») et une BITD dynamique⁹⁵ sont autant d'atouts pour engager une coopération. Dans l'hémisphère sud, la situation est similaire et la concrétisation du MQ-28 Ghost Bat par Boeing en Australie y est emblématique d'une nouvelle dynamique, confortée par l'accord AUKUS. Certes, quelques coquilles vides⁹⁶ côtoient les pépites, mais la volonté est là, matérialisée par des réalisations de référence qui dessinent les lignes de force d'une coopération toujours plus étroite.

Cette coopération est aussi un laboratoire des enjeux d'interopérabilité, qui sont la conséquence de l'irruption de la robotique sur le champ de bataille, et dont les orientations seront au moins esquissées dans la période couverte par l'étude. Handover entre superviseurs alliés ou prise en compte des caveats dans les logiciels, sont deux exemples, parmi d'autres, des sujets qui méritent d'être abordés.

○ SYNTHÈSE DES INITIATIVES HORS ETATS-UNIS

Les efforts de mise en service de ces drones en autonomie collaborative par les pays qui cherchent à s'en doter sont pour la plupart orientés vers le combat de haute intensité pour en accélérer le tempo, accroître et distribuer la létalité. Là aussi, il s'agit d'exploiter des vulnérabilités peu ciblées, de contourner et saturer les défenses pour conserver une capacité d'entrée en premier ou conforter un déni d'accès.

Si personne ne semble encore en mesure de contester l'avance américaine dans ce domaine, aux horizons de l'étude, il n'en demeure pas moins que de nombreux pays sont très actifs sur le sujet et qu'au-delà des postures, les réalisations concrètes se multiplient et sont, pour certaines, du meilleur niveau, notamment en Israël et chez les anglo-saxons d'AUKUS qui enclenchent là une dynamique de coopération vertueuse.

A travers cet inventaire, on voit déjà se dessiner les cas d'usage des essaims de drones aériens et les opportunités offensives qu'ils peuvent offrir.



CAS D'USAGE VIS-A-VIS D'UNE FORCE : LE CHAMP DES POSSIBLES

Moins frotté au réel que le mode d'action, plus civil dans son approche, le cas d'usage, notion venue de l'informatique, sera vu ici comme exprimant le possible, premier jalon destiné à en extraire l'utile en le confrontant aux contraintes d'emploi, dans le contexte particulièrement exigeant du combat aéromaritime.

⁹³ Dont un des principaux acteurs industriels de la phase de conception fut l'américain Spirit AeroSystems. Le programme vise depuis juin 2022 un horizon post 2035, sans démonstrateur à court terme.

⁹⁴ Dans le domaine des drones, le Royaume Uni affiche de grandes ambitions en matière de groupe aérien embarqué : guet aérien, ravitaillement en vol et, bien sûr, guerre électronique et frappe. Un drone MALE STOL (Short Take-Off and Landing) de General Atomics (type Mojave) sera prochainement opéré par l'un des deux porte aéronefs lors d'essais dédiés.

⁹⁵ Qui compte quelques pépites comme Blue Bear.

⁹⁶ Projet LANCA incertain, Squadron 216 à faible effectif.

- VECTEURS, CHARGES UTILES ET MISE EN OEUVRE

Les cas d'usage potentiels ont été considérés au vu des quatre grandes familles de drones aériens en essaim déjà évoquées, de leurs charges utiles et de leurs plates-formes de mise en œuvre.

Pour les vecteurs, il s'agit, pour mémoire :

- Des « remote carriers », aéroportés, ou « loyal wingmen », lancés depuis la surface ;
- Des armes classiques en réseau ou « NCAWs » ;
- Des vecteurs compacts ;
- Des RPAS, rendus aptes à l'autonomie collaborative par incrément capacitaire.

Ces vecteurs sont susceptibles de mettre en œuvre diverses charges utiles⁹⁷ parmi celles qui sont listées ci-dessous, par type ou par finalité. Il s'agit :

- De celles qui relèvent de l'ISR et de l'ISTAR ;
- Des charges de leurrage et brouillage électromagnétique ;
- De l'armement à délivrer ;
- Des charges explosives ;
- Des charges HPM⁹⁸ ;
- Des capteurs d'environnement météorologique ou océanographique ;
- Des charges de communication pour concourir à diverses liaisons tactiques mais aussi pour des opérations d'influence ou de maintien de connectivité en direction des populations.

En contexte aéromaritime, les différents vecteurs sont susceptibles d'être lancés depuis la terre, la mer ou l'air, par des plates-formes existantes⁹⁹, éventuellement adaptées à la marge. Une mention particulière pour :

- Les navires de commerce qui peuvent d'autant plus rapidement être exploités que de nombreux vecteurs peuvent être conditionnés en conteneur ISO¹⁰⁰ ou s'accommoder d'une petite surface de pont ;
- Les lanceurs spatiaux ou missiles balistiques qui sont susceptibles d'être utilisés, à terme, pour déployer rapidement des essaims¹⁰¹ ;
- Les avions de transport tactiques (ATT), nouveaux candidats aux opérations aéromaritimes pour insérer en masse des drones aériens, voire les récupérer pour enchaîner les vols ;
- Les avions de patrouille maritime, dont la soute devient un équipement incontournable dans la perspective des essaims.

Sans entrer dans les subtilités, le tableau suivant rassemble les couples potentiels vecteur/charge utile et vecteur/lanceur. Il donne une première idée du champ des possibles.

⁹⁷ A noter qu'un drone destiné à intercepter un ou plusieurs autres drones par impact cinétique n'a pas, à proprement parler, de charge utile. Il entre ici dans la catégorie des vecteurs compacts.

⁹⁸ High Power Microwaves, destinées à détruire l'électronique exposée à leurs effets.

⁹⁹ Aéronefs, bâtiments de surface et sous-marins.

¹⁰⁰ Comme le XQ-58A Valkyrie, présenté sous cette forme en 2019, paré à être catapulté.

¹⁰¹ Rocket Cargo fait partie des programmes Vanguard déjà évoqués. Il reprend, dans le contexte du « New Space » et pour la logistique, l'idée, déjà ancienne, d'insérer des charges utiles par voie spatiale (projet Ithacus de 1963, destiné à insérer des Marines de cette manière, depuis la terre ou des plates-formes navales). De là à penser que Rocket Cargo pourrait servir à autre chose...

Lanceurs potentiels											Charges utiles envisageables							
TERRE	NAVIRES DE COMMERCE	PORTE-AVIONS	BATIMENTS DE SURFACE	SOUS-MARINS ET UUVs	AVIONS DE CHASSE	AVIONS DE PATROUILLE MARITIME	AVIONS DE TRANSPORT TACTIQUE	HELICOPTERES	RHIB	LANCEURS SPATIAUX		ISR & ISTAR	BROUILLAGE LEURRAGE EM	EXPLOSIF	HPM	ENVIRONNEMENT	COMMUNICATIONS	ARMEMENT
✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	Loyal Wingmen	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓
✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓	Remote Carriers	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓
✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	NCAWs	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✗
✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	Vecteurs compacts	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	Ex-RPAS	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓

Pour assurer leur supervision, en milieu aéromaritime, les essais pourront le cas échéant bénéficier de l'appui d'aéronefs de guet aérien, tout comme ils peuvent être amenés à solliciter les liens satellites pour leurs communications.

- LES MOYENS DE LANCEMENT

Pour les ex-RPAS et les « loyal wingmen », les modes de lancement sont bien connus : piste, catapulte ou pont d'envol.

Pour lancer les autres vecteurs susceptibles d'opérer en essai depuis la mer, plusieurs dispositifs peuvent être utilisés en fonction de la plate-forme. Ils sont répertoriés dans le tableau ci-dessous :

	Remote carriers	NCAWs	Vecteurs compacts
Avion de Transport Tactique	Soute, rampe, portes, points d'emports externes		
Avion de Patrouille Maritime ¹⁰²	Soute		Systèmes taille « A » Système > taille « A »
Hélicoptère ¹⁰³			Lance-bouées taille « A » Tube ext ou int (CLT) Porte latérale / Rampe
Drone			Lance-bouées taille « G »
Avion de chasse	Points d'emports		Facteur de forme missile de croisière

¹⁰² La présence d'explosif en dehors de la soute ou de points d'emport est souvent bannie par la réglementation.

¹⁰³ La présence d'explosif à l'intérieur de l'appareil est le plus souvent bannie par la réglementation.

Navire de commerce		Conteneurs	Conteneurs, ruches, pont
Bâtiment de surface		VLS	Ruches, plate-forme avia
Sous-marin		Tubes de lancement d'armes	Système taille « A » Sas vide ordures SAS nageurs
Drone sous-marin			CLT ou taille « A »
RHIB			CLT ou taille « A »
Vecteur sous-marin commando			Ruche sous-marine CLT, tailles « A », « G » LGM ¹⁰⁴ 40 mm

 Essaim mis en œuvre depuis un porteur aérien

 Essaim mis en œuvre depuis un porteur de surface

 Essaim mis en œuvre depuis un porteur sous-marin

Quelques précisions sont nécessaires :

- Soute et rampe d'un ATT peuvent être exploités en l'état pour des largages massifs, au moyen de dispositifs ad hoc, comme le Rapid Dragon de Lockheed Martin¹⁰⁵, déjà évoqué, ou, à son échelle, le SSA-1604 Foudre, de Turgis et Gaillard, qui s'attache au largage en masse de munitions de précision depuis un A400M, premier pas vers la mise en œuvre d'essaims par le même porteur. La soute d'un ATT est également exploitée dans le projet Gremlins, non seulement pour le lancement, mais aussi pour la récupération et la régénération de potentiel des vecteurs. Sur certains hélicoptères, la présence d'une rampe arrière peut offrir des options de largage.
- La soute d'un avion de patrouille maritime est un atout pour la mise en œuvre des trois types de drones mentionnés dans le tableau ci-dessus. On voit mal aujourd'hui un nouvel appareil qui en serait dépourvu, d'autant que l'emport de matière active à l'intérieur de ces aéronefs est rarement autorisé ou de manière très restrictive ; ce dernier point est encore plus vrai pour les hélicoptères dédiés au combat aéromaritime.
- Les portes latérales d'un ATT, ou de certains hélicoptères, peuvent être envisagées pour un largage en séquence et par parachutage de l'essaim. Ce mode de mise en œuvre était proposé par la société française Airborne Concept¹⁰⁶ pour son dispositif Drop'n drone, conteneur qui s'ouvre sous voile pour larguer le drone. C'est une approche pertinente pour des drones qui ne peuvent exploiter un dispositif de mise en œuvre standard, en général au vu de leur facteur de forme.
- Les points d'emport externes ou internes de divers aéronefs constituent une option, lorsque le vecteur ou la ruche de lancement sont conçus nativement pour les exploiter. A cet égard, une enveloppe type missile de croisière permet de mettre en œuvre en essaim des drones plus petits, voire de les rapprocher d'un objectif si elle est propulsée ou peut planer ; c'est le concept CATS Hunter/ALFA-S, développé en Inde. Les conteneurs à sous-munitions peuvent être détournés de leur usage pour larguer des drones, comme l'illustre le projet Remedy. Enfin, il est toujours possible de développer un contenant ad hoc, construit autour d'un vecteur particulier.
- Les tubes existants ou dédiés sont une option de lancement très en vogue pour mettre en œuvre des vecteurs de petite taille. La taille « A », voire la taille « G », moitié moins longue, largement

¹⁰⁴ Lance grenades multiple.

¹⁰⁵ Safran fait également partie du consortium.

¹⁰⁶ Qui a cessé son activité.

répandue, offre une option, à travers les lance-bouées des aéronefs, drones compris, ou les lance-leurres des sous-marins et bâtiments de surface. Les aptitudes limitées autorisées par ce petit gabarit ont conduit à l'adoption du Common Launch Tube (CLT) aux Etats-Unis. On retrouve ce type de tube groupé en soute d'un aéronef, intégré à une nacelle moteur en voilure fixe ou en point d'emport externe. Il semble bien correspondre à l'état de l'art, actuel et anticipable, des petits vecteurs. Il est également adapté aux vecteurs commandos et aux bâtiments de surface. Il peut être envisagé, tout comme les tailles « A » et « G », pour des UUV ou des ruches sous-marines, en vue de mettre en œuvre des vecteurs à changement de milieu¹⁰⁷. Pour mémoire, les lance-grenades de 40 mm offrent une option aux commandos pour les micro-drones de ce calibre, susceptibles de fonctionner en essaim, tel le Drone40 de DefenTex.

Dans tous les cas, le lancement par aéronef suppose une prise en compte, par le drone ou le dispositif de largage, des contraintes aérodynamiques associées : turbulences de proximité, sortie de vrille, lancement sous rotor à moins de 100 fts sont les exemples qui viennent immédiatement à l'esprit.

- En fonction de leur configuration propre et des vecteurs à lancer, navires de surface et sous-marins pourront tirer parti d'espaces ou de dispositifs existants : surfaces de pont dégagées¹⁰⁸, plates-formes hélicoptères et systèmes de lancement verticaux pour les uns, sas nageurs, sas vide-ordures et tubes de lancement d'armes pour les autres.

On le voit, diverses options de lancement existent, pour des lancements rapides, voire massifs, même pour des vecteurs hors gabarit. Le sujet de l'éventuelle récupération est moins simple, surtout en mer.

- LE DELICAT SUJET DE LA RECUPERATION

Pour les ex-RPAS, les « loyal wingmen » ou les armes, le sujet de la récupération ne se pose pas car il est réglé nativement ou n'est pas souhaitable. Il n'en va pas forcément de même pour les « remote carriers » ou certains vecteurs compacts dont le coût n'est pas anodin. La gestion, souvent parcimonieuse, des bouées acoustiques, dont le coût unitaire est bien inférieur aux vecteurs qui nous occupent, donne la mesure du sujet.

Le milieu aéromaritime est peu propice à une récupération sous parachute, souvent envisagée à terre. En conséquence, le « remote carrier » y sera vu sans équivoque comme un consommable, dont on cherchera à maîtriser le coût d'acquisition. Au sein d'un groupe aérien embarqué, on pourrait être tenté de lui préférer un « loyal wingman », dont il ne faut pas pour autant oublier qu'il est « attritable » et potentiellement fort consommateur de coups de catapulte. La perspective d'intégrer ces nouveaux porteurs abonde dans le sens de porte-avions de grande taille.

La récupération en vol de type Gremlins reste à consolider, côté Etats-Unis. Elle offre une option de récupération et de remise en ligne séduisante, susceptible de transformer un avion de transport tactique en « porte-aéronef volant », vieux rêve qui date de l'âge d'or du dirigeable mais ne s'est encore jamais concrétisé de manière satisfaisante. Le succès repose aussi sur l'intégration routinière aux opérations aéromaritimes d'aéronefs qui appartiennent à une autre composante qui, dans aucun pays, n'est réputée friande d'aventure salée.

Pour les vecteurs compacts, seuls les bâtiments de surface sont en mesure de les récupérer, aujourd'hui par « sky hook »¹⁰⁹ ou par filet, lorsqu'ils n'ont pas de mode stationnaire. Cela rajoute une contrainte d'emploi car les profils de vol doivent être anticipés en conséquence, réduisant parfois d'autant élongation et durée.

¹⁰⁷ Tel le SPEAR NINOX 103 UW par exemple.

¹⁰⁸ Destinées autant à la mise en place de ruches, qui peuvent être des conteneurs ISO, qu'aux décollages verticaux des drones les moins exigeants en la matière, comme les « tail-sitters ».

¹⁰⁹ La récupération par Sky Hook sous drone multicoptère a été testée aux Etats-Unis dans le cadre du développement des ALEs.

Les « tail sitters » présentent une architecture favorable à leur récupération sur quasiment tous types de navires. Ils disposent proportionnellement d'une autonomie plus importante que les autres architectures, ce qui rend la récupération par navire moins contraignante.



Recensement mondial de l'existant et des projets, description des briques technologiques, anticipation des évolutions attendues, typologie des vecteurs et des charges utiles, inventaire des plates-formes de mise en œuvre, revue des dispositifs de lancement et de récupération éligibles : tous ces éléments concourent à définir assez nettement le champ des possibles. Il convient maintenant d'envisager les cas d'usages des essais et, plus particulièrement, leurs contributions aux aptitudes offensives d'une force à la mer. Pour une part, les pages qui précèdent suffisent à décrire les bénéfices attendus des « remote carriers », « loyal wingmen », ex-RPAS ou NCAWs. Ils seront néanmoins explicités ou précisés, chaque fois que ce sera pertinent. L'emploi des vecteurs compacts retiendra davantage l'attention, car ils sont en mesure d'exploiter des vulnérabilités spécifiques. Alors que, jusqu'à un certain point, les autres drones en essaim s'inscrivent dans une certaine continuité, l'irruption des vecteurs compacts en environnement aéromaritime constitue une rupture dans les procédés tactiques du combat naval et un défi à relever du point de vue de la parade.

Les cas d'usage cités s'attacheront à tous les emplois possibles, tandis que les opportunités offensives seront examinées sous l'angle de l'établissement de situation¹¹⁰, de son interdiction à l'adversaire et du point de vue de l'engagement. Les aspects relatifs au « command & control » seront évoqués, autant que de besoin.

- EMPLOI POSSIBLE DES ESSAIMS DE DRONES EN CONTEXTE AEROMARITIME

Le tableau ci-dessous rassemble, de manière lapidaire, les cas d'usage identifiés. Bien sûr, il ne s'agit pas là d'une matrice rigide et intangible : des vecteurs de types différents peuvent opérer en essaims hétérogènes pour concourir à une même tâche ou à des finalités connexes.

	Charges utiles envisageables (dont certaines peuvent être panachées)	Cas d'usage (En gras , le ou les cas d'usage qui motivent l'acquisition de la capacité) (En <i>italique</i> , un ou des cas d'usage qui sont également envisagés)
Loyal wingmen & Remote carriers	<i>ISR & ISTAR</i>	<i>Contribution à l'établissement de la situation tactique</i>
	ECM	Déception/leurrage y compris SEAD
	HPM	Cas particulier d'engagement
	Environnement	En tâche secondaire
	Communications	Relais de fait et tâche secondaire
	Armement	Contribuer aux Combat Air Operations : Offensive Counter Air et Defensive Counter Air, et, en particulier, aux missions SEAD, Sweep, Escort, Air Interdiction, Deliberate Targeting et Dynamic targeting, Battle Damage Assessment
NCAWs	Carburant	Ravitaillement en vol
	ECM	Déception/leurrage (cas d'usage principal de l'ADM-160 MALD X)
	Explosif	Frappe
	<i>HPM</i>	<i>Cas particulier d'engagement</i> (missile à charge HiJENKS ¹¹¹)
Ex-RPAS	ISR & ISTAR	Etablissement de la situation tactique, désignation, Battle damage assessment

¹¹⁰ Dont le résultat est la SITAC, pour situation tactique.

¹¹¹ High-power Joint Electromagnetic Non-Kinetic Strike (HiJENKS), successeur de CHAMP (Counter-electronics High Power Microwave Advanced Missile Project) et fruit d'un effort conjoint entre l'Office of Naval Research (ONR) et l'Air Force Research Laboratory (AFRL). Tous deux décrits en annexe IV.

	ELINT COMINT	Peut constituer la tâche principale
	Environnement	En tâche secondaire
	Communications	Relais
	<i>Armement</i>	<i>Cas particulier d'engagement</i>
Vecteurs compacts	ISR & ISTAR	Etablissement de la situation tactique, Battle damage assessment
	ECM	Déception/leurrage
	Explosif	Frappe
	HPM	Option d'engagement particulièrement adaptée à ce vecteur
	Environnement	Peut constituer la tâche principale
	Communications	Relais, création de bulles de connectivité tactique ou lutte informationnelle
	Sans charge	Lutte anti-drones par impact (intercepteurs)

Les « remote carriers » et « loyal wingmen » sont avant tout destinés à délivrer de l'armement, le MQ-25 Stingray constituant un cas particulier de délivrance de carburant. En « air surface », ils permettent aux aéronefs habités d'être davantage « Stand-Off » et autorisent aussi des diversions ou des engagements à plus longue portée, plus susceptibles de bénéficier de l'effet de surprise, compte tenu de la furtivité des vecteurs. En « air-air », ils peuvent, par exemple, réduire la vulnérabilité des aéronefs les plus lourds sans solliciter autant les escortes d'aéronefs pilotés. Ils peuvent aussi étendre en basse couche les capacités d'un aéronef opérant à haute altitude, comme le P-8 Poseidon.

Les NCAWs ont le même rôle d'engagement que les armes dont ils sont dérivés, mais avec une aptitude accrue à se frotter à l'adversité et à coordonner des effets variés et parfois novateurs. Ainsi, il est envisageable que les planeurs porte-torpilles du P-8 Poseidon (HAAWC pour High Altitude Anti-Submarine Warfare Weapon Capability) soient rendus aptes à engager un sous-marin en essaim, pour parer à tout dérobement ou emploi de leurres et créer ainsi une « no escape zone ». Les NCAWs sont l'armement « air-surface » de prédilection des « remote carriers » et « loyal wingmen ».

Les ex-RPAS assurent les mêmes tâches mais en environnement davantage contesté et surtout intégrés aux dispositifs et non téléopérés depuis l'autre bout de la planète. S'agissant des MALE, ils deviennent, de ce fait, plus « tactiques ».

Les vecteurs compacts sont éligibles à un vaste panel de charges utiles, pour des tâches très variées en contexte aéromaritime. Sans être exhaustif, il est déjà possible de citer :

- L'ISR avec une variété de senseurs, dont certains spécifiques au combat naval ;
- La frappe antinavire de précision ;
- L'engagement contre embarcations rapides, en désaturation ;
- L'engagement ASM à létalité réduite ;
- La déception et le leurrage ;
- L'autodéfense élargie aux navires escortés ;
- Le recueil de paramètres d'environnement.

Ces cas d'usage et d'autres vont maintenant être abordés à travers le prisme des opportunités offensives, vues sous l'angle de trois piliers de l'action tactique : l'établissement de situation, son interdiction à l'adversaire et l'engagement.



LES OPPORTUNITES OFFENSIVES DES ESSAIMS DE DRONES POUR UNE FORCE A LA MER

- UNE SITAC « SUR-ADDITIVE »

Les élongations croissantes du combat naval étendent les ambitions en matière d'établissement de la situation tactique, tandis que le potentiel aérien pour y contribuer n'est pas toujours au rendez-vous, surtout si la posture de recherche d'information maximale doit être tenue dans la durée. De nouvelles menaces motivent aussi ce besoin accru de préavis : missiles hypervéloces et balistiques, tirés depuis la terre ou la mer, torpilles-drones à très longue portée, tous susceptibles d'échapper aux senseurs classiques de la force pendant la majeure partie de leur trajectoire. Par ailleurs, la portée, sans cesse accrue, des armes antiaériennes adverses conduit à adopter des distances minimales d'approche qui sont de moins en moins compatibles avec une identification, ou même une reconnaissance des détections obtenues. La réticence à risquer une incursion dans le volume d'engagement adverse est d'autant plus forte que les moyens à y consacrer, humains comme matériels, sont rares et difficilement remplaçables en cas de perte. Par ailleurs, la recherche d'information a son revers en indiscretion de la force, dont elle peut révéler les intentions. Parce qu'il fournit moins de coordonnées sur les détections, le recours accru aux senseurs passifs ralentit l'établissement de situation et peut nécessiter davantage de moyens, pour obtenir des éléments cinématiques complets ou classifiants. Plus facilement exposés à l'attrition, les drones aériens en essaim sont susceptibles de contribuer à relever ces défis et d'apporter à la force une forme « d'ubiquité sensorielle » robuste et ambitieuse, obtenue à moindre coût et exploitable dans la durée pour établir la situation surface ou contribuer à la détection aérienne et à la lutte sous la mer. On retrouve alors, en charge utile, l'électro-optique, de plus en plus miniaturisée, les intercepteurs de signaux électromagnétiques, voire de petits radars, des sonars passifs, voire actifs, ainsi que des détecteurs d'anomalie magnétique et, au besoin, des capteurs d'environnement. Des drones scriptés peuvent suffire à certains modes d'action, en particulier ceux qui mettent en œuvre des vecteurs consommables¹¹². La juxtaposition de vecteurs téléopérés reste potentiellement bien moins performante qu'une exploitation en autonomie collaborative. En effet, ce dernier type d'essaim permet une optimisation permanente du positionnement des capteurs, suivant plusieurs critères priorités. Ainsi, il est possible d'imposer un taux de rafraîchissement des données qui peut être uniforme ou différencié, suivant l'espace et le temps. Ce faisant, il est envisageable de prescrire un positionnement de senseurs passifs qui optimise en permanence la triangulation, dans une zone précise ou sur l'ensemble de la zone couverte. L'essaim peut assurer simultanément la perception de son environnement et la localisation des mobiles qui s'y trouvent, par exemple en optimisant la détection infrarouge, au regard de l'évolution de la transmission atmosphérique sur la zone couverte, ou en assurant la détection sous une couche nuageuse ; c'est un peu la logique « environnement dans le senseur » qui émerge aujourd'hui en acoustique sous-marine. A l'image de la localisation et cartographie simultanées¹¹³, dans le domaine urbain ou terrestre, l'essaim aéromaritime peut, de lui-même et en permanence, améliorer sa perception et corrélérer des mobiles détectés à différents moments tout en adaptant le taux de rafraîchissement à la cinématique de chacun. Très réactif, l'essaim peut passer de la détection de départs missiles au suivi des engins sur une partie de leurs trajectoires, par relais successifs et triangulation. Plusieurs exemples peuvent illustrer les possibilités d'emploi d'un essaim en soutien de l'élaboration de la SITAC :

- L'exploitation de détecteurs d'anomalie magnétique en lutte sous la mer pour couvrir rapidement une zone ou augmenter la classification d'un contact : c'est le drone ALTIUS-500, plié à la taille « A », mis en œuvre en altitude depuis un avion de patrouille maritime et récupéré sous « sky hook » ;
- En préparation d'un assaut amphibie, les gradients de plage peuvent être relevés rapidement par

¹¹² Par exemple le recueil de données d'environnement.

¹¹³ SLAM : Simultaneous Localization And Mapping.

un essaim de drones équipés de LIDARs bathymétriques¹¹⁴ ;

- L'exploitation simultanée par un unique superviseur de plusieurs drones RPAS fédérés, transposition de MUMT-X, déjà présenté, au cas de l'établissement de la situation surface ; indépendamment des sujets de propriété intellectuelle ou de partage industriel, toute marine équipée de RPAS dédiés à la surveillance maritime peut accéder à cette capacité, qui simplifie la mise en œuvre de drones en parc, tout en démultipliant leurs aptitudes ;
- Sans partir de l'existant, plusieurs approches en essaim visent le même effet à travers des vecteurs dédiés déjà évoqués, qu'il s'agisse, par exemple, d'ALEs ou de « tail sitters » ; les approches ne sont pas exclusives et un drone MALE téléopéré peut très bien superviser un essaim d'ALEs, à l'image d'un MQ-1C pour ses SparrowHawk ;
- Les intercepteurs de signaux électromagnétiques sont en mesure d'alimenter une guerre électronique cognitive à l'image du projet « Remedy » ;
- Les IRST, fédérés par un fonctionnement en essaim, offrent une capacité de détection aérienne aéroportée, afin de donner un préavis sur les activités aériennes adverses, dont les raids aériens et les tirs de missiles, qu'ils soient balistiques, de croisière ou hypervéloces : c'est un emploi possible du drone MQ-20 Avenger qui a été équipé de ce type de senseur¹¹⁵ pour plusieurs expérimentations et qui est une des bêtes de somme des expérimentations en autonomie collaborative, outre-Atlantique ;

Plus lents que les vecteurs aériens pilotés, souvent plus sensibles à la météo, tributaires du traitement embarqué de leurs senseurs pour préserver la bande passante accessible et la charge mentale des opérateurs, les essais ne constituent pas une panacée mais une extension, furtive et endurante, de l'existant, pour en multiplier la capacité, sans solliciter davantage d'effectifs, ni fuir l'attrition. Avions et hélicoptères de patrouille maritime n'en seraient pas moins nécessaires, mais s'en trouveraient revalorisés, plus productifs et moins exposés, relayés par des essais qu'ils sont les mieux placés pour lancer et superviser, en complément de navires plus aptes à les récupérer et à les remettre en ligne. Pour cette raison, il est permis de penser que les drones consommables sont plus adaptés à l'avion de patrouille maritime et les agents réutilisables à l'hélicoptère embarqué. Si les avantages de drones fonctionnant en essaim sont perceptibles pour concourir à l'établissement de la SITAC, ils le sont aussi pour dénier cette faculté à l'adversaire : c'est ce que l'on appelle « l'anti-scouting »¹¹⁶.

- UN CHOIX POUR « L'ANTI-SCOUTING »

C'est l'objet du projet américain NEMESIS, répertorié précédemment et illustré par le leurre persistant et réutilisable NOMAD déjà décrit. Le principe est de disposer à l'endroit souhaité de leures coordonnés dont la signature multispectrale¹¹⁷ est cohérente avec celle d'une force navale à la mer. L'objectif est de perturber l'établissement de situation adverse, d'induire en erreur les désignations d'objectif ou, tel un leurre actif décalé, de séduire les autodirecteurs de missiles assaillants. Dans le contexte de foudroyance du combat naval moderne, l'essaim persistant permet de réagir sur le bon tempo et d'étendre le bénéfice du dispositif à des navires dépourvus d'autoprotection, élargissant ainsi la capacité d'escorte. Placé en permanence au bon endroit, fonctionnel sans délai, il peut être examiné pour contrer les missiles hypervéloces, qui laissent peu de temps pour réagir mais dont il est permis de penser que l'autodirecteur radar ne devrait pas être d'une performance exceptionnelle dans l'environnement très défavorable dans lequel il est contraint de fonctionner. Aussi séduisante que soit cette approche, elle

¹¹⁴ Tel le Pushbroom Imaging LiDAR for Littoral Surveillance (PILLS) d'Areté, issu d'un SBIR de l'ONR et compatible du Camcopter S-100 de Schiebel.

¹¹⁵ Pod IRST Legion de Lockheed Martin.

¹¹⁶ Terme emprunté aux sept procédés de l'action navale de Wayne Hugues, par opposition au « scouting » qui recouvre ce que l'étude aborde sous le terme d'établissement de situation.

¹¹⁷ Y compris en acoustique sous-marine.

se confronte au choix du vecteur qui doit résister aux conditions de mer, en particulier au vent, tout en offrant une mise en œuvre facile, une récupération simple et une régénération de potentiel fluide. Dans le cas de NEMESIS, les drones doivent pouvoir être mis en œuvre aussi bien depuis un navire qu'un hélicoptère, en cohérence avec l'emploi envisagé. Si, en recourant à l'autonomie collaborative, la supervision d'un tel essaim ne devrait pas requérir une équipe étoffée, son cycle de mise en œuvre, par relèves successives, impose l'équivalent d'une petite chaîne fonctionnelle dédiée. Au-delà du bi-rotor NOMAD, lancé d'un CLT, l'éventail croisant d'architectures de drones embarqués pourrait offrir plusieurs options pour concrétiser cette capacité, par exemple autour des ALEs ou des « tail sitters ».

Au-delà des bénéfices évoqués en « scouting » et anti-scouting » le recours à l'essaim est le plus souvent envisagé pour offrir de nouvelles options d'engagement.

- DE NOUVELLES OPTIONS D'ENGAGEMENT

En dissociant davantage l'homme de la mise en œuvre de l'arme, l'essaim accroît la puissance de feu compatible avec la charge mentale d'un unique superviseur. En modifiant le rapport à l'espace et au temps, il offre de nouveaux modes d'action, parfois nivelants, notamment dans une perspective de déni d'accès. L'essaim offensif est destiné à surprendre et saturer, à accroître le tempo et la létalité. Il peut exploiter des vulnérabilités peu ciblées, à savoir, pour des vecteurs compacts :

- L'exposition en extérieur et sans protection de ressources critiques :
 - Pour les navires, de personnels aux compétences rares et précieuses¹¹⁸, conséquence d'équipages optimisés :
 - A la mer, postes aviation, ravitaillements à la mer, armements des petits calibres ou mises à l'eau d'embarcation fixent du personnel sur les extérieurs ;
 - A quai, mouvements et rassemblements sont fréquents et concernent de larges effectifs : cérémonies militaires, corvées, engager, dégager, séances de sport ;
 - Pour les navires, encore, d'équipements et systèmes antennaires fragiles et denses¹¹⁹, dont certains composants sensibles sont, au mieux, séparés de l'atmosphère par une épaisseur de fibre de verre de l'ordre du cm, et dont la perte est incapacitante¹²⁰ ; même de nuit, certaines antennes restent bien visibles pour des capteurs infrarouges, en particulier les antennes refroidies des radars AESA¹²¹ qui créent un fort contraste thermique ;
 - Pour navires et aéronefs, de l'électronique embarquée, livrée sans protection aux effets des armes à micro-ondes de forte puissance¹²² (armes « HPM »), et dont la perte est durablement incapacitante pour le porteur ; c'est aussi le cas pour les aéronefs, même au hangar, surtout porte ouverte ou ascenseur en position basse ;

¹¹⁸ Personnel de pont d'envol, par exemple.

¹¹⁹ Antennes radar, ESM, ECM, de communications, optroniques, conduites de tir, tourelles d'artillerie, affûts lance-missiles et lance-leurres etc.... Certaines antennes radar planes, de par leur technologie, peuvent être rendues inopérantes dès le premier coup au but.

¹²⁰ Ces équipements ont rarement leurs rechanges de grande prévoyance. Celles-ci, ou les compétences nécessaires à leur installation, peuvent être soumises à embargo lors d'un conflit. Et quand bien même ces problèmes ne se poseraient pas, le remplacement est une intervention coûteuse et longue qui immobilise durablement le navire.

¹²¹ Active Electronically Scanned Array.

¹²² Bien sûr, l'électronique exposée d'un navire de guerre est protégée, autant que faire se peut, de l'orage. En pratique, l'éclair est comme un fil qui frappe un endroit précis, occasionnant des dégâts ponctuels, limités, mais systématiques. La foudre globale, rare, pourrait entraîner des dégâts supérieurs, mais toujours circonscrits à son impact. L'arme HPM produit les mêmes effets mais dans une vaste « bulle », où toute électronique est impactée : les dégâts ne sont ni ponctuels, ni limités.

c'est encore le cas pour le chargement d'un radier et de ponts à véhicules ;ça peut enfin être le cas d'un sous-marin en surface dont l'un des panneaux est ouvert ;

- Pour les navires, d'aéronefs « spottés » à l'extérieur ou de leurs vecteurs déportés : vecteurs nautiques commandos, engins de débarquement et leur chargement, USV, tous vecteurs dont la perte en nombre compromet la mission.

- L'exposition, directement derrière le bordé des navires :

- De locaux de quart qui abritent les équipes de conduite (passerelle, central opérations) et de locaux vie, souvent densifiés sur deux ou trois tranches pour une frégate ; tous sont faciles à cibler ;
- D'installations critiques :local barre, locaux énergie propulsion, tableaux électriques principaux, parfois soutes à munitions, souvent hangar aviation et aéronefs, drome ou corps remorqués de sonar ;

La présence de coursives techniques à certains endroits constitue une protection, de même que le blindage du bordé au droit des locaux opérations¹²³.

A cet inventaire, quelque peu générique, il convient de rajouter des cibles spécifiques qui illustrent des vulnérabilités susceptibles d'être ciblées dans des contextes particuliers :

- Tracteurs de pont d'envol et optiques d'appontage ;
- Moyens enradiés ;
- Armement du massif d'un sous-marin en surface, raid nautique commando ;
- Engins de débarquement amphibies en va-et-vient et leur chargement (y compris les blindés) ;
- USV de guerre des mines.

Autant, les armes en service ciblent une plate-forme dans son ensemble¹²⁴, autant les armes en essaim composées de vecteurs compacts sont en mesure de traiter avec précision chacune des cibles qui viennent d'être évoquées. Ce mode d'action tire parti de l'incapacité des navires et aéronefs à détecter des drones de petite taille à grande distance, ce qui ne leur laisse pour réagir qu'un préavis faible, même en utilisant des radars dédiés : typiquement deux minutes pour un bâtiment de surface et quelques dizaines de secondes pour un aéronef lent. Pour être plus précis, l'engagement par vecteurs compacts peut se faire selon les modalités suivantes :

- En adoptant une variété de profils, y compris plongeants, ces derniers étant particulièrement propices à l'exploitation optimale d'un petit radar embarqué en guise d'autodirecteur ;
- En variant les effecteurs des charges utiles :
 - Charges explosives, éventuellement formées pour mieux traverser bordé ou blindage ;
 - Charges incendiaires ;
 - Charges chimiques, qui ne peuvent être totalement écartées, notamment pour une frappe à quai ou sur une base aéronavale ;

¹²³ Blindage qui facilite cependant leur ciblage quand il est visible, comme sur FDA.

¹²⁴ Constat, certes, un peu simplificateur, car les autodirecteurs infrarouges ciblent les sources chaudes ou en contraste, les missiles antiradiations les radars et certains missiles antinavires comme le LRASM seraient en mesure de cibler des endroits précis. Il n'en demeure pas moins que l'objectif ainsi poursuivi est la mise hors de combat du navire dans son ensemble et non son incapacité par destruction de systèmes d'armes ou de « systèmes d'hommes » précis. Par comparaison, les essaims de vecteurs compacts sont aux armes actuellement en service, ce que les boulets ramés étaient aux boulets, les uns incapacitants, les autres destructeurs et meurtriers : une autre forme d'artillerie.

- Grenade HPM, détruisant l'électronique dans un rayon de 3 à 400 m et dont l'effet est initié par explosif (Les compléments sont donnés en annexe IV) ;
 - Balise radiofréquence ou infrarouge qui marque un navire, après insertion d'un micro-drone dans un endroit discret pour permettre ensuite le « homing » de l'armement assaillant.
- En panachant les senseurs de guidage au profit de l'essaim dans son ensemble :
- Electro-optique dans le visible : le cas le plus courant ;
 - Electro-optique non refroidie (LWIR, 8-13 μ , détection de points chauds, type autodirecteur) ;
 - Illuminateur laser ;
 - « Homing » radar en bande S et X, en simultané ;
 - « Homing » sur balise, tel qu'évoqué précédemment.
- En s'appuyant sur d'autres drones, agissant comme des « snoppers », qui peuvent être identiques aux agents de l'essaim ou plus évolués, disposant éventuellement, à terme¹²⁵, de capacités d'identification de nuit par vision artificielle.

De telles armes en essaim trouvent les points d'application suivants :

- Ceux qui résultent des vulnérabilités précédemment évoquées et correspondent à une forme de frappe antinavire pour mettre hors de combat durablement un bâtiment de combat ou un navire de commerce en ciblant des endroits précis avec pour objectifs :
- D'entraver sa capacité à naviguer :
 - Par destruction par arme HPM de l'électronique de navigation et de conduite du navire ;
 - Par destruction ciblée de l'appareil à gouverner¹²⁶ ou des installations énergie-propulsion ;
 - De le rendre inapte à sa mission :
 - Par destruction, à l'HPM ou à l'explosif, d'équipements qui lui confèrent son intérêt militaire¹²⁷ ;
 - Par attrition de compétences clés, ciblées à dessein, lorsque leur activité les expose¹²⁸ ;
 - De le détruire :
 - Lorsqu'il s'agit d'engins de débarquement ;

¹²⁵ Au-delà des horizons de l'étude.

¹²⁶ Le scénario d'un navire de charge, rempli d'explosif, et destiné à l'attaque terroriste d'une ville côtière, alimente régulièrement les réflexions. En leur temps, les accidents d'Halifax, de Brest, de Texas City, et plus récemment de Beyrouth, rappellent l'impact potentiel d'un tel mode d'action. Hors situation d'hostilités déclarées dans les approches maritimes, l'examen des parades possibles montre la difficulté à arrêter à temps un tel navire, compte tenu du préavis anticipable, des moyens disponibles, de leurs niveaux d'alerte et des modes d'actions envisageables. Drones HPM et explosifs ouvrent des options, par exemple, pour ces derniers, en détruisant le local barre, situé tout à la poupe, directement derrière le bordé, sur ce type de navire.

¹²⁷ C'est le « mission kill ».

¹²⁸ Les essais de munitions rodeuses sont davantage en mesure d'attendre le moment favorable.

- Lorsqu'il s'agit d'USV¹²⁹ ;
 - Lorsqu'il s'agit d'embarcations rapides saturantes¹³⁰ ;
 - De le contraindre par déni d'accès :
 - Par exemple pour protéger des outre-mer sans y déployer davantage de personnels¹³¹.
- Ceux qui relèvent d'autres cas d'usage :
- L'entrée en premier à travers une opération amphibie¹³² ;
 - L'appui feu naval en général ;
 - L'engagement SEAD¹³³ ;
 - Le brouillage d'escorte¹³⁴ ;
 - L'engagement par nageurs de combat¹³⁵ ;
 - L'élargissement de l'autodéfense aux navires escortés dépourvus de moyens¹³⁶ ;

¹²⁹ Par exemple ceux qui sont utilisés pour la guerre des mines ou ceux, armés de missiles ou de torpilles, que l'on voit fleurir en Méditerranée orientale.

¹³⁰ On pense aux tactiques des gardiens de la révolution iraniens et au passage de détroits sous ce type de menace.

¹³¹ En France, il se dit parfois que le groupe aéronaval est « l'assurance vie des outre-mers ». Il n'en demeure pas moins que ceux-ci sont parfois fort peu dotés en moyens de défense. Les essaims « dormants » qui pourraient y être déployés à terre, en « bulle de déni d'accès », relèveraient franchement le seuil nécessaire pour y créer un fait accompli. C'est aussi une option pour concrétiser rapidement le soutien à un allié menacé dans sa frange maritime. A la mer, ces mêmes essaims sont capables de doter d'une capacité offensive des navires qui en sont dépourvus ou de renforcer ceux dont les aptitudes sont limitées, par exemple les patrouilleurs.

¹³² Les essaims couvrent alors le besoin en CAS : c'est une nouvelle forme d'appui-feu naval de précision avec une possibilité de « handover » aux troupes débarquées. Un savoir-faire, à la fois plus accessible et plus adapté au besoin, qui renforce une capacité d'entrée en premier.

¹³³ En combinant, au sein d'un même essaim, charges explosives, leurres, brouilleurs et HPM pour réaliser, à une échelle plus réduite, ce que peut faire un essaim de NCAWs, conçu à cet effet.

¹³⁴ Une puissance isotrope rayonnée équivalente (ou PIRE) de 10 W, générée par un émetteur intégré à une charge utile compacte de 2Kg, est en mesure de brouiller 4 radars en bande S à X (y compris des radars de lutte anti-drones aériens (LADA)) pour masquer dans sa direction un Rafale jusqu'à 5 km et bien sûr, a fortiori, d'autres drones compacts. C'est une capacité qui peut concourir à la suppression des défenses aériennes ennemies, précédemment évoquée. La mise en œuvre de tels vecteurs depuis un sous-marin peut lui donner une capacité SEAD, mise en œuvre hors du volume de détection adverse et sans recourir à ses armes lourdes.

¹³⁵ Les sonars de détection d'intrusion sous-marine (Diver Detection Sonars (DDS)) prolifèrent et deviennent de plus en plus efficaces, étendant leur couverture par multistatisme et fournissant des signalements automatiques, assortis d'une forte probabilité de détection et d'un faible taux de fausse alarme. Des mammifères marins sont aussi utilisés en défense des ports, avec une efficacité qui vaut bien celle des chiens à terre (par les Russes en particulier). Pour ces raisons, parvenir au contact d'une coque à quai ou au mouillage pour y fixer une charge est un mode d'action de plus en plus souvent compromis. Les essaims de drones à changement de milieu, mis en œuvre à partir d'une ruche sous-marine, offrent une alternative qui permet aux nageurs une action « stand-off » ou différée, y compris sur des navires en mouvement. Elle permet aussi de traiter des cibles dans la profondeur, sans avoir besoin de s'enfoncer dans les terres. Elle offre une plus grande variété d'effets, à travers l'emploi de l'arme HPM ou des brouilleurs, par exemple.

¹³⁶ L'essaim se distribuant en autant de « combat air patrols » pour prémunir les navires de certaines menaces, comme, par exemple les embarcations rapides, ou bien pour agir en leurre actif décalé, au profit de navires dépourvu d'autoprotection à base de guerre électronique (voir paragraphe précédent : « un choix pour l'anti-scouting »).

- L'extension de connectivité¹³⁷ ;
- L'autodéfense anti-aérienne d'un sous-marin face à des avions lents opérant en basse altitude¹³⁸ ;
- L'engagement ASM à létalité réduite¹³⁹ ;
- La participation au battle damage assessment, en économie d'autres moyens.

Une fois décrits, les modes d'action envisagés doivent être analysés sous l'angle de leur viabilité dans le contexte exigeant du combat aéromaritime.

- VIABILITE DES MODES D'ACTION ENVISAGES

Le cas d'usage reste du domaine de la bonne idée ou reprend les concepts mis en avant par les promoteurs de tel ou tel emploi des essaims ; le mode d'action se frotte davantage au réel et à tous les aspects d'un emploi militaire. Au niveau tactique, il peut être vu comme une option permettant d'obtenir un effet : il peut donc être préféré à un autre choix, écarté au bénéfice d'une alternative ou compléter d'autres moyens activés en cohérence avec l'effet recherché. Il doit aussi être vu à travers la séquence d'actes combinant l'emploi des moyens dans le temps et dans l'espace pour obtenir le résultat attendu dans le délai imparti.

Pour être réaliste et cohérente, l'exploitation envisagée de l'essaim doit prendre en compte la doctrine d'emploi des forces et s'appuyer sur les capacités exactes mises en œuvre. De manière plus lapidaire, elle doit conjuguer efficacité et efficience.

Bref, dans le cas des essaims de drones aériens :

- Une question est de savoir s'il est possible de parler de capacité : c'est le crible de l'approche DORESE (Acronyme de Doctrine, Organisation, RH, Formation, Entraînement, Soutien et Equipement) avatar de l'approche US DOTMLPF (Doctrine, Organization, Training, Materiel, Leadership and education, Personnel, and Facilities, auxquels on rajoute parfois Policy) qui nous semble devoir être retenu pour une étude prospective de ce type.
- L'autre est de savoir si leur emploi est robuste¹⁴⁰, en l'évaluant, sous forme de points de vigilance, au crible des critères suivants

¹³⁷ Par exemple pour de la liaison de données tactiques, soutenir un raid de forces spéciales ou entretenir une bulle de connectivité en direction de la population en vue d'opérations de soutien à l'information militaire, anciennement « psyops ».

¹³⁸ Bien que plus lents que les avions ciblés, les drones en essaim peuvent ratisser une zone assez large et s'interposer entre le sous-marin et la menace. Ils ont l'avantage de s'attaquer à des acteurs en partie prévisibles lors de certaines phases : passes MAD ou stations sonar. En recourant à une charge HPM, déclenchée par explosif, ils produisent un effet à distance, ce qui augmente leur efficacité (pour mémoire, en autodéfense d'un sous-marin, l'arme HPM n'a de sécurité de bouche que pour les aériens sortis). Un essaim de quelques vecteurs de taille « A », lancés comme des leurres puis changeant de milieu, peut se limiter à quelques agents. A la différence d'un missile qui a besoin d'une désignation d'objectif un tant soit peu précise (comme celle que peut fournir un sonar dédié, tel l'Automated Threat Overflight Monitoring System (ATOMS) américain), l'essaim, plus endurant, peut être lancé sur une perception plus floue de la menace, accessible à travers les traitements sonars en service. L'essaim peut localiser sa cible en passif en utilisant l'ESM et les capteurs électro-optiques pour l'intercepter.

¹³⁹ Certes, un peu différée par rapport aux armes de jet classiques, mais ce délai de ralliement est-il si important quand la prise de décision d'un engagement d'avertissement prend toujours un certain temps ? Un essaim serait en mesure de reproduire le pattern hélicoïdal de l'ancien lance-roquettes de 375 mm, garantissant un avertissement sans ambiguïté.

¹⁴⁰ Par robuste, on entend ici stable dans sa performance, quel que soit le contexte. C'est-à-dire, en particulier, fiable, éventuellement réparable, si ce critère est attendu.

- L'aptitude à fonctionner dans un environnement dégradé ;
- La rusticité¹⁴¹, dont la facilité de mise en œuvre et de régénération de potentiel;
- L'endurance, au sens de solidité dans la durée ;
- L'intégration sécurisée dans les flux de données ;
- Le cadre légal anticipable ;
- L'interopérabilité.

De ces critères, seuls les points saillants, aux horizons de l'étude, sont restitués ci-dessous en reprenant la typologie retenue pour aborder les essaims de drones aériens en contexte aéromaritime (Ex-RPAS, « remote carriers » et « loyal wingmen », NCAWs, vecteurs compacts).

○ ROBUSTESSE : LES POINTS DE VIGILANCE

Rien ne change pour les ex-RPAS et les NCAWs, qui se placent dans la continuité de l'existant et dont la sophistication accrue ne devrait compromettre en rien la robustesse actuelle. Notons tout de même que cette robustesse est moins vérifiable pour les NCAWs compte tenu de la difficulté à procéder à des tirs de qualification d'essaims de missiles de croisière et à valider leur efficacité et le savoir-faire tactique associé, lors d'entraînements grandeur nature. Toutes proportions gardées, on se retrouve dans le même cas que pour les missiles balistiques de dissuasion nucléaire, validés par segments et par simulation. Le basculement vers des armes collaboratives leur étend cette approche.

Pour les vecteurs compacts, l'aptitude à affronter un environnement météo-océanographique dégradé est un point de vigilance, en particulier le vent fort et les turbulences aéronautiques d'un lancement aéroporté. Leur moins grande aptitude à opérer seuls de nuit, lorsque le recours à l'électro-optique est requis, est à prendre en compte, lorsque leur caractère tous temps est considéré. La rusticité et l'endurance des vecteurs compacts qui seraient utilisés de manière récurrente (cas de « l'anti-scouting » de type NEMESIS) est également un sujet qui mérite d'être anticipé pour optimiser leur cycle de vie. La plus ou moins grande facilité de mise en œuvre est également à considérer pour ces mêmes vecteurs qui, au pire, peuvent générer le besoin d'une sorte de chaîne fonctionnelle aviation dédiés ou au contraire s'accommoder sans contraintes de l'existant (à l'image du V-BAT). Une fois posées ces limites, la robustesse de ce type de vecteur dans leur domaine d'emploi se vérifie.

Pour les « remote carriers », la régénération de potentiel à la mer est un point à prendre en compte, qu'il s'agisse du rythme de renouvellement par ravitaillement des vecteurs consommables, ou de l'optimisation du cycle de vie de ceux qui seraient récupérables (Gremlins)¹⁴².

Pour tous les types d'essai, il convient d'être vigilant sur le besoin de bande passante en fonction des différentes phases de l'accomplissement d'une tâche et de la répartition de la charge de travail entre l'homme et le « edge ». La sécurisation des flux est un autre point d'attention.

Pour tous les types d'essaims, le cadre légal anticipable (surtout en Europe) et l'interopérabilité sont sources d'incertitudes.

La robustesse d'un essaim n'est pas compromise par nature, mais soumise à une réalisation qui ne souffre pas la médiocrité, tant les imbrications technologiques y sont nombreuses.

¹⁴¹ Métaphore agricole, entendue ici par opposition à ce qui est excessivement compliqué ou trop sophistiqué, au point d'être peu pratique d'emploi. L'existence de modes dégradés efficaces fait partie de la rusticité.

¹⁴² Dont il conviendrait de définir l'optimum d'utilisation pour déterminer leur cycle de vie, probablement différencié selon leurs composants.

○ L'APPROCHE CAPACITAIRE « DORESE »

Aux horizons de l'étude, il apparaît que :

- Logiquement, la doctrine d'emploi est encore à construire, surtout pour les aspects offensifs. C'est vrai pour les « remote carriers » et « loyal wingmen », et davantage pour ce qui relève de l'engagement « air-air » que « air-surface » ; c'est moins vrai pour les NCAWs ou les ex-RPAS qui prolongent l'existant ; c'est plus ambigu pour les vecteurs compacts, car fonction de l'usage escompté : autant l'emploi en appui-feu ou ISR se concrétise, autant l'engagement antinavire en premier, à longue portée, s'accommode mal de l'absence de foudroyance¹⁴³ ;
- De la même manière l'impact sur les modalités de commandement et l'organisation des C2 et du soutien est à consolider ;
- L'impact RH est moins qualitatif ou quantitatif que moral, avec le risque de perte d'initiative au contact lors d'engagement robotisés : c'est un point de vigilance qui a des implications en matière de doctrine et d'entraînement. En revanche, la robotisation induit nécessairement une nouvelle répartition de la ventilation des tâches, donc des effectifs ;
- La formation passe davantage par des compléments que par une refonte. C'est moins vrai pour l'emploi des « remote carriers » et « loyal wingmen » qui impacte en profondeur les procédés d'emploi de l'arme aérienne embarquée ;
- L'entraînement est un défi, qu'il s'agisse de consommations non soutenables ou de mise en œuvre simultanée d'un grand nombre de vecteurs. Le recours à la simulation apparaît incontournable ; celle-ci peut mixer réel et virtuel pour devenir « live, virtual and constructive », suivant le terme anglo-saxon consacré ; aux Etats-Unis, c'est de cette manière que sont conduites beaucoup d'expérimentations, dès que des vecteurs de taille significative sont mis en œuvre. Le risque d'un décalage excessif entre combat et préparation opérationnelle est à prendre en compte au stade de la conception ;
- Le soutien croît en volume car les nouvelles capacités s'inscrivent en complément de l'existant sans réelle éviction¹⁴⁴ ;
- En matière d'équipements accessibles, si les drones en essaims deviennent de plus en plus nombreux, parfois proliférants, la situation est contrastée parmi les pays fournisseurs traditionnels d'armements : tous ne disposent pas, sur les différents segments, d'une offre déjà mature, sur laquelle bâtir des capacités.

¹⁴³ On retrouve le débat entre partisans de la furtivité des missiles antinavires et promoteurs de leur hypervélocité. La première pourrait déjouer les défenses adverses, la seconde leur laisse peu de temps pour réagir mais, surtout, favorise l'engagement en premier. Les vecteurs compacts en essaim relèvent de la première approche et, en conséquence, n'ont pas les vertus de la seconde. On retrouve cependant une forme de foudroyance à travers la munition rodeuse, parce qu'elle comprime le délai entre la localisation de l'adversaire et son engagement effectif. Equipée d'une charge HPM, une telle arme compacte peut neutraliser immédiatement et en une fois un navire ennemi, mais au risque de mettre en alerte la force adverse sans pouvoir en traiter d'emblée une part significative, si les munitions assaillantes ne sont pas assez nombreuses sur l'objectif. En revanche, ce type d'arme offensive permet une seconde frappe pour achever à bon compte les effets de la première ou se substituer à une poursuite. Elle offre aussi l'opportunité de franchir un rideau d'escorte pour cibler des unités précieuses fortement défendues.

¹⁴⁴ Les munitions rodeuses en essaim ne remplaceront pas l'artillerie dont elles n'ont ni la foudroyance, ni le caractère tous temps. Les essais ISR ne peuvent rivaliser en vitesse ou en traitement des données avec les aéronefs dotés d'équipages. Les NCAWs sont destinés à remplacer une part des munitions classiques, mais de manière incrémentale, sans éviction brutale. Le brouillage ou l'exploitation de l'arme HPM par essaims de drones constituent de nouvelles capacités potentielles qui n'en remplacent aucune autre.

A noter que, dans certains cas, le recours aux essais peut générer des économies de potentiel aérien en se substituant, pour certaines tâches, à des plates-formes plus coûteuses d'emploi : le MQ-25 Stingray en constitue un bel exemple.



Ce passage en revue des modes d'actions offensifs des essais de drones aériens donne une première idée de la menace à laquelle les forces aéromaritimes sont susceptibles d'être confrontées aux horizons de l'étude. Menace qu'il convient néanmoins de préciser davantage pour en évoquer la parade.



LA MENACE DES ESSAIS DES DRONES

- REALITE DE LA MENACE, MENACE DE REFERENCE

Les drones déclinant en essais la bombe, l'aéronef ou le missile relèvent des armes et domaines de lutte classiques. Leurs possibilités d'auto-reconfiguration, et de soutien mutuel entre agents autorisent des modes d'action réactifs qui accroissent la létalité de l'ensemble et font peser sur la défense une incertitude supplémentaire. A contrario, la « poussière aérienne » offre des capacités négligeables au regard de l'effort consenti pour la mettre en œuvre en essai. En conséquence, la menace justiciable d'un traitement spécifique est celle que son format rend difficile à détecter mais qui est susceptible de former des essais d'une taille significative et de produire des effets non négligeables. Les engins lancés au tube sont emblématiques de cette catégorie : on y retrouve, côté américain, les ALE¹⁴⁵, ALTIUS, LOCUST et Perdix et ailleurs les Hunter 2S, CH-901, ALPAGU et ALFA-S. Cette menace est aujourd'hui la seule à être proliférante ; dans certains contextes, elle peut être nivelante. Le drone Perdix et la munition rodeuse ALTIUS-600M en sont représentatifs et le resteront aux deux horizons de l'étude. En accord avec l'état-major de la marine, ils ont donc été retenus pour caractériser la menace de référence qui est décrite ci-dessous¹⁴⁶ :

	Menace « type ALTIUS-600M »	Menace « type PERDIX »
Poids	12,2 Kg	290 g
Charge explosive (cf tableau p. suivante)	3 Kg (~Mistral, Milan, Switchblade-600)	65 g (~grenade à main, mine anti-personnel)
Longueur	1,01 m	16,5 cm
Capteurs	Electro-optiques à capteur silicium ¹⁴⁷	Electro-optiques à capteur silicium (type smartphone)
Envergure	2,54 m	30 cm
Section du fuselage	φ 17,78 cm	54x57 mm
Propulsion	Electrique	Electrique
Vitesse de croisière	60 nds	40 nds
Vitesse max	90 nds	40 nds
Temps de vol	2h30	1h15
Rayon d'action	160 Nq	40 Nq

¹⁴⁵ Celui d'entrée de gamme.

¹⁴⁶ Certaines caractéristiques ont été approximées ou estimées, de manière réaliste et représentatives des technologies de référence sur la période de l'étude.

¹⁴⁷ En matière de capteurs embarqués, dans cette gamme de vecteur, il est envisageable de trouver, de l'électro-optique dans le visible, selon les cas avec différents champs visuels, éventuellement complétée par un désignateur, voire un télémètre laser. La présence d'imagerie IR non refroidis est encore peu probable, compte tenu de leur prix unitaire (à titre d'exemple, le détecteur de point chaud du Switchblade-600 peut être estimé entre 25 et 40 k€ et ne permet pas de faire de l'identification). A terme, quelques vecteurs pourraient être équipés d'imagerie infrarouge au profit de l'essai. Reste qu'un algorithme de vision artificielle en infrarouge ne peut converger que sur la base d'un jeu de données étoffé et pertinent, plus délicat à réaliser que son pendant dans le visible.

Au titre de la charge utile, seuls une charge explosive et des capteurs électro-optiques dans le visible ont été retenus pour caractériser la menace de référence, mais l'essaim favorise le panachage de charges utiles variées qui rendent les vecteurs complémentaires les uns des autres, pour une plus grande efficacité de l'ensemble. Il est d'ores et déjà envisageable de doter un drone de la taille de l'ALTIUS-600M d'une capacité d'interception et de « homing » radar en bande S et X ou d'une arme HPM offensive à usage unique. A terme, la transposition de radars apparus sur les quadcopters est également réaliste¹⁴⁸. L'autoprotection des vecteurs n'a pas été retenue mais il faut noter que des essais téléopérés peuvent être dirigés sur les dépôts de coups des armes qui les prennent à partie et qu'il est envisageable d'intégrer à la cellule d'un agent autonome un compteur de coup miniature (« Miss Distance Indicator » : MDI), pour déclencher les évasives les plus appropriées. Pour autant, la sophistication à l'extrême de ce type de vecteur n'est accessible qu'aux pays les plus avancés qui, par ailleurs, disposent, en nombre, d'armes de plus grande allonge aux effets beaucoup plus conséquents ; l'analyse de la valeur pourrait les conduire à privilégier ces moyens plutôt que de surinvestir dans des effecteurs à l'emploi occasionnel et aux capacités plus limitées. A contrario, la volonté de renforcer facilement la puissance de feu de forces réduites et dispersées¹⁴⁹ ou la recherche de moyens pouvant rapidement être transférés à des tiers belligérants militent pour une montée en puissance de ces capacités, éminemment flexibles et redoutables.

Pour chaque vecteur, les zones d'effet de souffle des charges explosives, hors éclats, se répartissent comme suit¹⁵⁰ (en mètres) :

ALTIUS		PERDIX
3Kg		65g
5.18	Zone de danger mortel à +50%	1,50
7.40	Zone de danger mortel à 20%	2,14
22.20	Zone de dangers graves (blessures irréversibles)	6,41
32.55	Zone de dangers légers (blessures réversibles)	9,40
65.11	Zone de blessures par effets indirects : chute d'objet ou bris de vitre	18,80

Il n'est pas exagéré de considérer, qu'ainsi définis, l'ALTIUS-600M constitue la menace et le Perdix l'urticant, uniquement apte à cibler le personnel, dans des conditions météorologiques peu exigeantes. L'ALTIUS-600M est polyvalent, apte à agresser, au moins de jour, les systèmes antennaires d'un navire, ses œuvres mortes ou des blindés à découvert dans un engin amphibie. Ce type d'effecteur constitue une nouvelle forme d'artillerie qui a troqué la foudroyance pour l'allonge, la précision, la versatilité, la manœuvre et la masse. Dans certaines circonstances, cette capacité peut permettre à un adversaire dépourvu de marine d'agir en frange côtière et de faire peser une menace conséquente sur des forces aéromaritimes. En ce sens les essais de drone peuvent être vus comme une technologie nivelante, apte à remettre en cause une capacité d'entrée en premier¹⁵¹.

¹⁴⁸ TrueView® R20 Radar de Fortem Technologies ou EchoGuard d'Echodyne, deux produits US.

¹⁴⁹ Etats archipélagiques, possessions ultra-marines, accords de défense.

¹⁵⁰ Ces valeurs correspondent à l'application des arrêtés de sécurité pyrotechnique. Ces zones correspondent à des probabilités, déduites d'essais en nombre, conduits à des fins statistiques. Ils sont exploités depuis la période d'après-guerre et confortés par l'expérience.

¹⁵¹ A titre d'exemple, le Switchblade-600 peut être déployé en conteneur modulaire sur un navire (la société danoise SH-Defence le propose) ou à terre. Un article soulignait l'intérêt qu'aurait eu ce type d'arme en défense de la Géorgie du Sud lors de la guerre des Malouines : la petite force d'invasion, très malmenée par une vingtaine de défenseurs qui multiplièrent les coups au but sur l'avisio argentin et abattirent un hélicoptère, aurait très probablement échoué ou requis de nombreux renforts (« Use Loitering Munitions Against Ships », Cpt Walker D. Mills, U.S. Marine Corps, Lt Joseph Hanacek et Lt Commander Dylan Phillips-Levine, U.S. Navy, décembre 2021, Proceedings Vol. 147/12/1426).

- SCENARIO D'ATTAQUE RETENU

En support de la réflexion, pour permettre une comparaison de l'efficacité des armes et des tactiques, un unique scénario, valable jusqu'en 2030, a été défini pour décliner la menace de référence. Il s'agit de la défense d'un bâtiment de surface face à un essaim de 30 drones aériens du même type, prononçant leur attaque en 3 vagues de 10, ayant des « time on target » espacés de 5 secondes, arrivant uniformément répartis dans un secteur de 160° avec des profils de vol variés dans le plan vertical et adoptant leur vitesse maximum à 500 mètres de leur cible.

En première approche l'environnement atmosphérique est considéré comme non perturbé : la propagation des ondes y est nominale.

Avant de s'intéresser aux tactiques et effecteurs susceptibles de contrer cette menace et, en particulier aux armes à énergies dirigées, il convient d'analyser les vulnérabilités des essaims et d'examiner la meilleure manière de les exploiter.



VULNERABILITES EXPLOITABLES DES DIFFERENTS SYSTEMES D'ESSAIMS DE DRONES

La vulnérabilité des systèmes d'essaims de drone est analysée à partir des briques technologiques identifiées précédemment, selon trois sous-ensembles : les vecteurs, leur charge utile et les moyens de coordination de l'essaim. Leurs composants se déclinent en cellule propulsée et en électronique embarquée, une part de cette dernière exploitant le spectre électromagnétique.

- VULNERABILITES EXPLOITABLES PAR TYPE D'ESSAIM

Le tableau suivant liste les vulnérabilités potentiellement exploitables¹⁵², au moins en partie, parfois dans certaines conditions, des différents types d'essaims, au vu des briques technologiques qui les composent et qui ont été décrites précédemment :

		Type d'essaim		
		Scripté	Téléopéré	« Intelligent »
Coordination	Briques			
	<i>Lien de navigation</i>	Brouillage, leurrage, surtensions		
	<i>Lien vers le C2</i>			
	<i>Lien interne</i>			
<i>IA de l'essaim</i>			Surtensions	
Charge utile	<i>Effecteurs</i>			

¹⁵² La vulnérabilité cyber n'a pas été considérée comme exploitable dans le contexte de la défense d'une force navale à la mer, compte tenu des préavis de détection anticipables. La recherche d'un effet thermique, directement sur les composants électroniques, ne semble pas réaliste aux horizons de l'étude ; cette vulnérabilité est abordée en annexe V. On la retrouverait à côté de la mention « surtensions » dans les tableaux.

	<i>Capteurs</i>	Leurrage, masquage, éblouissement ¹⁵³ , surtensions, impact et
	<i>Edge computing</i>	
	<i>IA de l'agent</i>	
	Autopilote	Surtensions
	Navigation	
Vecteur	Structure	Échauffement localisé, impact cinétique
	<u>Propulsion</u>	Epuisement
	<u>Moteurs de rotor</u>	Perturbations électriques
	<u>Actionneurs de gouvernes</u>	

Figurent en **gras** les briques qui sont systématiquement présentes ;

Figurent soulignées les briques dont l'une ou l'autre est forcément présente ;

Figurent en *italique* les briques qui ne sont pas nécessairement présentes, compte tenu de la variété des technologies employées (types d'essais, types de drones).



Cellule propulsée (Il n'y a pas de particularité propre à l'essaim, si ce n'est un besoin accru de refroidissement lorsque la densité d'électronique embarquée augmente)



Electronique embarquée (Les vecteurs d'un essaim « intelligent » se caractérisent par une forte densité électronique et logicielle)

- IMPACT DE CES VULNERABILITES PAR TYPE D'ESSAIM

Les vulnérabilités exploitables sont plus ou moins conséquentes suivant le type d'essaim. Elles peuvent être :

Critiques : Une telle vulnérabilité met fin à la tâche : la menace est traitée, en une ou plusieurs fois.

Type	Vulnérabilités critiques spécifiques	Vulnérabilités critiques communes
Scripté	Brouillage du lien de navigation ¹⁵⁴	Surtensions, impacts cinétiques, perturbations électriques
Téléopéré	Brouillage du lien vers le C2	
« Intelligent »		

Significatives : Une telle vulnérabilité dégrade la performance : elle diminue nettement l'efficacité de l'essaim.

Type	Vulnérabilités significatives spécifiques	Vulnérabilités significatives communes
Scripté		Leurrage, masquage, échauffement localisé ¹⁵⁵
Téléopéré	Brouillage du lien de navigation	
« Intelligent »		

¹⁵³ CMO : contre-mesures optroniques.

¹⁵⁴ Lorsque l'unique source de positionnement est extérieure (GNSS).

¹⁵⁵ Au vu des technologies actuelles, l'échauffement localisé sur un nombre limité de vecteurs, peut, dans certaines conditions et au prix d'une durée d'exposition significative, conduire à la destruction d'un nombre limité de drones mais ne saurait mettre hors de combat un essaim de taille significative.

Modérée : Une telle vulnérabilité perturbe l'essaim, diffère ou amoindri son résultat.

Type	Vulnérabilités modérées spécifiques	Vulnérabilités modérées communes
Scripté		Epuisement Eblouissement
Téléopéré		
« Intelligent »	Brouillage des liens ¹⁵⁶	

- EVALUATION DES HYPOTHESES SOUS-JACENTES

Ces vulnérabilités et leur plus ou moins grande criticité reposent sur l'analyse de la technologie des essais et donc sur un certain nombre d'hypothèses qu'il convient de passer en revue, car leur pertinence peut évoluer aux horizons de l'étude.

Vulnérabilité	Hypothèse associée	Evolution anticipée aux horizons de l'étude
Impact cinétique	Les cellules et leur contenant sont détruits par impact cinétique	Aucune
Echauffement localisé	Les matériaux des cellules se percent rapidement sous un échauffement intense et localisé	La généralisation de matériaux résistants compromet l'exploitation efficace de cette vulnérabilité, au moins jusqu'à l'avènement des lasers à 2μ de puissance suffisante, au-delà de 2030
	Les montures et capteurs optiques dans le visible y sont très sensibles et peuvent être rapidement traitées	Aucune : les capteurs dans le visible devraient demeurer prépondérants sur la menace considérée et recourir aux mêmes technologies, ne serait-ce que pour des raisons de coût
Epuisement	A la mer, la faible vitesse du drone et sa sensibilité au vent peuvent être exploitées, au moins pour différer l'arrivée de la menace et en accroître le temps de traitement	Cela restera valable pour la plupart des drones artisanaux et grand public. Ce sera de moins en moins vrai pour les drones industriels, en général plus véloces et moins sensibles au vent
Perturbations électriques	Les moteurs de rotors ou les actionneurs de gouvernes sont sensibles aux courants générés dans leurs bobines ¹⁵⁷	Cela restera exploitable. (Le recours, très peu probable, à des actionneurs hydrauliques ou pneumatiques pourrait éventuellement en limiter l'impact sur les drones à voilure fixe)
Surtensions	L'électronique est vulnérable aux surtensions provoquées par les champs électriques intenses.	Aucune : un blindage efficace n'est ni crédible, ni accessible
Brouillage	Il est possible de brouiller efficacement les liens de navigation, vers le C2 ou internes à l'essaim	Aucune, mais le recours au mesh, à l'agilité en fréquence, au satellite et à la frugalité des échanges, ainsi que

¹⁵⁶ En l'absence de lien intra-essaim, les drones retombent sur un comportement non-coordonné. Si l'essaim à une architecture maître-esclaves, les esclaves sont démunis. En tout état de cause, l'essaim tombe en mode dégradé comme une simple superposition des comportements individuels avec les informations disponibles avant le brouillage. Par exemple, si des cibles ont été assignées avant le brouillage, chaque drone va garder la sienne.

¹⁵⁷ A noter que ces moteurs font partie des très rares composants vulnérables à une attaque électromagnétique en « front door » (cf annexe IV sur les armes HPM). Ils sont dépourvus de protection et le resteront longtemps, faute de solution pour les protéger de manière satisfaisante.

		la robustesse des modes dégradés, limitent déjà l'exploitation de cette vulnérabilité ; une tendance qui devrait s'accroître
Leurrages	Les capteurs électro-optiques dans le visible et la vision artificielle embarquée sont perturbés par le camouflage	Les progrès de la vision artificielle pourraient amoindrir cette vulnérabilité mais on constate aujourd'hui un délai supplémentaire significatif pour acquérir une cible correctement camouflée
	La réception GNSS peut être leurrée	Le leurrage GNSS reste ambitieux
Masquage	Les capteurs électro-optiques dans le visible et en infrarouge long (7-14 μ) ¹⁵⁸ sont démunis face au masquage de la cible. Il en va de même pour la vision artificielle embarquée	Aucune
Eblouissement	Les capteurs électro-optiques dans le visible peuvent être aveuglés	A utiliser avec précaution car la vision artificielle embarquée pourrait l'exploiter comme un phare.

Les vulnérabilités au masquage, à l'échauffement des dispositifs électro-optiques dans le visible, aux surtensions et perturbations électriques ou aux impacts cinétiques apparaissent les plus pérennes. La vulnérabilité des matériaux des cellules à l'échauffement localisé est la plus incertaine.

- EFFICACITE DES MOYENS CIBLANT LES VULNERABILITES

Une fois passées en revue les vulnérabilités et leur impact par type d'essaim, après avoir listées et appréciées les hypothèses qui sous-tendent cette analyse et la manière dont elles pourraient être remises en cause, il convient d'examiner les moyens susceptibles de concrétiser des tactiques et modes d'action et de s'interroger sur leur compatibilité avec les exigences du combat aéromaritime. Le sujet traité ici est celui de leur efficacité propre, indépendamment de toute autre considération. Cependant, lorsqu'un motif réhibitoire conduit à écarter un moyen, il est mentionné.

Effet recherché	Moyen	Appréciation globale ¹⁵⁹
Impact cinétique pour détruire le vecteur	CIWS	Les CIWS à forte cadence tirant des munitions Airburst semblent bien adaptés au traitement de cette menace avec de bons seuils de saturation. A un coût unitaire élevé, les missiles SATCP peuvent contribuer à l'attrition.
	ALI ¹⁶⁰	La contribution des armes légères d'infanterie à l'attrition peut être significative quoique tardive, puisqu'à très courte portée. Le traitement des profils plongeants est plus délicat.

¹⁵⁸ Typiquement ceux qui pourraient à terme équiper certains vecteurs de l'essaim (capteurs non refroidis, exploitables à courte portée (quelques petits km).

¹⁵⁹ Lorsque c'est nécessaire, des développements figurent dans la suite de l'étude ou en annexes.

¹⁶⁰ Armes légères d'infanterie qui comprennent les mitrailleuses multitubes électriques Dillon mais excluent ici les armes Browning de 12,7 mm qui ne peuvent avoir qu'une efficacité des plus réduite contre les drones aériens.

	Drone intercepteur	Nouveaux venus dans le monde de la lutte anti-drones, les drones intercepteurs seront la plupart du temps incapables de traiter plus d'une cible à la fois. Ils offrent l'avantage d'une certaine portée mais avec une cinématique comparable à celle de la menace et un volume d'emploi confiné en basse couche
	« Blindage actif »	Il pourrait être intéressant d'évaluer l'apport d'un blindage actif inspiré de ceux qui équipent les véhicules terrestres. En environnement aéromaritime, son adoption suppose une parfaite maîtrise du feu et du taux de fausse alarme, toutes conditions qui semblent toutefois pouvoir être réunies lorsque l'attaque est en cours
Perçage de structure entraînant le feu ou la destruction des composants critiques afin d'abattre en séquence les vecteurs	HEL ¹⁶¹	Très dépendantes du matériau de la cible, les armes lasers ne contribuent à la désaturation qu'en montant en puissance, au prix d'un volume embarqué conséquent, en sollicitant une énorme puissance électrique et en dégradant fortement la signature infrarouge du porteur (vu l'importance de la chaleur à évacuer). Les structures en carbone-époxy ou aluminium ne pourront être percées aux horizons de l'étude. Par ailleurs, les HEL ne sont pleinement efficaces que montés sur une tourelle performante et adossées à des senseurs d'acquisition et de poursuites multiples et du meilleur niveau. Compte tenu des importantes distances de sécurité oculaire à respecter, leur emploi coordonné au sein d'un dispositif, même étendu, soulève des problèmes de coordination des feux des plus ardues.
Echauffement localisé des capteurs optiques entraînant leur destruction afin d'empêcher l'acquisition de la cible	HEL	Les HEL, même ceux de faible puissance, peuvent traiter très rapidement et en séquence un grand nombre d'optique de capteurs dans le visible ; en revanche, rien ne permet d'en apprécier le résultat. La prévention des interférences mutuelles et la protection du personnel de la force défendue opérant à l'extérieur est des plus délicates compte tenu de la réflexion spéculaire sur les fenêtres d'optique planes. Beaucoup moins contraignante la longueur d'onde à 2 μ , aujourd'hui émergente, est à privilégier.
Eblouissement des capteurs électro-optiques pour empêcher l'acquisition de la cible (Contre-Mesures Optroniques)	LEL ¹⁶²	L'éblouissement dure tant que le flux lumineux est pointé et la désaturation est tributaire du nombre d'effecteurs mobilisables. L'effet de phare est à redouter
	Projecteur	

¹⁶¹ Les armes lasers (HEL : High Energy Laser) sont examinées en détail par la suite et font l'objet de l'annexe III.

¹⁶² « Low Energy Laser » car l'énergie requise est bien moindre que pour un effet destructif. Une petite dizaine de mW sur le capteur suffisent, ce qui suppose quelques kW à l'émission, pour une utilisation tout temps à quelques kilomètres sur une cible dont l'angle d'incidence est défavorable.

Perturbations électriques des moteurs entraînant les rotors ou actionnant les gouvernes pour provoquer la chute des drones et leur impact avec le sol	HPM ¹⁶³ « soft kill » embarqué sur bâtiment de surface	Ce type d'HPM peut traiter l'essaim à bonne portée et en une fois, ou très rapidement, par gros paquets. L'effet doit être maintenu jusqu'à l'impact du drone avec la surface, ce qui n'empêche pas l'arme de traiter simultanément des profils plongeants et rasants
	HPM « soft kill » embarqué sur drone	Les technologies compactes permettent d'intégrer ce type d'effecteur à un drone, pour un fonctionnement répétitif. De par sa portée très faible et sa cinématique lente, un tel drone ne peut traiter qu'un nombre extrêmement limité de cibles et uniquement en basse altitude
Surtensions électriques appliquées aux composants électroniques pour les mettre hors service afin d'abattre les drones en séquence	HPM « hard kill » embarqué sur bâtiment de surface	Aucun système de ce type ne peut être embarqué sur bâtiment de surface compte tenu des contraintes électromagnétiques induites. A ce titre, son efficacité, bien réelle au titre de l'effet terminal, ne peut être prise en compte
	HPM « hard kill » à usage unique embarqué sur drone ou obus	Les technologies compactes permettent d'intégrer ce type d'effecteur à un drone ou un obus, apte à détruire l'électronique d'un ou plusieurs drones assaillants en une fois. Cependant, au niveau de puissance où un tel effecteur surclasse l'obus explosif, sa sécurité de bouche serait du même ordre de grandeur que la distance de détection des drones assaillants, ce qui ne permet pas de le considérer, en dépit de son efficacité intrinsèque.
	HPM « hard kill » à usage multiple embarqué sur drone	Là aussi, les technologies compactes permettent d'intégrer ce type d'effecteur à un drone. Cependant, un rayon d'efficacité de l'ordre de 50 mètres et une cinématique comparable à celle des vecteurs assaillants conduiraient à consommer autant de drones intercepteurs qu'il y a d'agresseurs, pour ne traiter que ceux évoluant à basse altitude
Brouillage des liaisons afin d'empêcher l'éventuel pilotage à distance de l'essaim ou réduire sa cohérence pour en amoindrir l'efficacité	ECM dédié	Ces technologies sont matures et répandues ; leur intégration sous contrainte de compatibilité électromagnétique est maîtrisable. Elles peuvent s'attaquer à la réception GNSS ou aux liens de l'essaim. Elles n'auront que peu d'impact sur un essaim « intelligent » ou scripté mais restent redoutables pour un essaim téléopéré par faisceau hertzien qui ne disposerait pas de modes dégradés robustes
Leurrage du GNSS afin de détourner l'essaim de sa cible	Equipement dédié	Le spoofing pourrait attirer l'essaim loin de la cible mais, aux distances de détection anticipables, il est probable que l'essaim ait

¹⁶³ Les armes micro-ondes de forte puissance (HPM : High Power Microwaves) sont examinées en détail par la suite et font l'objet de l'annexe IV. Dans l'étude, elles sont séparées en deux groupes : les HPM « hard kill », seuls « véritables » HPM, qui visent la destruction ou la mise hors service de l'électronique embarquée et HPM « soft kill », qui sont en fait des brouilleurs, et visent la perturbation de l'électronique pour provoquer la chute du drone.

		déjà acquis ses cibles via ses capteurs électro-optiques
Leurrage des capteurs pour empêcher ou retarder l'acquisition de la cible	Camouflage permanent	Les navires et aéronefs pourraient bénéficier des progrès accomplis dans ce domaine en milieu aéroterrestre. Il s'agit d'une action préventive dont l'efficacité est flagrante
	Camouflage évolutif	Un camouflage évolutif, destiné à accroître la protection des points névralgiques protégerait spécifiquement les systèmes antennaires.
Masquage des cibles aux capteurs dans le visible ou en infrarouge long pour empêcher l'acquisition de la cible et entraver le ralliement de l'essaim sur celle-ci	Ecran de fumée, généré depuis le bord ¹⁶⁴	Il est d'autant plus efficace qu'il est associé à une manœuvre cinématique. Son emploi résulte d'un choix réfléchi car d'autres effecteurs et senseurs en sont affectés, sans parler des activités concomitantes ou de la sécurité navique ou aérienne
	Roquettes fumigènes ¹⁶⁵	
Diminution voire épuisement de l'énergie dédiée à la propulsion des vecteurs assaillants par adoption d'une cinématique adaptée pour entraver le ralliement de la cible et accroître le seuil de saturation	Manœuvre dans le vent à pleine vitesse	Lorsque c'est réalisable, il y a toujours un bénéfice à adopter ce genre de cinématique, surtout si le secteur arrière est bien pourvu en senseurs et effecteurs

En complément, et au crible des cinq critères suivants, il est possible de porter une appréciation plus détaillée sur la plus ou moins bonne aptitude des effecteurs qui peuvent être considérés pour contrer un essaim :

- La capacité à assurer seul la mise hors de combat de l'essaim ou à y contribuer ;
- Le traitement des cibles en séquence ou en une fois ;
- Le traitement de la menace à toutes les altitudes ou seulement en basse couche ;
- La réactivité pour passer au paré à manœuvrer ;
- La plus ou moins forte dépendance aux technologies de l'essaim ou des vecteurs.

L'appréciation des effecteurs au crible de ces critères est rassemblée dans le tableau suivant, selon une échelle à trois niveaux :

¹⁶⁴ Tel le produit de la société Safran, testé dans le cadre du projet Autoprotection de l'ADEME, il y a une dizaine d'années. L'équipement génère un écran masquant une frégate en quelques secondes. Il y a très probablement un délai de préchauffage qui réserve son emploi aux stades d'alerte les plus élevés. Fumée et porteurs sont colocalisés, ce qui accroît fortement l'impact sur les autres fonctions et activités. Ce dispositif est issu du domaine aéroterrestre où il est toujours mis en œuvre. Certains fumigènes possèdent également une capacité d'absorption des ondes radar. En 2014, l'US-Navy a conduit l'exercice « Pandarra Fog » dédié à expérimenter ce type de masquage fumigène dans une version enrichie en particules de fibre de carbone. De récents articles prônent le retour à cette tactique face à la prolifération des munitions antinavires dotées de dispositifs électro-optiques et des traitements embarqués associés (Fog of war : The Navy should reconsider smokescreen tactics, Lt Cdr Dylan et Trevor Phillips-Levine, Proceedings, janvier 2022).

¹⁶⁵ Ce type de dispositif est encore largement employé sur le théâtre Pacifique par les grandes marines qui y opèrent (US Navy, PLAN, marines coréenne et japonaise), en particulier lors d'opérations amphibies, mais pas seulement. Déployable en quelques secondes, ce type d'écran est efficace dans le visible mais aussi dans la bande haute de l'infrarouge qui pourrait être exploitée par les drones au moyen d'optroniques non refroidies. Décalé du porteur, l'écran de fumée est moins interférent avec les autres activités.

	Armes « dures »					Armes « molles »					
	CIWS	ALI	Inter-cepteur	Blindage Actif	HEL	HEL ¹⁶⁶ optiques	HPM soft kill	ECM	ECM GNSS	Fumée	Manoeuvr
Prédominance											
Traite l'essaim	Yellow	Yellow	Red	Yellow	Red	Yellow	Green	Yellow	Grey	Yellow	Yellow
Y contribue	Green	Green	Yellow	Green	Yellow	Green	Grey	Yellow	Yellow	Green	Yellow
Traitement en séquence ou en une fois											
Séquentiel	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Grey	Grey	Grey	Grey
Simultané	Red	Red	Red	Yellow	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Yellow
Traitement à toutes les altitudes											
HA/seul ^{mt} BA	Yellow	Red	Red	Grey	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow
Réactivité											
Délai réaction	Red	Red	Green	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Dépendance aux technos de l'essaim											
Liées à techno	Green	Green	Green	Green	Red	Yellow	Green	Red	Red	Yellow	Green

Au résultat, et du seul point de vue de l'efficacité, cette analyse montre que la lutte contre les essaims de drones repose et reposera davantage sur une combinaison de tactiques et d'effecteurs que sur des équipements capables à eux seuls de traiter la menace. Le HPM « soft kill », qui ne présente pas de difficulté d'intégration ni de mise en œuvre depuis un bâtiment de surface, fait figure d'exception, mais à un coût très élevé. L'écran de fumée, beaucoup plus accessible, mais dont l'emploi n'est pas sans conséquences, impacte de manière décisive un essaim dont l'acquisition d'objectif repose sur des senseurs optiques, cas de loin le plus fréquent. Dans tous les cas, les profils d'attaque en altitude sont plus défavorables à la défense. Le délai de réaction des armes « dures », catégorie dans laquelle il faut inclure les HEL, est globalement supérieur au préavis de détection, ce qui ne les rend efficaces qu'aux stades d'alertes les plus élevés. Les HEL de faible puissance et destinés à la destruction des optiques, pourraient, à terme, faire exception à ce délai de réaction, sous réserve de cadrer leur emploi de manière appropriée et de résoudre le sujet de la prévention des interférences ; dans une certaine mesure, il n'est pas aberrant de considérer qu'ils se situent entre armes « dures » et armes « molles ».

- EFFICIENCE DES MOYENS CIBLANT LES VULNERABILITES

Approchées précédemment au regard de leur efficacité intrinsèque, les tactiques et effecteurs peuvent maintenant être passés au filtre des critères d'efficacité, suivants qui sont susceptibles d'orienter les choix. Onze ont été retenus ici, et analysés de manière qualitative, selon une échelle à trois niveaux, représentées par des couleurs :

Cinq relèvent des ressources consommées :

- L'impact RH en termes d'effectifs et de savoir-faire ;
- La facilité d'intégration au navire (CEM, SST, volume, énergie, nombre d'équipements requis) ;
- Le prix ;
- La nouveauté ou le caractère éprouvé ;
- La robustesse technique (fiabilité, réparabilité, régénération du potentiel) ;

Six relèvent de l'aptitude à prendre en compte une variété de situations :

- L'aptitude à rendre les services attendus à quai comme en mer ;

¹⁶⁶ Arme laser exploitée pour détruire les capteurs optiques des drones assaillants, là où des seuils de densité de puissance bas permettent d'obtenir rapidement la destruction d'une matrice en silicium, lorsque la pupille du laser est dans le champ de l'optique (« vue » par la caméra), ce qui est le cas pour une menace en radiale. L'arme peut être adossée à un détecteur d'optique pointée, capteur laser actif d'emploi courant dans le domaine aéroterrestre (équipements produits par Safran, Airbus, CILAS ou encore GTD pour le système Centinela, plus compact). Un tel équipement contribue à la classification et à l'évaluation de la menace pour optimiser une séquence d'engagement.

- La souplesse d'emploi en fonction d'un contexte de paix, de confrontation ou d'hostilités ;
- L'aptitude à être mis en œuvre au sein d'une force sous l'angle de la prévention des interférences mutuelles (qui est aussi un objectif d'interopérabilité) ;
- L'utilité du moyen pour d'autres finalités ;
- La sensibilité à l'environnement météo-océanographique et la possibilité d'anticiper les performances attendues ;
- Les possibilités d'entraînement et les consommations induites.

Au titre des ressources consommées :

	Armes « dures »						Armes « molles »				
	CIWS	ALI	Inter-cepteur	Blindage Actif	HEL ¹⁶⁷	HEL optiques	HPM soft kill	ECM	ECM GNSS	Fumée	Manoeuvre
RH											
Effectifs	Green	Green	Yellow	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green
Savoir-faire	Green	Green	Yellow	Red	Red	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Green
Intégration											
CEM	Green	Green	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Grey	Grey
SST	Green	Green	Yellow	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Grey
Volume	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Yellow	Green	Green	Green	Grey
Energie	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Yellow	Green	Green	Green	Grey
Nombre	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Green	Red	Green	Green	Green	Grey
Prix											
1/10/100 mio €	Yellow	Green	Yellow	Red	Red	Green	Yellow	Green	Green	Green	Grey
Nouveauté											
Eprouvé	Green	Green	Yellow	Red	Red	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green
Robustesse											
Fiabilité	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
Réparabilité	Green	Green	Grey	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
Régénération	Yellow	Yellow	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green

Au titre de l'adaptation aux diverses situations d'une unité :

	Armes « dures »						Armes « molles »				
	CIWS	ALI	Inter-cepteur	Blindage Actif	HEL	HEL optiques	HPM soft kill	ECM	ECM GNSS	Fumée	Manoeuvre
Position											
Quai	Yellow	Green	Green	Red	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Yellow	Grey
Mer	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
Adaptation aux différents contextes											
Paix	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Green
Confrontation	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Hostilités	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Mise en œuvre au sein d'une force											
PMI	Green	Green	Yellow	Yellow	Red	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Green
Polyvalence											
Autre usages	Green	Green	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red	Red	Yellow	Grey
Impact de l'environnement											
Sensibilité	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green
Prévision perfo	Yellow	Green	Green	Yellow	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green
Entraînement											
Possibilités	Yellow	Green	Green	Yellow	Red	Red	Green	Green	Red	Green	Green
Consommation	Green	Green	Green	Yellow	Green	Yellow	Green	Green	Grey	Green	Green

¹⁶⁷ Au titre de l'intégration, le HEL est simple à intégrer sous un format de type HELMA-P, beaucoup moins en termes de volume, poids, énergie et servitudes pour un laser de 100 kW. Dans les tableaux, c'est ce dernier qui a été retenu.

A noter que la simulation ne relève pas des tactiques ou effecteurs mais offre un moyen efficace pour dépasser les limites de l'entraînement réel et amener à maturité les tactiques les plus pertinentes. C'est aussi une manière d'approcher les enjeux capacitaires.

- SYNTHÈSE DE LA PERTINENCE DES MOYENS CONSIDÉRÉS AUX HORIZONS DE L'ÉTUDE

L'analyse précédente met tous les critères au même niveau ; il n'en demeure pas moins que quelques éléments peuvent en être dégagés en cumulant efficacité et efficience :

Dès aujourd'hui et à l'horizon 2025 :

- L'existant éprouvé et la manœuvre de bon sens ont toute leur place dans la lutte contre les essaims de drones ;
- Des tactiques anciennes pourraient être remises au goût du jour en tirant parti des avancées du moment : camouflage et masquage ;
- Le RAPIDFire qui entre en service pourrait renforcer considérablement l'aptitude des navires dotés à combattre les essaims de drones, surtout lorsque plusieurs armes sont installées ; ce point est à confirmer à travers son évaluation opérationnelle ;
- Le brouilleur dédié, très répandu et très orienté vers les essaims téléopérés, est d'un investissement raisonnable qui garantit un engagement « stand off » de cette menace ;
- Le drone intercepteur à impact direct n'intervient efficacement qu'en basse couche et ne traite le plus souvent qu'une cible par lancement ; il n'est qu'un complément.

Toutes ces approches ont le mérite d'être parfaitement compatibles avec les contraintes RH et MCO ou, pour certaines, la recherche d'une plus grande polyvalence des équipements.

Pour l'avenir à l'horizon 2030 :

- HEL à forte puissance et HPM « hard kill » sont hors-jeu ;
 - o Pour le premier parce que les bénéfices en sont faibles et incertains pour un prix élevé, des contraintes d'intégration majeures et une très délicate prévention des interférences mutuelles ;
 - o Pour le second parce que son intégration est illusoire au regard des enjeux de compatibilité électromagnétique ;
- Le HEL de faible puissance, visant les optiques, produit un effet pertinent mais non perceptible, presque intermédiaire entre le « hard kill » et le soft kill » ; à la longueur d'onde de 1 μ , il pose des problèmes de prévention des interférences mutuelles du fait de la réflexion spéculaire potentielle sur les fenêtres d'optiques planes ;
- Le HPM « soft kill » apparaît comme l'arme la plus efficace, apte dans toutes les situations à engager l'essaim en une fois ; son efficacité ne devrait pas être remise en cause aux horizons de l'étude ; son prix reste prohibitif ;
- A titre exploratoire, un système dont le concept serait dérivé des blindages actifs terrestres pourrait être envisagé ; il pourrait avoir d'autres bénéfices.



TACTIQUES ET EFFECTEURS : FOCUS SUR LES ARMES A ENERGIE DIRIGEE

Si ces armes ont été rapidement évaluées précédemment, il n'en demeure pas moins que de nombreuses initiatives s'intéressent à leur emploi contre les essaims de drones. Elles méritent donc qu'on s'y attarde, ne serait-ce que pour conforter les appréciations précédemment portées qui, pour être synthétiques, n'en sont pas moins lapidaires.

Plusieurs évolutions technologiques sont attendues. Pour 2025 et 2030, les armes emblématiques des performances et des options qui peuvent être considérées à ces échéances sont décrites ci-dessous.

- LES ARMES LASER A HAUTE ENERGIE (HEL)

A l'horizon 2025, deux armes, qui sont déjà aujourd'hui représentatives des HEL en expérimentation, peuvent être identifiées et caractérisées de la manière suivante :

- Un laser de longueur d'onde 1 μm , de divergence¹⁶⁸ 33 μrad et de puissance 2 kW ;
- Un laser de longueur d'onde 1 μm , de divergence 157 μrad et de puissance 100 kW.

Le premier est dans la gamme de l'HELMA-P, destiné à abattre les micro-drones en ABS à moins de 1 000 m, éblouir ou altérer les optiques. Le second affiche des ambitions plus importantes, le seuil de 100 kW étant souvent considéré comme représentatif des armes laser destinées à abattre la gamme des drones tactiques, voire des obus et roquettes, au prix d'un saut supplémentaire en puissance¹⁶⁹. Cette puissance accrue permet aussi de réduire la durée d'engagement et donc de traiter un plus grand nombre de cibles. Ces armes, désormais davantage limitées par la physique que par la technique, ne peuvent progresser qu'à la marge, par exemple en matière de rendement énergétique, mais aucune rupture n'est attendue à l'horizon de l'étude. Elles sont toujours officiellement susceptibles d'être en service à l'horizon 2030 mais peinent à s'imposer, en dépit des investissements consentis¹⁷⁰.

En revanche, à l'horizon 2030, il apparaît pertinent de retenir un laser à 2 μm de longueur d'onde, même si ce type d'arme ne devrait exister qu'à l'état de démonstrateur à cette échéance. En dépit d'une divergence double et de puissances encore faibles, l'adoption de cette technologie offre de nombreux avantages :

- A 2 μm , l'absorbance de certains matériaux est bien supérieure (pour du polymère on pourrait, par exemple viser une absorbance de 70-80%, au lieu de 20% avec une longueur d'onde d'1 μm), au point de réduire considérablement le temps de perçage tout en offrant une meilleure résistance aux anomalies de propagation et au bruit de poursuite, aspect qui prend toute son importance par mer un tant soit peu formée ;

¹⁶⁸ Le « rayon » laser forme un cône, un bicône lorsqu'il est focalisé. La surface de la tache laser évolue en proportion du carré de la distance.

¹⁶⁹ Aujourd'hui, c'est même la gamme des 300 kW qui est visée pour atteindre cet objectif de contre-batterie ou traiter ceux des drones et des missiles dont les matériaux résistent le mieux aux agressions laser.

¹⁷⁰ Ainsi, le laser de 50 kW de Raytheon, destiné aux blindés « Strykers » de l'US-Army (programme DE-SHORAD pour Directed Energy SHORt-Range Air Defense, lancé en 2019), voit son déploiement repoussé d'au moins 2 ans et reste en phase de développement, au moins jusqu'à fin 2025, avec la perspective d'une remise en compétition dès 2023. La mise en concurrence précédente avait vu le forfait technique de Northrop Grumman ouvrant, presque par défaut, la voie à Raytheon. Entre temps, Lockheed-Martin est revenu sur le devant de la scène en proposant le DEIMOS (Directed Energy Interceptor for Maneuver Short-Range Air Defense), ce qui n'est peut-être pas étranger au choix de temporiser. Il semblerait aussi que l'augmentation de la signature infrarouge du blindé, obligé d'évacuer l'importante énergie thermique produite par le laser, ait fait réfléchir, sans parler de la délicate prévention des interférences mutuelles (cf annexe III).

- A 2 μm , les distances nominales de risque oculaire (DNRO) sont beaucoup plus réduites et les lunettes de protection moins handicapantes (elles n'altèrent pas ou très peu la perception visuelle), voire pas toujours nécessaires.

A l'horizon 2030, ce laser prometteur est caractérisé de la manière suivante :

- Un laser de longueur d'onde 2 μm , de divergence 100 μrad et de puissance 1 kW.

Cette caractérisation des HEL emblématiques des horizons de l'étude permet de déterminer, pour chacun d'eux, à une distance donnée, la puissance appliquée à la surface couverte par la tache laser. Intégrée sur le temps d'illumination, elle fournit la fluence qui, pour un matériau donné, en conditionne le seuil de perçage. Ce dernier est fourni par l'expérimentation et fait l'objet d'abaques et de valeurs de référence. Dans le cadre de l'étude, pour les menaces considérées, compte tenu de leur taille, le perçage du matériau sera considéré comme destructif de la cible. Néanmoins, il pourrait être pertinent de relancer les études sur l'altération des surfaces qui reprennent les efforts de portance : à des températures de transition vitreuse assez vite atteintes¹⁷¹, les matrices des matériaux composites deviennent molles provoquant le pliage de ces surfaces portantes¹⁷².

De telles armes, représentatives de l'état de l'art aux horizons de l'étude, ne permettent pas de percer les matériaux de la menace de référence mais pourraient détruire les optiques de l'essaim opérant dans le visible, sur un tempo compatible avec les exigences de la défense d'une force, mais sous réserve que les réflexions spéculaires potentielles sur ces mêmes optiques, lorsqu'elles sont planes, restent acceptables, du point de vue de la prévention des risques oculaires. Seul le laser à 2 μ est éligible à cet usage aux horizons de l'étude.
Les appréciations portées ne préjugent pas de la pertinence de ces effecteurs en contexte aéroterrestre ou spatial.

Quelques points clés sur les armes laser sont mentionnés en annexe III et les armes de référence précédemment évoquées y sont décrites avec davantage de précision, fournissant les arguments aux appréciations portées.

- LES ARMES MICRO-ONDES A FORTE PUISSANCE (HPM)

Les armes micro-ondes à forte puissance (ou High Power Microwaves : HPM) font elles aussi l'objet d'un regain d'intérêt, y compris dans le cadre de la lutte contre les drones aériens, surtout dans la perspective de contrer les essaims. Ainsi, l'AFRL vient d'inaugurer en décembre 2022, sur 1 000 m² et pour 6 millions de dollars, un nouveau laboratoire dédié : le « High-Power Electromagnetic Effects and Modeling Facility ». En parallèle, les investissements s'accroissent outre Atlantique pour dépasser la centaine de millions de dollars de crédits attribués sur l'année écoulée (cf annexe IV sur les points clés des armes HPM).

Vis-à-vis de drones aériens, et par simplification, les armes HPM seront considérées suivant deux types :

- Celles qui, par une brève et puissante impulsion électromagnétique, provoquent instantanément l'avarie durable ou la destruction définitive de l'électronique embarquée, obtenant ainsi un résultat de type « hard kill » ;
- Celles qui, par brouillage électromagnétique, interfèrent avec les moteurs d'actionneurs, produisant un effet « soft kill », incapacitant le temps d'application du rayonnement.

Ce sont des objets très différents et, stricto sensu, seule l'arme « hard kill » est véritablement « HPM » ;

¹⁷¹ 150 à 200° C pour l'époxy.

¹⁷² Ces surfaces sont fortement sollicitées, par le vol bien sûr, mais aussi par les phases de récupération, au point que certains constructeurs préconisent de changer les voilures après une vingtaine d'atterrissages (RQ-20 Puma).

l'arme « soft kill » ne l'est que par abus de langage et souci de simplification, pour coller aux éléments de langage marketing des fabricants.

○ POUR DES EFFETS « HARD KILL »

Au vu de l'état de la technologie et des améliorations anticipables, les armes HPM aptes à obtenir un effet destructif sur l'électronique embarquée, ou à la mettre durablement hors service, auront les caractéristiques suivantes aux horizons 2025 et 2030 :

- En 2025, une puissance d'émission de 1 GW pendant 400 ns pour une énergie libérée de 0,5 kJ permettant de délivrer 10 000 V/m à 2 km à travers une antenne pointée mécaniquement et dotée d'un gain de 40 dB, pour un faisceau d'ouverture 0,5° en site et gisement ;
- A l'horizon 2030 (en considérant, ce qui est réaliste, que les objectifs techniques aujourd'hui poursuivis, notamment par la DARPA, soient atteints, au moins au stade du démonstrateur), une arme d'une puissance d'émission de 1 GW pendant 1 µs pour une énergie délivrée de 1 kJ permettant d'étendre l'efficacité de l'arme à 3 km à travers une antenne pointée mécaniquement et dotée d'un gain de 40 dB pour un faisceau d'ouverture 0,5° en site et gisement ;

Pour autant, l'embarquement de l'une ou l'autre de ces deux armes sur un bâtiment de surface n'est pas réaliste, compte tenu des contraintes de compatibilité électromagnétique¹⁷³ induites. D'ailleurs, il n'existe aucun démonstrateur naval de ce type. Ces armes ne sont donc mentionnées qu'au titre de l'état de l'art.

- Aux horizons de l'étude, l'arme HPM peut également se décliner en obus, grenade ou charge utile de drone, pour un usage unique, avec une puissance de 1 GW et peu ou pas de gain, pour délivrer jusqu'à 300 000 V/m, à une distance de 300 à 400 mètres. Une telle charge utile explose pour produire son effet. La sécurité de bouche à prendre en compte pour préserver le tireur de ses effets HPM est du même ordre de grandeur que le préavis de détection espéré sur la menace ; en conséquence une telle arme n'est d'aucune utilité défensive.
- Sans recourir à une charge explosive, il est également possible d'embarquer sur un drone une arme HPM ayant une puissance de 1 GW et un peu de gain (10 dB), afin d'être efficace dans un rayon d'une cinquantaine de mètres et réutilisable plusieurs fois à hauteur de ce que permet la batterie embarquée¹⁷⁴. Ne pouvant traiter qu'une seule cible par effecteur et uniquement en basse couche, une telle arme est de peu d'utilité.

De telles armes, représentatives de l'état de l'art aux horizons de l'étude, ne trouvent pas d'application au combat aéromaritime pour défendre une force contre la menace des essaims de drones.

¹⁷³ Lobes secondaires et diffus éclaireraient le navire. Sur la base d'un émetteur à Pe de 1 GW, les puissances dans les lobes diffus sont de l'ordre de grandeur des protections réalisables (une très bonne isolation sur un navire est de 100 dB et 120 dB représente un exploit très coûteux). Le sujet DRAM (Dommages des Rayonnements électromagnétiques sur les Armes et Munitions) et les éventuels effets fratricides, s'ils ne sont pas abordés, sont néanmoins réels. Il en va de même des aspects DREP (Dangers des Rayonnements Electromagnétiques sur les Personnels) régis par la directive 2013/35/UE dont l'application, pour une arme de 10 TW conduirait à une distance de sécurité de 100 km. L'aspect compatibilité électromagnétique est repris en annexe IV.

¹⁷⁴ Une telle arme nécessite d'être orientée vers le drone que l'on veut abattre, ce qui suppose une gestion fine de l'interception pour un CPA dans le cône d'émission. Le drone intercepteur n'a pas de réserve cinématique pour une deuxième interception. Si ce type d'arme reçoit une certaine publicité à travers des démonstrations anti-drones, elle est probablement davantage conçue pour un emploi offensif.

○ POUR UN EFFET « SOFT KILL »

Au vu de l'état de la technologie et des améliorations anticipables aux horizons 2025 et 2030, les armes HPM aptes à obtenir un effet perturbateur sur l'électronique embarquée passeront, dans le même temps, de l'état de prototype à celui de produit généralisé ; on retiendra :

- Pour une arme installée à poste fixe sur un navire, une puissance d'émission de 50 MW, dans la bande 1 à 4 GHz ; une telle arme a recours à des antennes panneaux à balayage électronique qui couvrent un cône de 90° en site et en gisement ; sa portée pratique sur les drones considérés est estimée à 3 ou 4 km, pour un traitement simultané d'au moins 20 drones. Un tel système assure également la détection et le pistage des drones assaillants ; le « Leonidas » d'EPIRUS Inc. est emblématique de cette nouvelle famille d'HPM qui relève davantage du brouilleur ;
- Une arme recourant au même principe peut être installée sur un drone intercepteur, comme le montrent les premières réalisations de ce type ; avec une puissance autour d'1 KW ; elle est efficace dans un rayon d'une dizaine de mètres de la cible interceptée et peut délivrer son effet plusieurs fois, selon la capacité de sa batterie ; ne pouvant traiter qu'une seule cible par effecteur et uniquement en basse couche, une telle arme est de peu d'utilité.

Ces deux types d'armes peuvent être intégrés sans difficulté sur un bâtiment de surface¹⁷⁵. La première sera retenue comme représentative des armes HPM anti-essaims embarquables sur bâtiment de surface et destinée à traiter la menace de référence dont la susceptibilité à ces agressions est décrite au paragraphe suivant.

Quelques points clés sur les armes micro-ondes à forte puissance sont mentionnés en annexe IV, fournissant les arguments aux appréciations portées qui ne préjugent pas de la pertinence de ces effecteurs en contexte aéroterrestre ou spatial.

- LA SUSCEPTIBILITE DES VECTEURS DE L'ESSAIM

Pour confronter la menace de référence aux armes à énergie dirigée, il convient de définir la susceptibilité des drones aux effets de ces armes. Les caractéristiques retenues figurent ci-dessous :

		Cible type « ALTIUS-600M »	Cible type « PERDIX »
Caractéristiques des matériaux et capteurs exposés aux HEL	Matériaux	Carbone-époxy ép. 2 mm	Fuselage en kevlar ép. 0,8 mm ¹⁷⁶
	Capteurs électro-optiques	Divers capteurs optroniques à matrice de silicium, en verre ou polymère transparent dans le visible, éventuellement associés à illuminateur et télémètre laser	Caméra à matrice silicium, optique en verre ou polymère transparent
Caractéristiques des équipements embarqués exposés aux HPM	Electricité et Electronique	Peu durcie ¹⁷⁷ avec, en points faibles : - Pour des effets « hard kill », les antennes de communication et capteurs électro-optiques ; - Pour des effets « soft kill », les moteurs électriques des servocommandes des gouvernes.	

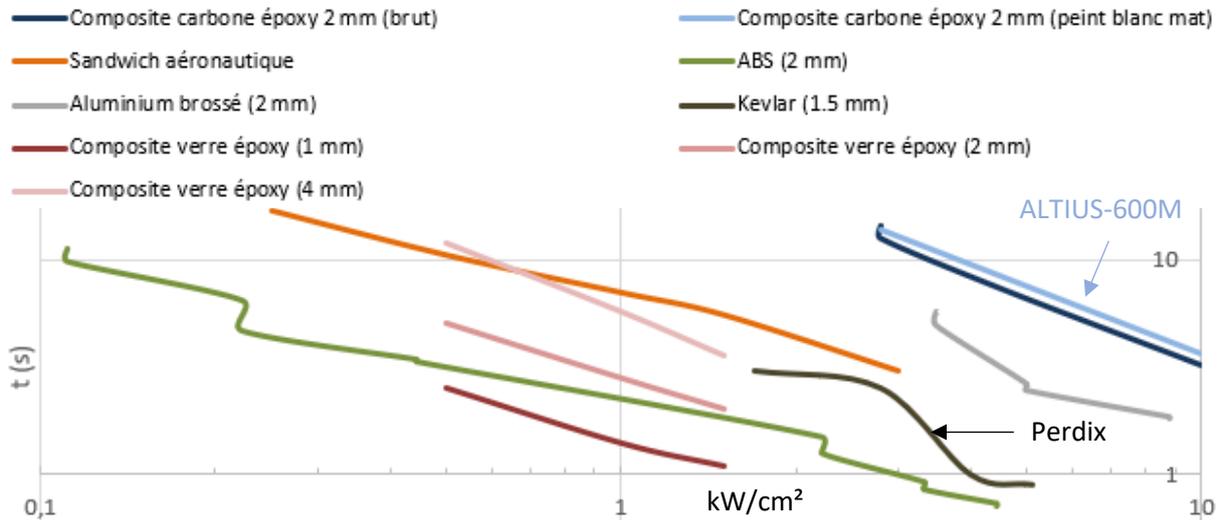
¹⁷⁵ En matière de compatibilité électromagnétique, on se retrouve avec des contraintes comparables à celles induites par les radars ARABEL ou EMPAR.

¹⁷⁶ Les ailes sont en sandwich (mousse dans une peau en carbone époxy). Seul le matériau du fuselage a été pris en compte pour l'étude en se référant à une épaisseur plus forte (1,5 mm), testée spécifiquement par l'Institut de recherches franco-allemand de Saint-Louis dans le cadre de l'étude.

¹⁷⁷ Il est impossible d'entourer un drone d'une cage de Faraday, en conséquence aucun design ne peut protéger un drone face à l'arme HPM. Un drone peut être moins susceptible qu'un autre mais

○ AUX HEL

En conséquence, la vulnérabilité des vecteurs précédemment décrits aux agressions laser se déduit des connaissances et expérimentations sur l'interaction onde-matière : issus des essais en laboratoire de l'ISL, les durées de perçage des différents matériaux caractérisant la menace de référence, au regard de la densité de puissance appliquée, correspondent à l'abaque ci-dessous pour un laser de longueur d'onde 1 μm (1070nm)¹⁷⁸ :



Soumis à un laser de longueur d'onde 2 μm , l'aluminium réagira de manière analogue, en revanche, le temps de perçage d'un composite sera beaucoup plus court. En l'absence de données issues d'essais et pour les besoins de l'étude, on retiendra arbitrairement, au même niveau de densité de puissance, des temps de perçage 4 fois plus courts pour les composites exposés à cette longueur d'onde.

Pour un capteur électro-optique à matrice de silicium agressé « dans le champ », on retiendra un seuil de destruction en 100 ms par une puissance de 100 W/cm^2 ; Agressé « hors champ », il sera ébloui le temps de l'éclairement. Ces deux effets s'appliquent donc aux capteurs du Perdix et de l'ALTIUS-600M. Les éventuels¹⁷⁹ capteurs infrarouges situés « hors bande » sont également susceptibles d'être éblouis par une agression laser. L'annexe III sur les points clés des armes laser apporte un éclairage sur la vulnérabilité des capteurs électro-optiques.

Vu de l'unité défendue, le contact du drone assaillant avec la surface sanctionne la destruction perceptible de la menace qui a pu également être observée sur l'optronique de poursuite. La destruction ou l'altération des optiques n'est pas perçue.

○ AUX HPM

La vulnérabilité des vecteurs précédemment décrits aux agressions des micro-ondes à forte puissance se déduit des connaissances et expérimentations sur l'interaction entre les champs électriques et magnétiques et les équipements embarqués :

Au vu de l'analyse qui a pu être faite des drones retenus pour être confrontés en essaim aux armes HPM, une même susceptibilité a été considérée pour les deux vecteurs, à savoir :

les écarts de performances seront faibles. Le durcissement se fait au détriment du devis de poids. C'est parfois l'effet inverse qui est recherché : le fuselage du Perdix a été volontairement construit en Kevlar, non conducteur, pour éviter tout effet type cage de Faraday et favoriser ainsi les communications.

¹⁷⁸L'abaque est en échelle logarithmique.

¹⁷⁹ Le coût élevé de ces capteurs rend leur généralisation peu probable.

Effet	Seuil associé
Dommages irréversibles après illumination	20 000 V/m sous 0,5 kJ
Mise hors service après illumination ¹⁸⁰ ou perturbation se prolongeant au-delà la durée d'illumination ¹⁸¹	10 000 V/m sous 0,5 kJ
Perturbation pendant la durée d'illumination ¹⁸²	Quelques dizaines de V/m

Ces seuils peuvent être considérés pour toute menace de ce type.

Vu de l'unité défendue, le contact du drone assaillant avec la surface est obtenu dans tous les cas, sanctionnant la destruction perceptible de la menace.



VULNERABILITES DES FORCES AEROMARITIMES VIS-A-VIS DE LA MENACE DES ESSAIMS DE DRONES

Dans la logique de la méthode d'évaluation des risques AVoiD, l'étude traite ici des vulnérabilités des forces aéromaritimes, en englobant les risques identifiés, leur impact et les leviers pour les maîtriser ou les atténuer.

- VULNERABILITES D'UNE FORCE CIBLEE PAR UN ESSAIM

Le paragraphe sur les nouvelles options d'engagement offertes par l'emploi des essaims de drones aériens liste les vulnérabilités ciblées par ce type d'arme : il convient de s'y référer.

Rappelons que le bâtiment de guerre ne constitue pas une cible unique pour un essaim de vecteurs compacts, mais une multitude de cibles, dont la destruction totale ou même partielle est susceptible de rendre le navire inapte à assurer ses missions, pour une durée d'autant plus importante que certains équipements n'ont pas toujours de rechanges et nécessiteraient des interventions industrielles lourdes pour être remplacés.

La force aéromaritime est davantage vulnérable de jour, dans sa composante surface et surtout à quai et en zone littorale. Les opérations de guerre des mines et de débarquement sont les plus vulnérables à cette menace. Néanmoins, la mise en œuvre d'une ruche depuis un navire civil en haute mer ou dans un détroit ne peut être écartée.

- CAPACITES D'UNE FORCE A CONTRER L'ESSAIM

La vulnérabilité d'une force aéromaritime s'évalue aussi au regard de sa plus ou moins grande capacité à contrer la menace des essaims de drones dans les différentes situations où elle peut y être confrontée. Il s'agit, en toutes circonstances, de mettre en œuvre une « kill chain » robuste allant de la détection à la neutralisation de l'essaim en passant par son identification.

¹⁸⁰ Drone ne pouvant être remis en service que par une intervention de maintenance extérieure.

¹⁸¹ Temps de redémarrage.

¹⁸² Sous réserve d'exploiter des formes d'onde appropriées.

○ DETECTION

La détection couvre ici la perception, son évaluation technique, la localisation des drones assaillants et leur pistage :

- La perception des drones constituant la menace de référence peut résulter :
 - D'une détection externe au sein de la force, augmentant le préavis pour les unités qui en sont encore éloignées.
 - D'une interception ESM des communications entre un essaim téléopéré et ses pilotes, qui peut être espérée à une dizaine de kilomètres ; moins énergétiques et plus frugales, les liaisons internes à un essaim « intelligent » ne sont perceptibles que tardivement, voire pas du tout.
 - Les radars impulsionnels modernes en service possèdent par conception une distance aveugle qui couvre la zone de détection de ces petits objets de faible surface équivalente radar¹⁸³ ; certains radars anciens peuvent espérer percevoir des drones de la taille de l'ALTIUS-600M en optimisant leurs réglages pour la zone proche, au détriment des autres besoins et avec une probabilité de détection par l'opérateur qui reste faible, sans autre préavis ; en conditions de propagation normales et selon leur technologie, les radars dédiés du marché peuvent espérer percevoir un ALTIUS-600M entre 1 400 et 5 000 m et un Perdix entre 1 000 et 3 000 m ; il est nécessaire de bien prendre en compte le fait que des munitions rodeuses comme l'ALTIUS-600M peuvent voler à haute altitude et adopter un profil d'attaque plongeant, souvent moins favorable à la détection ; ce profil de vol ne peut être exclu pour des Perdix attaquant un bâtiment de surface à quai ou au mouillage, après avoir été largués en altitude ; seule une détection tridimensionnelle est en mesure d'optimiser l'action des effecteurs, dans le temps imparti, pour contrer une menace aussi fugace.
 - Sous réserve d'une bonne transmission atmosphérique, les IRST peuvent contribuer à la perception à site bas à des distances sans doute inférieures aux radars dédiés, typiquement dans une fourchette 400 – 1500 m pour la menace considérée, chiffres qui ne peuvent être validés que par des essais sollicitant les équipements en dotation.
 - Une perception à la vue peut être envisagée à des distances de l'ordre de 400 m, par visibilité normale et personnel entraîné.
 - Une détection sonore est envisageable en ambiance peu bruitée à une distance de l'ordre de 300 m ; des équipements dédiés peuvent percevoir la signature acoustique typique des petits drones aériens.
- L'évaluation technique des perceptions obtenues fait partie intégrante du processus de détection. Elle n'est pas anodine dans la mesure où les causes de fausse alarme existent, en particulier les oiseaux (vitesse cohérente avec celle du Perdix) ou les vecteurs nautiques rapides pour les radars. Pour chaque senseur, les compromis entre probabilité de détection et taux de fausse alarme résultent du traitement et ne peuvent s'apprécier que par l'essai. L'opérateur consacre toujours un certain temps à cette phase d'évaluation technique, surtout lorsqu'il ne dispose que d'une unique source de perception.
- Le sujet de la localisation a déjà été évoqué à travers la nécessité que celle-ci soit tridimensionnelle, ce qui, de fait, impose le recours au radar. La faible taille des objets recherchés impose à ce dernier de faibles durées d'impulsion ou des émissions continues.

¹⁸³ On pourra se référer utilement à l'étude « Analyzing Radar Cross Section Signatures of Diverse Drone Models at mmWave Frequencies », VASILII SEMKIN, JAAKKO HAARLA, THOMAS PAIRON, CHRISTOPHER SLEZAK, SUNDEEP RANGAN, VILLE VIIKARI, et CLAUDE OESTGES.

- Le pistage est un point clé, à la fois pour obtenir rapidement une piste dotée d'éléments cinématiques et diffusable à la force, mais aussi pour permettre la mise en œuvre efficace des effecteurs et le « kill assessment », qui tous deux conditionnent la désaturation recherchée, face à ce type de menace.

Aux horizons de l'étude, seule une détection radar tridimensionnelle dédiée¹⁸⁴ de l'essaim est en mesure d'apporter un préavis utile et fiable, qui ne dépassera pas une à deux minutes. Une attention particulière doit être apportée à la détection des profils plongeants.

○ IDENTIFICATION

L'identification couvre ici la reconnaissance et l'identification proprement dite ainsi que la classification :

- L'analyse de l'interception d'une fréquence de guidage d'un essaim téléopéré peut permettre de reconnaître une liaison d'essaim avec un certain degré de confiance ;
- Appliquée aux multiples détections d'un essaim, l'analyse micro-doppler automatique d'un radar dédié¹⁸⁵ fournira, de manière récurrente, une forte probabilité de reconnaissance des vecteurs assaillants ;
- Pour la même fonction, le recours à l'optronique ou la vue ne peut s'envisager qu'à faible distance, quelques centaines de mètres, trop tardivement pour permettre une classification qui reste un acte de commandement, encore moins pour faire face à la saturation. Sauf, bien sûr, si les éléments sont fournis par un aéronef en vol.

Aux horizons de l'étude, un déroulé nominal d'une phase d'identification visuelle est impraticable et, quand bien même on y parviendrait, il ne resterait pas assez de temps pour engager convenablement. Seuls des radars dédiés permettent de traiter correctement la phase d'identification en se limitant à la reconnaissance, quel que soit le type d'essaim.

○ NEUTRALISATION

La neutralisation couvre la décision d'engagement, l'évaluation de la menace, la manœuvre des éventuels verrous et véto ainsi que de la situation de contrôle des armes, l'affectation des effecteurs, leur action et le « kill assessment » :

- La décision d'engagement lance la phase de neutralisation de l'essaim ; elle est prise sous contrainte de temps et au vu d'éléments qui peuvent paraître relativement ténus ; s'en suit la manœuvre des verrous/veto des effecteurs lorsque cette phase est nécessaire.
- Pour un essaim un tant soit peu étoffé, et pour un engagement aux armes dures, l'évaluation de la menace ne peut être qu'automatique, sur la base d'un pistage en trois dimensions, afin de déterminer « le chemin le plus court en durée » de recalage de l'arme au regard des « times on target » des vecteurs assaillants.
- Il est alors possible d'affecter les effecteurs, là aussi en privilégiant l'automatisation.
- La neutralisation des drones peut s'effectuer de différentes manières qui ont déjà été

¹⁸⁴ Il est illusoire d'espérer modifier à coût raisonnable l'existant et l'intégration de modes anti-drones à des radars de veille air excèderait le coût et l'intégration d'un équipement dédié.

¹⁸⁵ Pour assurer ces traitements, les radars dédiés sont dotés de fortes puissances de calcul, sous un facteur de forme compact, afin de fournir une reconnaissance en quelques secondes et de la confirmer régulièrement par la suite. La perception des pales en rotation permet, a minima, de distinguer le drone de l'oiseau. A noter que plus la fréquence d'émission est élevée, plus le traitement micro-doppler sera efficace : fort logiquement, les radars dédiés se situent en bande Ka et Ku.

évoquées et sont reprises ici, considérées dans le cadre d'une séquence d'engagement :

- En esquivant la menace, autant que faire se peut :
 - Par une manœuvre au vent de la menace à pleine vitesse, lorsque cette possibilité est offerte.
 - En mettant en œuvre un dispositif de masquage fumigène qui prive les drones assaillants de leur guidage terminal dans le visible.
 - L'adoption par les navires d'un camouflage destiné à perturber la vision artificielle embarquée des drones peut renforcer cette aptitude à l'esquive pour des essais scriptés ou « intelligents » : une déclinaison moderne du razzle-dazzle qui revient au goût du jour et fait ses preuves dans le domaine aéroterrestre¹⁸⁶.
- En recourant aux armes molles :
 - Par brouillage de leur liaison de contrôle pour les essaims téléopérés, jusqu'à une distance d'une petite dizaine de kilomètres pour des brouilleurs dédiés ; cette approche peut aussi s'avérer pertinente pour les essaims autonomes ISR qui auront davantage tendance à échanger.
 - Par une arme HPM « soft kill » embarquée, certes très coûteuse, mais apte à traiter l'essaim en une fois, s'il est regroupé dans un secteur de 90°, ou à se focaliser sur un des agents.
 - Par des contre-mesures optroniques destinées à aveugler les capteurs des drones assaillants, option à laquelle il faut recourir avec précaution, face à un grand nombre de vecteurs susceptibles de s'en servir comme d'un phare pour rallier leur cible.
- En recourant aux armes dures :
 - Par destruction à l'arme laser des optiques, technologie qui donne de bons résultats sans recourir à de fortes puissances ; l'efficacité de cette option suppose un pistage continu, stable et précis ; en complément, un détecteur d'optique pointé pourrait contribuer à cibler les vecteurs assaillants prioritaires, voire confirmer les destructions, en complément des optiques de poursuite (ce point mériterait une étude) ; cette approche trouve ses limites à très courte portée, lorsque le drone est déjà sur sa trajectoire d'impact : compte tenu de l'écart de vitesse et de manœuvrabilité entre l'assaillant et sa cible, il est raisonnable de chercher à traiter les optiques à plus de 1 000 m (une capacité à traiter les optiques entre 1000 et 2000 m semble adaptée). Une telle approche suppose qu'il soit possible de prévenir les interférences mutuelles, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui, pour les lasers à 1 μ, mais le sera demain pour les lasers à 2 μ.
 - Par emploi de CIWS et d'armes légères d'infanterie (y compris mises en œuvre depuis un hélicoptère en vol), sous réserve qu'un stade d'alerte élevé permette d'y recourir dans le délai imparti ; une posture qui correspond bien aux situations d'hostilité ouverte mais moins au « temps de paix »¹⁸⁷. Aux horizons de l'étude, l'adoption de CIWS dédiés est envisageable : Coyote Mk2 de Raytheon ou bien mini-missiles¹⁸⁸ ; la

¹⁸⁶ Voir à ce sujet les essais de camouflages menés par la STAT.

¹⁸⁷ Le 17ème groupe d'artillerie de Biscarosse, entraîne depuis des années les unités de l'armée de terre à la lutte antiaérienne toutes armes (ou LATA) sur des cibles SQ20 très représentatives des petites munitions rodeuses (engagement au 20mm, 12,7 mm et fusil d'assaut). Son retour d'expérience pourrait compléter utilement celui de la marine en matière d'engagement de drones.

¹⁸⁸ Miniature Hit-to-Kill (MHTK) interceptor (Lockheed Martin), Miniature Self-Defence Missile (MSDM), Hard Kill Defensive Aid System (HK-DAS) (MBDA), Hard Kill Self Protection Countermeasure System (HKSPCS) (US Navy).

navalisation des roquettes de 68mm ACULEUS-LG¹⁸⁹ de Thales pourrait être considérée, voire le missile Starstreak¹⁹⁰ du même fabricant. Enfin, une transposition du concept de blindage actif au domaine naval pourrait être une piste à explorer.

- Par emploi de drones intercepteurs à impact qui peuvent apporter une contribution à la désaturation en basse couche et sont davantage compatibles d'un emploi « temps de paix », même s'ils ne suffiront pas à traiter un essaim étoffé ou des profils plongeants.

En pratique, une tactique d'engagement efficace combinera ces différentes approches en fonction des effecteurs disponibles et du contexte. Cela restera valide aux deux horizons de l'étude. On ne peut que constater la faiblesse ou le coût rédhibitoire des « armes molles » dans le cadre de la lutte contre les essaims de drones, alors même que ces armes sont particulièrement bien adaptées au « temps de paix » et à la prévention des interférences. A ce titre, il pourrait être pertinent d'envisager l'emploi d'un radar de Rafale, embarqué sur bâtiment de surface, pour mettre en œuvre des formes d'onde appropriées, dans un format plus compact et pour un coût plus raisonnable que les produits américains. L'emploi de l'arme laser¹⁹¹ contre les optiques est intéressante pour amoindrir voire éliminer la menace « à l'aveugle » ; elle peut, dans une certaine mesure, compenser le difficile recours aux « armes molles ».

- Le « kill assessment » qui n'est viable qu'automatisé et trouve ses limites pour évaluer l'efficacité du masquage fumigène ou la destruction des optiques au laser ; là encore un pistage continu et de qualité conditionne la performance.

○ COMMAND AND CONTROL

Face à la menace de drones en essaim, la séquence d'engagement doit être déroulée sur le même tempo qu'une attaque aérienne subsonique détectée entre 10 et 20 nautiques, ce qui se conçoit bien en hostilités ouvertes, mais devient moins simple à réaliser dès le « temps de paix », surtout lorsque la phase d'identification positive est impraticable augmentant d'autant le risque de méprise ou d'escalade incontrôlée et compliquant de fait la mise en œuvre des règles d'engagement. Face à ce défi, la question du C2¹⁹², exploité en support de la lutte à bord des bâtiments de combat, est essentielle : faut-il intégrer la LADA, et en particulier la lutte contre les essaims, au système de direction de combat, traditionnellement dédié à conduire l'action dans la profondeur d'un dispositif ? Est-il préférable d'acter que la zone proche mérite un traitement particulier, distinct mais fédéré ? De fait, le volume en proximité immédiate du navire est celui de la LCMA, de la sécurité nautique et de la mise en œuvre des vecteurs déportés ; c'est aussi celui où la prévention des interférences n'est pas le fait du central opérations.

¹⁸⁹ Ces roquettes guidées laser sont principalement mises en œuvre par l'hélicoptère Tigre en panier compact de 22 engins, initiés par induction. Très sécurisées, elles affichent une aptitude à l'emploi en environnement aéromaritime, une intégration aisée (DRAM bleu, MURAT, absence de dommages causés par les éjectas) et, selon le fabricant, une évolution possible vers la lutte anti-drones. Leur volume d'emploi (~1000 à ~5000 m), leur coût unitaire, leur vitesse et leur précision métrique sont cohérentes avec les impératifs de la lutte contre les essaims de drones. L'absence probable d'autoprotection sur les cibles, associée à une cinématique lente et dépourvue d'esquive, favorise ce type d'effecteur qui trouverait d'autres usages dans le traitement des petites cibles de surface saturantes. Reste que l'application efficace du guidage laser semi-actif à des cibles mobiles n'est pas démontré, en particulier une stabilité suffisante de la tâche laser de désignation et un niveau d'énergie reçu acceptable pour assurer le fonctionnement nominal de l'autodirecteur de la roquette.

¹⁹⁰ Le missile Starstreak, fabriqué par Thales en Irlande du Nord, possède, lui aussi, un guidage semi-actif laser et un périmètre d'emploi globalement comparable à la roquette ACULEUS-LG ; en revanche, le nombre de missiles par affût est beaucoup plus limité (quatre sur les affûts navals existants).

¹⁹¹ A noter que certains télémètres laser peuvent obtenir ces effets en usage secondaire.

¹⁹² Command and Control.

- SYNTHÈSE

Les drones en essaim, ou plus précisément les munitions rodeuses en essaim, ciblent des vulnérabilités réelles des forces navales qui y sont davantage exposées de jour, à quai et en frange côtière, particulièrement lors d'opérations amphibies ou de déminage et face à des acteurs éventuellement dépourvus de marine, d'aviation ou de défense côtières classiques. Les drones en essaim contribuent au déni d'accès, en autorisant des engagements saturants à bonne distance d'une côte. L'avènement de cette menace, désormais proliférante, parfois nivelante, signe durablement la perte de la supériorité aérienne en basse couche, observée dans les derniers conflits¹⁹³ et matérialise de nouvelles menaces dans les couches supérieures. Quasiment aveugles aujourd'hui pour les détecter, les forces aéromaritimes peuvent néanmoins recourir à des solutions éprouvées à base de radars dédiés, aptes à leur fournir une à deux minutes de préavis. Les CIWS et, au dernier moment, les armes légères d'infanterie peuvent engager la menace. Au chapitre des « armes molles », le brouilleur dédié aux essais téléopérés reste un bon investissement, tant ceux-ci sont encore largement représentés dans les fabrications artisanales. Une solution HPM « soft kill », basée sur le radar du Rafale pourrait être envisagée. En complément de ces effecteurs, l'esquive pourrait être favorisée par le recours à un camouflage ad hoc et au masquage par fumigène. Il n'en demeure pas moins qu'une force aéromaritime sera plus à l'aise pour affronter des essaims de drones en période d'hostilités ouvertes qu'en « temps de paix ». En ce sens, les drones intercepteurs présentent un intérêt pour renforcer les moyens de lutte auxquels il est possible de recourir facilement, quel que soit le contexte. Au titre des doctrines d'engagement, il apparaît que le préalable de l'identification positive, visuelle ou optronique, et le « kill assessment » systématique deviennent souvent impraticables, ce qui renforce l'intérêt pour les rares effets réversibles ou qui ne concourent pas à l'escalade. Enfin il est nécessaire de faire un arbitrage entre C2 dédié aux menaces en champ proche et module particulier du système de direction de combat.



CONCLUSION

Au vu de la documentation ouverte, sans préjuger de performances qui sont essentiellement logicielles, mais en cohérence avec l'état de l'art, les publications scientifiques et les signaux non techniques, principalement financiers, l'autonomie collaborative appliquée aux drones aériens militaires devient réalité. Elle génère de nouvelles capacités, dont certaines amorcent une prolifération et qui sont susceptibles de modifier en profondeur les procédés tactiques du « scouting », de « l'anti-scouting » et de l'engagement. Cette évolution prend corps, d'abord aux États-Unis, mais aussi dans le reste du monde, où plusieurs acteurs industriels font émerger une offre de munitions rodeuses en essaims qui ouvre de nouvelles perspectives offensives mais constituent aussi une menace encore très difficile à contrer.

La technique est culturelle et chaque peuple, à sa manière, y reflète son génie propre. C'est particulièrement vrai pour la robotique militaire et relativement peu mis en avant. Le facteur humain y est pourtant prépondérant et les essaims évolués marqueront les conflits à l'image des cultures qui les conçoivent et les programment. Ils pourraient être sophistiqués et rigides, à la manière des opérations navales japonaises de la guerre du Pacifique, marquées par des plans byzantins et une inaptitude constante à saisir les opportunités. Peut-être reflèteront-ils l'aveuglement du complexe de supériorité où s'enfoncent les États-Unis. Ou bien exprimeront-ils la dualité acteurs-censeurs, incarnée par les commissaires politiques des armées communistes. En France, ne serait-il pas préférable qu'ils plongent leurs racines dans les vertus guerrières chères à notre beau pays et qui se sont si bien exprimées à Bir Hakeim, Ko Chang ou Kolwesi, beaux exemples de brillante exploitation d'équipements très imparfaits ? Pour un pays, s'en remettre totalement à l'interopérabilité, c'est accepter d'estomper son aptitude à penser et conduire la guerre ; c'est une forme d'effacement culturel. En ce sens, la maîtrise de l'autonomie collaborative contribue à l'exercice de la souveraineté.

¹⁹³ Levant, Yémen, Libye et Haut-Karabagh.

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I : BRIQUES TECHNOLOGIQUES DE L'ESSAIM

ANNEXE II : PRINCIPALES REALISATIONS AUX ETATS-UNIS

ANNEXE III : ARMES LASER : POINTS CLES

ANNEXE IV : ARMES HPM : POINTS CLES

ANNEXE V : EFFET THERMIQUE SUR L'ELECTRONIQUE

ANNEXE I

BRIQUES TECHNOLOGIQUES DE L'ESSAIM

Face aux limitations des essaims purement scriptés ou téléopérés (faiblesses des liens de communication, boucle de décision longue ou rigidité face aux aléas, coût en charge de travail, etc.), il est tentant de donner des capacités de décision à l'essaim de drone. L'objectif est de concevoir des machines ou des systèmes de machines capables de percevoir et modéliser leur environnement et d'adapter leur comportement en fonction de ces perceptions pour réaliser les intentions de leurs concepteurs.

Des recherches dans le domaine de l'intelligence artificielle et de la robotique sont menées depuis des dizaines d'années en ce sens. Il s'agira de concevoir des architectures de calcul (des algorithmes) qui permettent aux membres de l'essaim d'autodéterminer une partie de leurs actions en fonction de leur perception de l'état du monde. En d'autres termes, la machine doit être dotée de mécanismes de calcul qui lui permette de choisir une ou des actions appropriées, en fonction de la situation. Ces choix se doivent d'être rationnels eut égard aux objectifs de l'organisation humaine qui a choisi de mettre l'essaim en œuvre.

ARCHITECTURES DE DECISION INDIVIDUELLES

- ARCHITECTURE REACTIVE

La rationalité d'un agent se juge à la manière dont il associe ses actions à ses perceptions. La manière la plus simple de concevoir un agent rationnel (on parlera d'*architecture*) est donc de le doter d'un ensemble de règles *stimulus-réponse* qui décrira entièrement son comportement. On parlera alors d'*agent réactif*, *réflexe* ou encore d'approche réactive (*reaction-based*).

L'approche réactive pour la conception d'agents rationnels artificiels est principalement due à Rodney Brooks¹⁹⁴ du MIT avec son *architecture de subsomption*. Dans deux manifestes, maintenant célèbres^{195,196}, il définit son projet : concevoir des robots « intelligents » (des agents rationnels) de manière incrémentale, en partant de comportements réflexes très simples et en les combinant pour en obtenir de plus élaborés, jusqu'à « l'intelligence ». Dans ce projet, Brooks prend le contre-pied de l'approche délibérative, utilisée jusque-là en intelligence artificielle (IA), et qui consistait à prendre le problème « par le haut » en commençant par le raisonnement de haut niveau et en postulant que les tâches, en apparence plus simples, telles que la perception et l'action se résoudraient facilement. Cette approche classique, que Brooks désigne par le sobriquet GOF AI (*Good Old-Fashioned Artificial Intelligence*), avait donné des systèmes capables de résoudre des problèmes complexes, et même de prouver des théorèmes mathématiques, mais incapables ne serait-ce que de se déplacer dans un laboratoire en évitant quelques obstacles. Au contraire, Brooks commence par traiter les problèmes tels que la locomotion, et réalise des robots capables de se déplacer, même dans des environnements très accidentés.

La différence fondamentale entre l'approche délibérative, présentée par la suite, et l'approche réactive tient aux symboles. L'approche délibérative donne à l'agent une représentation symbolique de son environnement. Cette représentation est une abstraction des sorties des capteurs de l'agent, qui manipule ensuite ces symboles en interne, grâce à un « modèle du monde » et décide de ses actions. Dans l'approche réactive, on considère que « le monde est son meilleur modèle ». Dans sa version la plus simple, cette approche ne comporte pas d'état interne, les sorties des capteurs sont directement traitées par de simples circuits électriques qui calculent en continu le signal à envoyer aux effecteurs.

¹⁹⁴ Également fondateur de iRobot, l'entreprise fabricant les célèbres aspirateurs robot Roomba.

¹⁹⁵ R. Brooks (1991a). Intelligence without reason. In Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), pages 569– 595, Sydney, Australia. Morgan Kaufmann.

¹⁹⁶ R. Brooks (1991b). Intelligence without representation. Artificial Intelligence, 47:139–159.

Une architecture réactive peut-être suffisante pour la coordination. Toutefois, bien qu'en général très robuste, un système multi-agent qui fonctionne par coordination et utilise des agents réactifs n'est capable ni d'accomplir des tâches complexes, ni de s'adapter facilement à une nouvelle tâche. Pour obtenir des comportements plus élaborés, il faut que les agents soient dotés de *but*s, et plus généralement d'*attitudes propositionnelles*¹⁹⁷ envers leur environnement. On désigne par attitude propositionnelle une modalité telle que la croyance, le désir, l'intention ou même l'espoir, envers une proposition ayant trait au monde. Par exemples : « je crois que la cible est illuminée » ou encore « j'ai l'intention de tirer ».

- ARCHITECTURE DELIBERATIVE

Bien que nous ne l'abordions qu'après, l'architecture réactive, l'architecture délibérative la précède dans l'histoire de l'intelligence artificielle. À partir de 1957, et jusqu'au début des années 60, Ernst, Newell, Simon et Shaw développent le *General Problem Solver*. Ils comparent un raisonnement exprimé au fur et à mesure et à voix haute par un sujet humain à la « trace » de leur raisonneur artificiel : le raisonnement artificiel ne correspond, au mieux, qu'à un sous-ensemble des raisonnements humains. Il n'empêche que l'approche délibérative, qui est à la base du *General Problem Solver*, permet théoriquement à une machine de résoudre tout problème correctement formalisé.

Un agent fondé sur une telle architecture délibérative possède un modèle du monde, qui lui permet de prédire l'évolution naturelle de l'environnement, ainsi qu'un modèle de ses actions, qui lui permet de prédire l'effet de ses actions sur l'environnement (ces deux modèles opèrent sur des représentations internes de l'environnement). On peut résumer le principe de cette architecture par : percevoir - modéliser - planifier – agir : on distingue clairement une inspiration cognitiviste, que l'on retrouve également dans le modèle OODA. Un agent délibératif perçoit son environnement, il est capable de mettre à jour un modèle de cet environnement pour prédire son évolution, il planifie ses actions dans l'optique de satisfaire ses buts et il agit en fonction de ces plans.

Pour permettre à un agent de choisir ses actions, l'architecture délibérative utilise généralement le principe de la recherche dans un graphe. Ce graphe est construit grâce aux modèles dont dispose l'agent, avec, comme état de départ, la représentation courante que se fait l'agent de son environnement.

Les modèles du monde et des actions sont utilisés pour générer les mondes possibles futurs sous l'hypothèse des différents enchaînements d'actions envisageables par l'agent. Ces mondes possibles sont comparés aux buts de l'agent et on choisit l'action qui amène au monde possible correspondant aux buts ou s'en rapprochant le plus.

Nous n'aborderons pas ici la façon dont les mondes possibles et les modèles sont représentés dans l'agent (approche symbolique, utilitariste, probabiliste, etc.). Toutefois, c'est là que se situe la principale différence entre un agent délibératif et un agent réactif à états. S'il est possible de décrire une architecture délibérative comme un ensemble de règles (les modèles du monde et des actions ainsi que les règles de comparaison entre mondes possibles et buts) et d'états internes (l'état courant du monde et les mondes possibles) sur lesquels opèrent ces règles, la différence tient d'une part à la complexité des règles, et d'autre part à la nature des états internes. Un agent réactif n'a que des états internes statiques du type « cible détectée (oui/non) » ou encore « dernière position de la cible », tandis qu'un agent délibératif manipule des structures de données symboliques de manière dynamique en mémoire.

Concrètement, un robot moderne « avancé » utilise une architecture hybride : un système de type délibératif « pilote » le comportement abstrait du robot en planifiant et replanifiant régulièrement, tandis que des sous-systèmes réactifs assurent les fonctions sensori-motrices plus concrètes, telles que la locomotion, la détection, l'utilisation des charges utiles, etc.

TRAITEMENTS EMBARQUES AVANCES

Les drones emportent des capteurs susceptibles de produire des volumes considérables de données, principalement sous forme de séries temporelles. Nous pensons ici principalement à des données vidéos, mais il peut s'agir d'enregistrements ESM, MAD, microphoniques ou autres. Les possibilités

¹⁹⁷ J. Fodor (1987). *Psychosemantics*. The MIT Press.

croissantes d'embarquer des capacités de calculs importantes font que ces données peuvent de plus en plus facilement être traitées, analysées et utilisées localement dans le drone ou de façon distribuée dans l'essaim. Cela est désirable pour deux raisons :

- Les canaux de communication avec le poste de contrôle ont une bande passante limitée. Il est plus facile de faire descendre les résultats d'une analyse plutôt que les données brutes ;
- Le drone ou l'essaim peut avoir besoin du résultat de l'analyse pour déterminer son propre comportement. Procéder localement à cette analyse de données permet d'économiser du temps et de la bande passante, et donc de gagner en réactivité et en robustesse.

Ce concept est à rapprocher de l'idée de « edge computing », développée dans le domaine du cloud, et qui consiste à traiter les données à la périphérie du réseau, près de leurs sources. Une réalisation telle que l'Agile Condor High-Performance Embedded Computing¹⁹⁸, qui consiste à embarquer dans un pod un ordinateur très puissant, permet ainsi des traitements avancés sur de très gros volumes et débits de données, tout en s'affranchissant des contraintes de bande passante.

- DETECTION / IDENTIFICATION OPTRONIQUE



Figure 1 : illustration de reconnaissance automatique d'objets de la vie quotidienne par un système tel que TensorFlow, pouvant fonctionner sur un smartphone classique.

Les progrès récents des techniques de Deep Learning (utilisation de réseaux de neurones massifs) ont permis une augmentation spectaculaire des performances de la classification automatique d'images ainsi que sa très large démocratisation. Ainsi, il est possible de mettre œuvre des modèles extrêmement efficaces de détection et de classification même sur un smartphone bas de gamme grâce à des outils logiciels libre d'accès comme TensorFlow. Ces techniques sont efficaces, aussi bien sur image fixe que sur flux vidéo, et sont capables de segmenter, localiser et identifier de multiples objets en parallèle.

On voit bien tout l'intérêt que cela peut représenter pour concevoir des robots qui ont besoin de modéliser leur environnement pour agir. Les usages incluent bien sûr la détection et le suivi de cible, mais aussi la détection d'obstacles ou encore d'amers dans l'environnement pour faciliter la navigation.

Toutefois, les modèles largement accessibles concernent des domaines assez restreints, comme les objets du quotidien, ou encore la reconnaissance faciale. Développer de nouveaux modèles adaptés au combat aéromaritime est techniquement assez simple mais nécessitera en revanche de très grands volumes de données d'exemple, difficiles à obtenir (il s'agit de techniques d'apprentissage par renforcement).

Il apparaît probable que les vecteurs opérant à des vitesses relativement faibles et à faible altitude soient très utilisateurs de ces techniques.

¹⁹⁸ Embarqué sur drone MALE.

- LOCALISATION

Un autre aspect intéressant, en traitement embarqué, consiste à cartographier dynamiquement l'environnement en même temps que l'on y navigue. Qualifiée de SLAM en anglais (*Simultaneous localization and mapping*), il s'agit de se positionner pour naviguer en même temps que l'on met à jour une carte de l'environnement. Ces technologies sont maintenant largement mûres et disponibles.

De plus, ces techniques ont un intérêt démultiplié lorsque l'on opère en essaim et que les cartes sont partagées entre les membres : chaque mise à jour profite à tous, et les informations sont croisées. Il s'agit d'un cas typique de sur-additivité.

- CONTROLE HIERARCHIQUE

Enfin, un cas particulier de traitement embarqué mérite d'être mentionné de par sa spécificité aux essais de drone : il s'agit du contrôle total ou partiel d'un essaim de drones par un programme spécialisé et centralisé, fonctionnant lui-même à bord d'un drone. Ainsi, un drone possédant des capacités de calcul importantes peut contrôler un essaim, dans un mode maître-esclave ou téléopéré, en tirant parti du fait d'être localisé dans la même zone et d'être ainsi moins exposé aux limitations de communication qui sont le point faible des approches centralisées.

INTEGRATION DANS UN ESSAIM

La capacité de coordination entre les agents est le critère déterminant pour distinguer un *système* multi-agents de la simple superposition d'agents individuels. Les trois briques fondamentales pour construire un véritable essaim semi-autonome sont :

- Une architecture de coordination qui va encadrer les comportements individuels des agents, afin de faire en sorte que le comportement collectif soit aligné avec les buts de l'essaim ;
- Au moins un moyen de communication interne à l'essaim, afin que les agents disposent des informations nécessaires sur l'activité des autres agents, afin de se coordonner ;
- Un moyen de communication robuste entre le ou les opérateurs humains et l'essaim, qui leur permette d'ajuster le comportement de l'essaim (semi-autonomie). Ce moyen de communication comprend à la fois le support de communication physique et l'interface Homme-machine dédiée, qui doit pouvoir faire le pont entre l'architecture de coordination de l'essaim et les contraintes cognitives humaines.

ARCHITECTURES DE COORDINATION

Un robot, ou agent individuel, peut être considéré comme un vecteur capable de percevoir partiellement le monde qui l'entoure (y compris sa propre position et sa cinématique) et capable d'agir sur ce monde (à minima en se déplaçant). Nous appellerons coordination la capacité de chaque membre d'un essaim à décider de ses actions en tenant compte, non seulement de l'évolution de ses connaissances sur l'environnement, mais aussi des actions des autres membres de l'essaim.

Un couple de drones dans une configuration illuminateur/tireur constitue un bon exemple de coordination. Les deux vecteurs doivent rallier une cible ; le vecteur illuminateur doit la détecter puis l'illuminer grâce à un laser ; une fois illuminée, la cible peut être attaquée par le drone tireur. On voit bien, dans cet exemple, que le drone tireur doit attendre que l'illuminateur ait accompli sa tâche pour accomplir la sienne. Et même si l'on peut imaginer que le drone illuminateur puisse accomplir sa tâche sans se coordonner avec le tireur, il serait plus rationnel de vérifier que le tireur est en capacité avant d'illuminer.

- COORDINATION REACTIVE

De la même façon que l'architecture de décision individuelle réactive permet de concevoir des agents artificiels aux comportements adaptés à leur tâche et à leur environnement, il est possible d'utiliser des ensembles de règles de comportement assez simples pour coordonner un essaim de drones, tant que la tâche dévolue à l'essaim reste simple.

○ BOIDS

Un des exemples les plus classiques de comportement de groupe est le modèle BOIDS de Reynolds¹⁹⁹. Il a permis de mettre en évidence en simulation la possibilité de répliquer les comportements naturels de nuées d'oiseaux, essaims d'insectes ou bancs de poissons à l'aide de trois comportements élémentaires :

- La cohésion : pour former un groupe, les boids se rapprochent les uns des autres ;
- La séparation : deux boids ne peuvent pas se trouver au même endroit au même moment ;
- L'alignement : pour rester groupés, les boids essaient de suivre un même chemin.

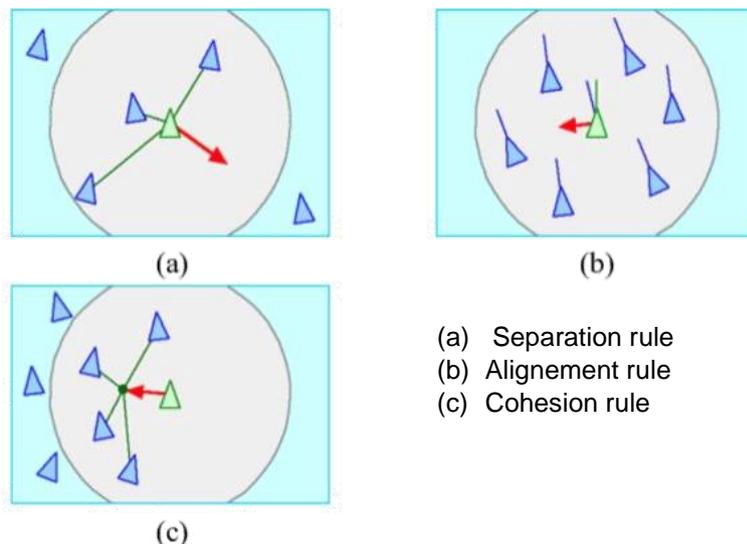


Figure 2 : les différentes règles de comportement du système BOIDS (on notera le rayon de perception associé à chaque règle).

En ajoutant à chaque agent un mécanisme qui combine de façon pondérée les trois comportements, et en paramétrant correctement les distances de perception, on obtient des résultats très naturels : une nuée est capable de garder sa cohésion tout en évitant les collisions entre agents ou avec des obstacles, voire de fuir des prédateurs de manière coordonnée.

○ TÂCHES PLUS COMPLEXES

La situation la plus facile à appréhender correspond aux tâches collectives qui se prêtent naturellement à une division horizontale du travail. L'exemple le plus parlant est la recherche d'un ou plusieurs objets dans une zone. La zone de travail totale est divisée au démarrage de la mission de l'essaim en sous-secteurs qu'un engin est capable de traiter seul. La coordination de l'essaim se fait alors par l'échange de messages qui expriment qu'un agent X prend la responsabilité du secteur Y, ou que l'agent X a terminé de traiter le secteur Y. Lorsqu'il n'a plus de secteur à traiter, un agent en sélectionne un nouveau parmi ceux restant et l'annonce aux autres. Pour peu que chaque engin soit effectivement capable de

¹⁹⁹ Craig W. Reynolds, « Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model », ACM SIGGRAPH Computer Graphics, vol. 21, no 4, juillet 1987, p. 25-34.

traiter un sous-secteur et de sélectionner judicieusement le prochain secteur à traiter, une telle approche permet alors un travail coordonné très efficace et robuste aux aléas (notamment l'attrition de l'essaim, car la répartition n'est pas calculée une fois pour toute au début de la mission).

Ce type d'approche est utilisable tant que les tâches des agents individuels ne sont pas directement dépendantes les unes des autres. Les interactions entre agents restent indirectes, par le biais d'une représentation partagée de l'état d'avancement de la tâche collective, que chacun met à jour et dont il tient compte pour prendre ses décisions individuelles.

Mettre en œuvre la coordination d'un essaim en utilisant des règles trouve ses limites lorsque les actions des individus dépendent les unes des autres. Une telle approche a été utilisée par exemple dans les années 90 par les forces armées US pour créer des agents artificiels réalistes dans le cadre de sessions d'entraînement mixtes (simultanément réelles et virtuelle) à grande échelle.

Nous allons développer ici cet exemple, qui nous servira de point de départ pour aborder le travail en équipe à la section suivante.

La figure ci-dessous illustre la tâche de type « attaque » : il s'agit pour une équipe d'hélicoptères d'attaquer une colonne de véhicules ennemis se déplaçant derrière une crête. Tout d'abord, l'équipe rejoint un point de rassemblement, hors de vue de l'ennemi, à l'issue d'une phase de navigation. Une fois ce point rejoint, un ou deux éclaireurs rejoignent la ligne de crête pour repérer précisément la position de l'objectif. Les membres de l'équipe se répartissent alors leurs positions de combat, toujours masqués par la ligne de crête, puis procèdent à l'attaque en se démasquant de manière alternée pour tirer leurs missiles. Enfin, l'équipe rentre à la base.

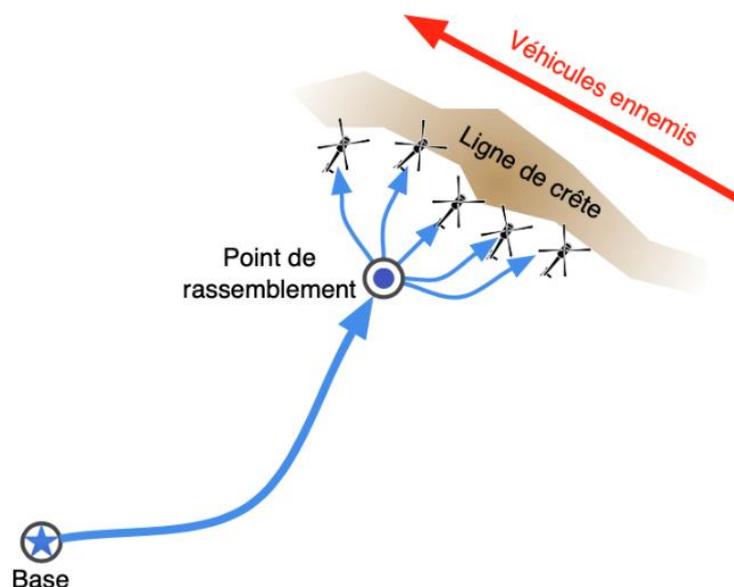


Figure 3 : illustration de la mission "attaque" pour une équipe d'hélicoptères.

En utilisant un système fondé sur la simple coordination entre agents à base de règles, les équipes effectuent, la plupart du temps, leurs tâches sans incident, mais présentent parfois de graves problèmes de coordination, comme, par exemple :

- 1- Une fois arrivés au point de rassemblement, les membres de l'équipe attendent le message de l'éclaireur pour passer à l'attaque. Si l'éclaireur s'est écrasé entre temps, le reste de l'équipe reste en attente indéfiniment ;
- 2- Une fois la mission accomplie, si le partenaire du commandant (c'est par l'intermédiaire de ce partenaire que se coordonne le reste de l'équipe) est détruit, il peut arriver que le commandant rentre seul à la base, les autres ne réalisant jamais que la mission est terminée ;
- 3- Pendant l'attaque, seuls les agents pouvant voir les cibles attaquent, les autres restant inactifs ;
- 4- Il peut arriver que certains membres de l'équipe ne se rendent pas compte qu'un point de navigation a été atteint.

Bien sûr, tous ces problèmes peuvent être résolus au coup par coup en ajoutant des tests et des règles dans le système, mais de tels dysfonctionnements ne peuvent tous être prévus au moment de la conception, ni observés en simulation ; d'où la nécessité d'un modèle suffisamment général pour faire face à ce type d'aléa.

- TRAVAIL D'ÉQUIPE

On considère qu'un groupe d'agents constitue une équipe lorsqu'ils sont capables de raisonner sur l'activité du groupe afin d'avoir un comportement collectif cohérent. Une telle approche a été développée dans le cadre de TacAir-SOAR, puis STEAM^{200,201}, afin justement de pallier aux défauts de l'approche de coordination réactive dans les systèmes de simulations mentionnés ci-dessus.

SOAR est une architecture cognitive symbolique, créée par John Laird, Allen Newell, et Paul Rosenbloom à l'Université Carnegie-Mellon. C'est à la fois un modèle de la cognition et une implémentation d'une architecture de programmation pour l'Intelligence artificielle (IA). Depuis ses débuts en 1983 et sa présentation dans un article en 1987, SOAR a été largement utilisé par les chercheurs en IA. Le logiciel est Open Source et, bien qu'il puisse sembler dépassé, il est maintenu par l'entreprise Soartech (Soar Technology Inc), qui a reçu environ 100 mio\$ à travers quelques 200 SBIR depuis 1998. Notons, en outre, que Soartech met en avant sa technologie SwarmMATE™ parmi d'autres applications défense.

L'approche STEAM, fondée sur SOAR, se concentre sur la notion d'équipe d'agents, coopérant pour atteindre un but commun, plutôt que sur la simple coordination réactive entre individus. Afin de pouvoir travailler en équipe dans un environnement complexe et dynamique, STEAM utilise des *plans d'équipe* réactifs qui décrivent les activités de l'équipe et se décomposent de manière hiérarchique jusqu'aux activités individuelles. Pour exécuter un tel plan, un modèle de travail d'équipe est nécessaire et le cadre théorique des *intentions communes* (joint intentions)^{202,203} est mobilisé. Cette approche permet un fonctionnement flexible de l'équipe et évite d'avoir à fournir un plan de coordination fixe, qui serait souvent mis en défaut étant donnée la nature complexe et dynamique de l'environnement.

Nous présenterons ici, de manière simplifiée, la version légèrement modifiée du cadre des intentions communes qu'utilise STEAM ; Le fait que l'équipe Θ a l'intention conjointe d'accomplir une action se traduit par un *but persistant commun* (joint persistent goal, JPG) de rendre p vrai où p représente le résultat de l'action. $JPG(\Theta, p)$ est valide si, et seulement si, trois conditions sont satisfaites:

- Tous les membres de l'équipe croient mutuellement que p est actuellement faux
- Tous les membres de l'équipe savent mutuellement qu'ils désirent que p devienne vrai ;
- Tous les membres de l'équipe croient mutuellement que chacun a p comme *but faible* (weak goal, WG) jusqu'à ce que p soit mutuellement connu comme vérifié, invérifiable ou non pertinent. $WG(\mu, p, \Theta)$ signifie que l'agent μ considère p comme faux et désire qu'il devienne vrai, ou bien que μ ayant découvert que p est vérifié, invérifiable ou non pertinent, il désire que cela devienne la croyance commune de l'équipe.

Ce cadre a été modifié en deux points :

- Communications. Satisfaire $WG(\mu, p, \Theta)$ nécessite de la part de μ de communiquer avec tous les autres membres de l'équipe, et ceci se produit à chaque fois qu'une action est accomplie. Or, des contraintes sévères peuvent peser sur les communications, ce qui nécessite d'éliminer une partie des échanges d'informations par un mécanisme de comparaison entre coût (risque) de l'absence de communication et coût de la communication ;
- Dissolution de buts. Dans le cadre classique des intentions communes, si un individu μ abandonne l'intention $JPG(\Theta, p)$, cela implique la dissolution de $JPG(\Theta, p)$, ce qui implique que l'équipe abandonne l'intention d'accomplir la mission dès qu'un de ses membres est abattu. Au

²⁰⁰ M. Tambe (1996a). Teamwork in real-world, dynamic environments. In Proceedings of the international conference on multi-agents systems. ICMAS.

²⁰¹ M. Tambe (1997). Towards flexible teamwork. Journal of artificial intelligence research, 7:83–124.

²⁰² P. Cohen et H. Levesque (1991). Teamwork. Nous, 25(4):487–512.

²⁰³ H. Levesque, P. Cohen, et J. Nunes (1990). On acting together. In Proceedings of AAAI. Morgan Kaufmann Publishers, Inc.

lieu de cela, si l'agent μ disparaît, $JPG(\Theta, p)$ est dissout uniquement si μ avait un rôle critique dans l'accomplissement de $JPG(\Theta, p)$.

Pour mettre en œuvre le cadre modifié des intentions communes vu précédemment, un système fondé sur une hiérarchie d'opérateurs individuels et d'équipe a été développé. Ce principe de hiérarchie d'opérateurs est largement inspiré du modèle *SharedPlan*²⁰⁴. Qu'il soit relatif à l'équipe ou à un agent, un opérateur se décompose en trois parties:

- Des règles de sélection qui déterminent quand l'opérateur peut être sélectionné ;
- Des règles d'application (les opérateurs complexes produisent des sous-buts) ;
- Des règles de terminaison.

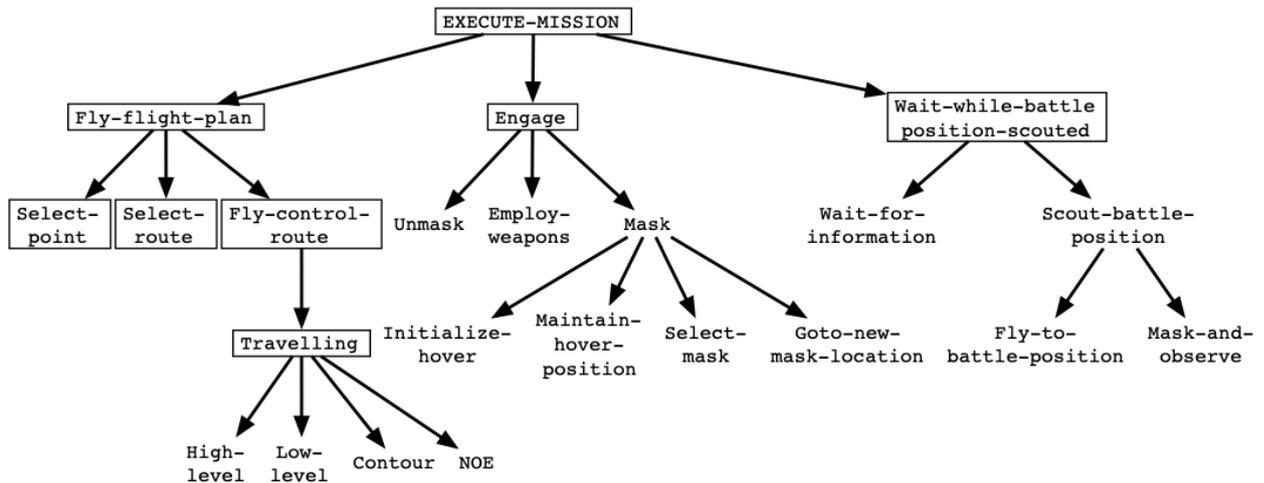


Figure 4 : une partie d'une hiérarchie des tâches de la mission « attaque » : depuis les tâches communes (encadrées) jusqu'aux tâches individuelles.

Un opérateur individuel, tel que *Mask*, représente l'activité d'un agent (dans le cadre de l'activité de l'équipe), tandis qu'un opérateur d'équipe tel que [*Engage*] exprime l'intention commune de l'équipe de mener à bien une action. Les opérateurs d'équipe sont liés à l'état de l'équipe, il s'agit de la représentation que se fait un agent de l'état et des croyances de l'équipe à un moment donné. Par exemple, l'état de l'équipe inclut le statut des membres de l'équipe ou encore la route à suivre pour atteindre la zone de combat. Les règles d'application d'un opérateur d'équipe peuvent générer des sous-buts liés à l'équipe ou à l'individu ; ainsi, [*Fly-flight-plan*] se décompose uniquement en opérateurs d'équipe (la navigation est typiquement une activité conjointe), tandis que [*Engage*] se décompose en activités individuelles *Mask*, *Unmask* ou *Employ-weapons*.

À un moment donné, tous les membres de l'équipe doivent avoir les mêmes opérateurs d'équipe, ce qui correspond à un ensemble de joint persistent goals. Ceci assure la cohérence de l'activité de l'équipe. Cette seule contrainte permet d'éviter les dysfonctionnements 2, 3 et 4 cités plus haut. Ainsi, quand le commandant détermine que la mission est accomplie, il forme comme weak goal de le faire savoir à toute l'équipe, ce qui permettra de dissoudre l'opérateur [*Engage*], ce qui permettra ensuite d'engager la procédure pour rentrer à la base. De la même manière, c'est l'équipe toute entière qui doit valider les points de navigation, et c'est l'équipe qui exécute [*Engage*].

Les membres de l'équipe doivent avoir les mêmes opérateurs d'équipe mais ont éventuellement des opérateurs individuels différents, notamment en fonction de leur rôle dans l'équipe. Un rôle peut être vu comme restreignant un agent ou une sous-équipe à un sous-ensemble d'opérateurs. En complément des rôles, un mécanisme permet de réaffecter dynamiquement les rôles, selon des règles prédéfinies et les compétences des agents. Ainsi, le rôle de commandant est réaffecté selon une hiérarchie stricte en cas de destruction de celui-ci, de même que le rôle d'éclaireur, selon les capacités des agents survivants. C'est ce mécanisme qui permet d'éviter le premier type de dysfonctionnement : si l'éclaireur s'écrase pendant [*Wait-while-battle position-scouted*] et qu'elle s'en aperçoit, l'équipe se

²⁰⁴ B. Grosz et S. Kraus (1996). Collaborative plans for complex group actions. *Artificial Intelligence*, 86:269–358.

rend compte que l'opérateur n'est plus réalisable car le rôle de l'éclaireur y est critique. L'opérateur est donc abandonné. Ensuite, constatant l'absence d'éclaireur, un des membres de l'équipe ayant les capacités nécessaires va assumer ce rôle. C'est alors que, les conditions étant à nouveau réunies, [wait-while-battle position-scouted] sera à nouveau sélectionné. En revanche, si aucun membre de l'équipe ne peut assumer le rôle d'éclaireur, l'attaque ne pourra pas être menée, ce qui provoquera le retour de l'équipe à la base. L'équipe est donc capable de mener à bien la mission, malgré la destruction de l'éclaireur, sans que l'on n'ait eu à spécifier une procédure à appliquer dans ce cas précis.

Afin de donner un ordre de grandeur, les agents du domaine « attaque », point de départ de notre réflexion, fonctionnent grâce à 1466 règles, dont 251 représentent le système STEAM proprement dit, les autres codant le plan de mission et diverses connaissances du domaine. Autre exemple, pour le domaine « escorte » (des hélicoptères de combat escortant des hélicoptères de transport de troupe), on trouve 1303 règles, dont les 251 de STEAM qui restent inchangées étant donné la relative proximité des deux domaines.

- DISCUSSION

TacAir-Soar/STEAM n'est bien sûr pas la seule architecture délibérative possible pour coordonner les plans de plusieurs agents dont les actions sont fortement interdépendantes. En revanche, toute autre approche générale devra passer par la modélisation de connaissances de certains agents par les autres (l'agent A croit que l'agent B pense être à l'étape 2, etc.) La littérature nous amène donc à considérer que les modèles issus de la philosophie de l'esprit sont les seuls à être mûrs actuellement, comme, par exemple, le cadre des intentions communes ou encore le modèle BDI (Belief-Desire-Intention). Elles ont également l'avantage d'être *explicables* : il est possible de retracer les décisions qui ont été prises par le ou les systèmes.

Les travaux existant sur l'utilisation de techniques de Deep Learning pour le travail d'équipe ne portent principalement que sur des domaines très restreints, comme certains jeux vidéo (par exemple Quake III Arena Capture the Flag²⁰⁵). Même dans ce type d'environnement simple et très structuré, ces approches nécessitent énormément de données, et surtout, ne sont pas *explicables*. Ces approches produisent des boîtes noires dont le comportement est presque impossible à anticiper face à une situation inédite.

SOBRIETE DANS LA COMMUNICATION

Les techniques de coordinations d'essaim sont, par nature, très gourmandes en information. Pour assurer un comportement rationnel de l'essaim, ses membres doivent partager et mettre à jour constamment des informations. Cela implique l'échange d'un nombre important de messages, ce qui présente deux inconvénients :

- Cela facilite la détection de l'essaim par l'adversaire ;
- Cela rend très efficace le brouillage, même imparfait, des communications, car cela va dégrader les performances du groupe.

On trouve dans la littérature deux approches pour réduire la dépendance des essaims envers les communications en spectre électromagnétique : la réduction du nombre de messages par des techniques probabilistes, et l'utilisation de l'observation de l'environnement pour communiquer.

- REDUCTION DU TRAFIC

Quelle que soit l'architecture de coordination qu'ils utilisent, les membres d'un essaim sont conçus pour fonctionner en groupe et peuvent donc disposer d'un modèle du fonctionnement de l'équipe. Un tel

²⁰⁵ Max Jaderberg, Wojciech M. Czarnecki, Iain Dunning, Luke Marris, Guy Lever, Antonio Garcia Castañeda, Charles Beattie, Neil C. Rabinowitz, Ari S. Morcos, Avraham Ruderman, Nicolas Sonnerat, Tim Green, Louise Deason, Joel Z. Leibo, David Silver, Demis Hassabis, Koray Kavukcuoglu, & Thore Graepel (2019). Human-level performance in 3D multiplayer games with population-based reinforcement learning. Science, 364(6443), 859-865.

modèle peut être utilisé par un agent pour estimer l'état actuel de la tâche de l'essaim (avancement dans les étapes de l'activité commune, statut des membres, etc.), en fonction des échanges entre agents jusqu'à l'instant T et des observations sur l'environnement. Un tel calcul est possible pour soi, mais également pour les autres : un agent peut être capable de calculer une estimation de l'état des connaissances des autres membres à un instant T.

S'il est en plus capable de calculer une probabilité que cette estimation soit juste, il est possible pour un agent qui devrait théoriquement émettre un message de coordination vers son équipe, de calculer un rapport coût bénéfice entre (1) émettre le message et risquer d'être détecté ; et (2) ne pas l'émettre et risquer de mettre en cause le bon fonctionnement du collectif.

Une telle approche a été mise en œuvre par des chercheurs américains avec SAM (Socially-Attentive Monitoring)²⁰⁶, puis par une série de travaux inspirés de l'écoute flottante²⁰⁷. Des réductions très importantes de trafic ont pu être obtenues en réduisant, notamment, les messages de routine.

- COMMUNICATION VIA L'ENVIRONNEMENT

Dans l'immense majorité des cas, la coordination se fera via l'usage d'un ou plusieurs modes de communication dédiés (typiquement radiofréquence). Toutefois, l'usage de communications implicites via l'environnement ne doit pas tout à fait être négligé. Si l'on reprend l'exemple de la paire de drones tireur/illuminateur, utilisé plus haut, on peut imaginer se passer de communication explicite de la part de l'illuminateur pour indiquer que la cible est prête à être attaquée, si le tireur est capable de détecter la tache de désignation laser par lui-même. Si le tireur perçoit une tache laser, il peut considérer que l'illuminateur a accompli sa tâche et tire.

De manière générale, si les actions des agents ont un effet dans l'environnement, perceptible par les autres agents, ou si les agents peuvent, par exemple, percevoir leurs positions respectives, un essaim peut être capable de se coordonner sans communication explicite. On parle alors de communication implicite, ou via l'environnement, par observation.

SUPERVISER UN ESSAIM

Nous avons vu qu'il est possible de concevoir des essaims d'agents capables de coordonner leurs actions pour atteindre des objectifs donnés de manière quasiment autonomes. Ceci peut se faire en utilisant deux grandes familles d'approches décrites plus haut : coordination réactive et travail d'équipe.

Si l'on met de côté les systèmes d'essaims de type « tire et oublie », ces essaims doivent rester sous la responsabilité d'un ou plusieurs opérateurs humains, mais leur capacité à s'autodéterminer fait que l'on ne peut pas parler strictement de pilotage ou de contrôle. Les notions développées dans la (riche) littérature scientifique existant à ce sujet sont : le partage d'autorité²⁰⁸, l'initiative mixte, man-unmanned teaming, le contrôle supervisé ou encore la délégation. Nous retiendrons ici le terme de *supervision*. L'enjeu de la supervision d'essaim de drones est double :

- La compréhension des algorithmes d'IA individuels ou en essaim est, par essence, peu naturelle pour l'Homme et peut facilement aboutir à des contre-sens générant des commandes contre-productives pour la tâche et donc pour la mission ;
- Le nombre important d'agents composant un essaim rend difficile la supervision individuelle des agents. C'est donc l'essaim en tant qu'entité qui doit être supervisé ;

Il est donc nécessaire de mettre en place des moyens d'interaction Homme-Système adaptés, non seulement au fonctionnement interne du système technique, mais surtout aux capacités cognitives des opérateurs humains chargés de les superviser.

²⁰⁶ G. Kaminka et M. Tambe (1998). What is wrong with us? Improving robustness through social diagnosis. In Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence. AAAI.

²⁰⁷ G. Kaminka, D. Pynadath, et M. Tambe (2002). Monitoring teams by overhearing: a multi-agent plan-recognition approach. *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)*, 17:83-135.

²⁰⁸ Voir par exemple, le PEA « Étude des Facteurs Humains (FH) et partage d'autorité Homme/Système dans les systèmes de drones » 2008-2011.

Les approches applicables pour l'interaction entre humain et systèmes multi-agents peuvent actuellement se classer comme suit :

- A. Approches réactive : les agents sont dotés de comportements élémentaires (suivre une cible, se rendre à un point donné, patrouiller, etc.) La tâche de l'opérateur est alors d'assigner à chaque agent un comportement et de superviser le déroulement de la tâche, changeant les comportements individuels au fur et à mesure de l'activité du système²⁰⁹ ;
- B. Contrôle par politique : il s'ajoute au mode de contrôle par comportement (A) en guidant ou restreignant l'espace des solutions. On peut assimiler une politique à une contrainte qui va restreindre et guider les décisions du système²¹⁰ ;
- C. Approches par délégation et dialogue : le superviseur humain interagit avec le système pour lui confier dynamiquement certaines décisions et en garder d'autres.
- D. Approches de type "centre d'appel" : situées à un autre extrême, elles mettent le ou les opérateurs au service du système de vecteurs. Les opérateurs sont sollicités lorsque les automates atteignent un état qui nécessite une intervention humaine (par exemple une validation de tir)²¹¹.

Quoi qu'il en soit, les approches A et D nous semblent vouées à l'échec dès que l'on dépasse quelques unités car on dépasse les capacités cognitives humaines en termes de charge mentale, de conscience de la situation ou de changement de tâche²¹².

- SUPERVISION D'ESSAIM REACTIF

L'immense majorité des travaux reste en laboratoire avec, bien souvent, des démonstrations appliquées sur des cas d'école, sans véritable cas d'usage opérationnel. Citons pour mémoire, et parmi beaucoup d'autres, le projet français SUSIE²¹³, qui permettait (uniquement en simulation) le contrôle de plusieurs dizaines de drones via une interface tactile intuitive pour des tâches de surveillance et d'identification.

Le principe général de contrôle envisagé pour ce type d'essaims est d'utiliser des objets ou concepts tiers qui permettent d'agir de manière *indirecte* sur l'essaim. L'essaim a un comportement largement autonome et des représentations internes qui font que l'opérateur humain a un effet négatif s'il tente d'ajuster des comportements individuels. En revanche, l'essaim tient compte de certains éléments pour fonctionner, comme par exemples :

- Opérer à l'intérieur de limites géographiques ;
- Etre attiré par certains points, lignes ou zones ;
- Etre repoussé par certains points, lignes ou zones ;
- Suivre un ou plusieurs leaders ;
- Partager et modifier des champs de valeurs numériques à des fins de répartition de tâches de traitement de zones.

L'opérateur humain peut alors modifier directement ces informations pour influencer sur le comportement de l'essaim. La difficulté réside :

²⁰⁹ Cette approche fait penser à une expérimentation américaine de décembre 2015, lorsque des AV-8B, deux UTAP-22 réels et un autre virtuel, ont volé de concert en « continuous collaborative airborne collaboration ». L'annexe II évoque ce sujet et un extrait d'IHM y illustre la supervision par affectation de comportements élémentaires successifs aux drones.

²¹⁰ Cette approche fait penser, pour partie, à celle de CODE (Collaborative Operations in Denied Environment) dans sa gestion dynamique des trajectoires d'évitement, face aux menaces émergentes. L'annexe II évoque ce sujet

²¹¹ Cette approche fait penser aux échanges entre opérateurs et agents lors des expérimentations de l'US Army en 2015, pour superviser simultanément trois drones en vol (RQ-7, MQ-1C et MQ-8), notamment à travers une séquence d'engagement.

²¹² En anglais : *Mental Workload, Situation Awareness, Task Switching*.

²¹³ Supervision de Système d'Intelligence en Essaim. Contrat de recherche DGA N° 2009.34.0003, réalisation dans laquelle François Legras a été fortement impliqué, depuis la rédaction de la proposition jusqu'à la réalisation du démonstrateur, en passant par la modélisation des interactions.

- D'une part dans la conception d'IHM de C2 pour manipuler ces informations. Il s'agit ici d'imaginer des objets informationnels nouveaux (placer des sortes de balises virtuelles qui vont attirer les drones plutôt que de tracer un plan de vol, par exemple) ; les concepteurs doivent bien souvent partir de zéro plutôt que de pouvoir capitaliser sur des systèmes existants ;
- Et d'autre part dans la capacité des opérateurs à déterminer quelle action va permettre d'obtenir l'effet désiré ; ces systèmes multi-agents réactifs ont en effet des comportements fortement imprévisibles, non linéaires, etc : pour continuer notre exemple : combien de balises faut-il placer et avec quels paramètres pour obtenir un certain effet ? Cela nécessite un long apprentissage, nécessairement fondé sur de la simulation pour se confronter à différents cas de figure.

- PLAYBOOK

Seuls les Etats-Unis, semblent avoir poussé les recherches sur la voie de la délégation en s'appuyant sur les travaux tels que STEAM décrit plus haut. Le terme Playbook correspond aux tactiques pré-définies par les entraîneurs sportifs pour leurs équipes. De nombreux travaux ont été soutenus par la DARPA pour appliquer la métaphore du Playbook au domaine du contrôle d'équipes de drones, en élaborant des bibliothèques de plans d'équipe hiérarchiques, semblables à ceux développés dans STEAM, mais en y ajoutant la notion de délégation.

Le principe général de l'approche Playbook est de permettre à un acteur d'un système (le superviseur) de décider de manière granulaire de la délégation d'une tâche à un autre acteur (le subordonné). Ainsi, dans l'exemple ci-dessous, tiré d'une publication de SIFT²¹⁴, le superviseur peut choisir de déléguer entièrement la tâche Overfly, ou bien d'avoir une approche plus fine et déléguer toutes les sous-tâches *sauf* Photograph Target (par exemple, car il la juge plus critique).

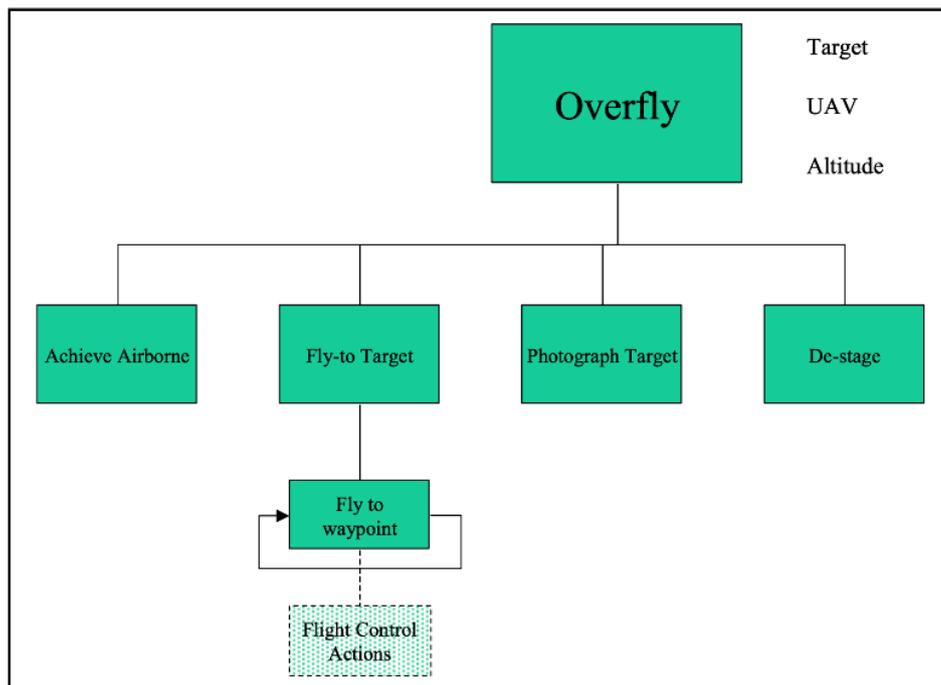


Figure 5 : décomposition simplifiée de la tâche "Overfly" (survol).

Au-delà de la simple délégation binaire (je fais/tu fais), les travaux de SIFT vont jusqu'à recommander de permettre d'appliquer un spectre de niveau de délégation d'autorité à différents niveaux du plan d'équipe hiérarchique. L'extrait ci-dessous du rapport technique²¹⁵ SIFT de 2004 l'illustre :

²¹⁴ Smart Information Flow Technologies (entreprise).

²¹⁵ Dr. Christopher A. Miller Dr. Robert P. Goldman Mr. Harry B. Funk. Delegation in LoA3 Space. SIFT Technical Report 05-TUSC-01

1. *Full*—The supervisor delegates full authority to the subordinate to decide how the task should be executed. The subordinate is charged to 'make it so' and is not required to have any further coordination, permissions or even information exchange with the supervisor.
2. *Inform*—the supervisor delegates full authority to the subordinate as above, but the subordinate is required to inform the supervisor of the decisions and execution actions taken. The supervisor retains no ability to override or approve those steps, [...]
3. *Override*—the supervisor delegates the task, but expects information (as above), and additionally retains the right to step in and override any or all of the subordinate's plan. [...]
4. *Approval*—the supervisor delegates decision/planning authority about how to accomplish the delegated task, but retains the right to explicitly approve actions before they are taken. The subordinate must submit the plan (or, perhaps, multiple plans) to the supervisor and cannot proceed until one of them has been approved for execution by the automation.
5. *Recommend*—the supervisor partially delegates planning authority alone; s/he retains execution authority. In other words, the supervisor authorizes the subordinate to recommend courses of action, but the supervisor will still make the final decision about which course to execute and who will do the executing. Recommend authority differs from Approval authority primarily in that the automation is doing the executing, after approval, in the latter case, while either the human or the automation (according to the human's choice) may do the execution in Recommend.
6. *Monitor*—the supervisor retains all decision and execution authority, but authorizes the subordinate to maintain awareness and to offer recommendations or critiques. In Monitor authority, the automation does not begin by providing a recommended plan; instead, the human supervisor begins planning and execution activities and the automation operates only by recognizing and offering critiques or improvement suggestions.
7. *None*—the supervisor delegates no authority for how to plan or execute the task. The task is not delegated. "None" delegation is the null or degenerate case and is included only for completeness. In practice, saying that one delegates with "No" or "None" authority is equivalent to not delegating.

Notons qu'en 2004, lorsque les auteurs utilisent les termes "supervisor" et "subordinate", ils précisent que l'Homme et l'automate peuvent jouer l'un ou l'autre rôle.

Ces travaux sont très ambitieux et sont allés jusqu'à des expérimentations assez prometteuses en simulation. L'approche *Playbook* semble avoir été choisie par les Etats-Unis (en tout cas au niveau de l'Air Force, pour la supervision de l'autonomie des drones, qu'ils soient en essaim ou non). Toutefois, si l'on étudie l'état d'avancement actuel de ces technologies, on constate que les ambitions sont très réduites en ce qui concerne la finesse du niveau de supervision des opérations en phase d'exécution.

Des travaux récents montrent, par exemple, une utilisation de *Playbook* pour la planification de tâches. L'opérateur peut ainsi déléguer à un automate la planification de certains segments d'une tâche complexe et se réserver la planification « à la main » des parties les plus délicates. Ces opérations semblent être assez mûres et pouvoir fournir une aide substantielle à l'opérateur en phase de planification. En revanche, ce que l'on peut voir des systèmes de *Playbook* en TRL haut (par exemple *Golden Horde*), nous laissent penser qu'une fois paramétré et déployé avec un plan d'équipe, l'essaim est largement autonome dans l'exécution (tout en restant bien sûr dans le cadre de ses paramètres). Les niveaux de supervision correspondant sont 1-2 (voir plus haut).

Nous voyons plusieurs explications possibles (et non exclusives) à cette limitation aux seuls niveaux haut de délégation d'autorité :

- Les technologies d'IA réactive individuelles et de coordination sont considérées comme suffisamment robustes pour les tâches confiées aux systèmes de drones ;
- Les travaux du domaine de l'interface Homme-machine nécessaires à la mise en place du dialogue Homme-système qui correspond aux niveaux 3-6 ne sont pas suffisamment avancés. Par exemple, les systèmes de préparation de missions sont principalement fondés sur des menus déroulant ou des commandes vocales très simples ;
- La transition vers la perspective de conflits de haute intensité fait que l'accent est mis sur des solutions simples et efficaces plutôt que sur des solutions plus fines et coûteuses (en temps de réaction, ressources humaines ou budget). Il est clair que les niveaux 3-6 impliquent lourdement

l'Homme dans la boucle OODA du système et la ralentissent, alors que l'objectif est justement d'aller plus vite que l'adversaire.

- SUPERVISION ET DELEGATION : DISCUSSION

Si on laisse de côté les systèmes d'essaim scriptés ou téléopérés, qui demeureront, un essaim est nécessairement doté de capacités d'autonomie pour accomplir sa tâche dans un environnement incertain et dans un contexte d'accès limité aux ressources humaines de contrôle.

L'opérateur humain d'un tel système va donc déléguer la réalisation d'une ou plusieurs tâches à l'essaim pour accomplir la mission qui lui a été confiée, puis superviser son action. Délégation et supervision se font par l'intermédiaire de représentations partagées entre l'humain et le système. De manière générale, la délégation passera par la définition d'objectifs à atteindre, de modes d'action et de contraintes à respecter pendant l'action. Les approches utilisées pour concevoir l'architecture de coordination d'un essaim (sur le spectre réactif - délibératif) vont déterminer la forme de ces représentations et la facilité à les appréhender.

EVOLUTIONS 2025 A 2030

Au vu des temps de maturation d'une technologie avant sa mise en service, d'ici à 2030 il est raisonnable de penser qu'il n'y aura pas de révolution technologique dans la mise en œuvre des essaims de drones.

En ce qui concerne les capacités d'autonomie individuelles des drones, il est certain que l'augmentation des capacités de calcul embarqué et l'amélioration des algorithmes d'apprentissage vont permettre de nouvelles capacités, principalement fondées sur la vision artificielle : navigation sans GNSS, identification automatique d'objet, etc. Il est, par exemple, probable que des organisations ou des états aux moyens limités puissent être en mesure de mettre en œuvre des essaims de drones légers capable d'identifier visuellement des cibles et de les frapper. Toutefois, n'oublions pas que travailler en extérieur dans un environnement non-structuré reste extrêmement difficile, preuve en est l'incapacité de l'industrie à produire des véhicules véritablement autonomes depuis plus de dix ans malgré les promesses répétées.

Des gains sur les capacités des vecteurs sont également à attendre (endurance, vitesse, peut-être manœuvrabilité) sans que cela révolutionne le concept.

Il est probable que les Etats-Unis soient en mesure de rendre opérationnels des systèmes d'essaims collaborant autonomes d'ici 2025. Par exemple, les démonstrations de munitions de Golden Horde sont très mûres. L'amélioration des capacités individuelles des drones, évoquée plus haut, s'accompagnera naturellement de comportements coordonnés plus avancés. Toutefois, le reste du monde étant à la traîne sur les aspects coordination, le mieux que l'on puisse attendre à l'horizon 2030 restera probablement sous la forme de coordination réactive, décrite plus haut, fondée sur de la découpe de tâche en lots individuels avec peu d'interaction entre drones. Ceci ne préjugeant pas de l'efficacité de tels systèmes sur des tâches simples.

La question est moins claire en ce qui concerne l'interaction Homme-système : même si ce n'est pas facile, il est toujours possible de construire une interface homme-machine ad-hoc pour superviser un système donné, s'il est fondé sur la coordination réactive. En revanche, la marche technologique est très haute pour concevoir les IHM pour des systèmes travaillant en équipe, comme le Playbook aux US. Sur ces aspects, les travaux US sur des interactions Homme-système, relativement riches, se sont largement limités aux phases de préparation de mission (gain de temps pour les opérateurs en utilisant le système de façon interactive pour paramétrer une partie des tâches). Pendant les phases d'exécution de tâches, les IHM sont bien plus simples car :

- Trop d'interventions humaines pendant l'action peut dégrader les performances ;
- L'opérateur humain est bien souvent sous contrainte (par exemple dans un cockpit) : il n'est pas certain qu'ils atteignent la maturité technologique pour enrichir la relation de supervision en mission d'ici 2030, ni même que cela fasse réellement partie de leurs objectifs si le niveau de supervision déjà atteint est suffisant.

ANNEXE II

PRINCIPALES REALISATIONS AUX ETATS-UNIS

PREMIERES IOC

- Manned-Unmanned Teaming eXpanded (MUMT-X)
- Organic Precision Fire (Mounted) (OPF(M))

PROGRAMMES EN GESTATION

- ALTIUS 600 et Air Launch Effects (ALEs)
- MQ-25 Stingray
- Netted Emulation of Multi-Element Signature against Integrated Sensors (NEMESIS)

EXPERIMENTATIONS

- Close In Covert Autonomous Disposable Aircraft (CICADA)
- Perdix
- DASH-X Remedy
- Low-Cost Unmanned aerial vehicule Swarming Technology (LOCUST)
- V-BAT
- Collaborative Operations in Denied Environment (CODE)
- Golden Horde
- Carrera Speed Racer
- Gremlins
- Sparrowhawk
- LongShot
- Unmanned Tactical Aerial Platform (UTAP)
- Low Cost Attritable Strike Demonstrator (LCASD)
- Skyborg, Autonomous Attritable Aircraft Experiment
- Have Raider
- Air Combat Evolution (ACE)

MUMT-X et SCORCH

MUMT-X (Manned-Unmanned Teaming eXpanded) : système en service qui permet l'exploitation de plusieurs RPAS²¹⁶ par un hélicoptère AH-64E V6 Apache. Evolution de MUMT, MUMT-X permet un contrôle des RQ-7 et MQ-1C qui ont repris la mission des OH-58 Kiowa, retirés du service.

SCORCH (Supervisory Controller for Optimal Role Allocation for Cueing of Human Operators) : permet à l'équipage de l'AH-64 d'exploiter simultanément 3 RPAS, déjà en vol, au moyen du MUMT. C'est une logique de fonctionnement en essaim de RPAS non modifiés : le MUMT adresse des signaux de télé-opération à des drones qui ne sont pas autonomes.

Dates : 2004 - (MUMT et X) 2013 - 2018 (SCORCH)

Acteurs : L3Harris (DataLink), BAE Systems (MUMT-X), U.S. Army Research, Development and Engineering Command, Institute for Collaborative Biotechnologies, United Technologies Research Center (SCORCH).

Porteurs potentiels : Aéronefs pour ISTAR²¹⁷.

PERFORMANCES DES VECTEURS :

Vecteurs : RQ7-Shadow (Textron Systems Corp) (1991) and Gray Eagle MQ-1C (MALE de General Atomics) (2004).

Lancement depuis catapulte (RQ-7) ou piste (MQ-1) (Automatic take-off & landing system (ATLS) (MQ-1) (Tactical Automatic Landing System) (RQ-7)

Poids : 1632 Kg (MQ-1) 170Kg (RQ-7)

Longueur : 3,41 (RQ-7) Envergure : 3,87 (RQ-7)
Longueur : 8 m (MQ-1) Envergure : 17 m (MQ-1)

Propulsion thermique

Vitesse max : 170 Nds (MQ-1) 110 Nds (RQ-7)

Autonomie : 27 h (MQ-1) 6 à 9 h (RQ-7)

Rayon d'action : ~2500 Nq (MQ-1) 60 Nq (RQ-7)

Plafond : 29 000 ft (MQ-1) 15 000 ft (RQ-7)

Armement : 4 4 AGM-114, 4 GBU-44 B (MQ-1)

Communications : Common Data Link (L-3Harris) (air- to-air-to-ground (AAG-X) kit sur l'AH-64)



²¹⁶ Remotely Piloted Aircraft System.

²¹⁷ Intelligence, Surveillance, Target Acquisition, and Reconnaissance.

²¹⁸ D'autant que M. Miller, père des Playbooks, a été impliqué dès 1999 dans les travaux précurseurs « Rotorcraft Pilot's Associate ». Autre expérimentation connexe, celle du logiciel Playbook® en environnement représentatif par l'US Army en 2015 et portant sur la supervision simultanée de trois drones déjà en vol (RQ-7, MQ-1C et MQ-8) pour évaluer le gain en réduction de la charge mentale.



PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

SCORCH vise au contrôle simultané de 3 UAV semi-autonomes par un unique opérateur sans augmentation de sa charge mentale : il délègue des macro-tâches en conservant les décisions critiques.

MUMT-X permet à l'équipage de prendre le contrôle de l'UAV, de ses senseurs et de ses armes. L'UAV optimise sa cinématique pour faciliter l'emploi de ses senseurs. Le dernier niveau d'intégration permettrait de prendre en compte le lancement et la récupération de l'UAV. Il n'est pas certain que MUM-X intègre cette capacité ni ne soit apte au contrôle simultané de trois UAV semi-autonome ; mais on peut fortement le soupçonner²¹⁸.

MUMT, la version précédente, a été utilisée au combat en Afghanistan et au Levant. Il a permis des triangulations à 3 drones, des éclairages sur l'avant pour préserver le potentiel de l'hélicoptère en localisant des cibles rapides à 50 km. 8 heures de simulateur et 4 d'entraînement en conditions réelles suffiraient à qualifier un équipage



OPF (M) (Organic Precision Fire (Mounted))

OPF (M) est un programme de l'USMC destiné à acquérir des munitions rodeuses, susceptibles de travailler en essaim.

Dates : 2019 - 2021

Acteurs : Mistral Inc (USA), UVision Ltd (Israël)

Porteurs potentiels : LRUSV (Metal Shark), véhicules.

Cas d'usage affichés : Munition rodeuse.



PERFORMANCES DES VECTEURS :

Vecteur : Hero120 (munition rodeuse) (2012).

Lancement depuis un lanceur multitubes.

Non récupérable

Poids : 12,5 Kg dont charge explosive : 4,5 Kg

Longueur : 1,5 m

Propulsion électrique

Vitesse : 65 Nds (max)

Autonomie : 1 h

Rayon d'action : ~30 Nq

Plafond : 10 000 ft

Guidage : Electro-optique et IR

Communications : data link

PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

Les munitions seraient capables d'opérer en essaim antinavire pour effectuer des frappes de type « mission kill » afin de désemperer des systèmes ou locaux essentiels à la mission du navire visé.

Le fonctionnement en essaim ferait partie des spécifications. Il figurerait également dans celles du programme d'acquisition de l'Organic Precision Fire (Infantry) (OPF(I)).



Gamme ALTIUS et Air Launched Effects (ALE)

ALTIUS (Agile Launch Tactically Integrated Unmanned System) est une famille qui comprend les ALTIUS-500²¹⁹ (« A size »), 600²²⁰, 700 et 900. ALTIUS-600 et 700, préfigurent l'entrée de gamme d'ALE et servent de vecteur d'essai.

Air Launched Effects (ALE) combine des vecteurs consommables en essaim pour une large gamme d'effets (« detect, identify, locate, report (DILR) and deliver lethal and non-lethal effects ») et vise un déploiement dès 2023 (AH-64 et MQ-1C) puis l'intégration sur le Future Attack Reconnaissance Aircraft (FARA)²²¹.

Dates : 2011 - (ALTIUS-600) ; 2020 – (ALEs)

Acteurs : US Army, Anduril et diverses entreprises en compétition pour chaque volet d'ALEs : « air vehicle, mission systems, and payloads ».

Porteurs potentiels : Aéronefs, bâtiments, véhicules

Cas d'usage : « stand-in » pour ISR, GE, frappe, munition rodeuse ou non, SEAD, LADA²²²



PERFORMANCES DES VECTEURS D'ESSAI :

Vecteurs : ALTIUS-600 (Anduril) (2011).

Lancement à moins de 100 fts par tube ϕ 7 pouces longueur 4 pieds (Common Launch Tube (CLT)²²³ ou Pneumatically Integrated Launch System (PILS d'Anduril). Peut être récupéré après atterrissage sur le ventre. Des tests de récupération en vol par Flying Air Recovery System (FLARES) ont été effectués²²⁴.

Poids : 12,2 Kg dont charge utile modulaire : 2,7 Kg

Longueur : 1,01 m Envergure : 2,54 m

Vitesse max : 90 Nds croisière : 60 Nds

Autonomie : 4 h Rayon d'action : ~240 Nq

Traitement et filtrage embarqué des données.

A été mis en œuvre depuis C-130A, AC-130J, UH-60, P-3, MQ-1C, XQ-58A. Intégrable à de nombreux C2. Communication en réseau mesh (61 km annoncés)

Trois ordinateurs embarqués dont un pour le contrôle de vol et un autre, ouvert aux tiers, pour l'autonomie et l'interfaçage.

PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

Le fabricant parle de "Multi-Vehicle Teaming Enabled" et d'"Advanced Teaming Capabilities". La gamme ALTIUS est proposée avec le Resource Allocation for Multi-Agent Planning (ReMAP) d'Anduril qui permet d'allouer des tâches complexes aux vecteurs qui sélectionnent alors leurs comportements et génèrent leurs cinématiques en tenant compte des zones et autres mobiles à éviter.

Quatre vecteurs auraient été mis en œuvre en essaim grâce à ce système depuis un MH-60. La NOAA l'aurait également employé depuis un P3.

Pour ALE, Collins Aerospace, candidat pour réaliser le « mission system » parle de 8 vecteurs en essaim.



²¹⁹ Envisagé par l'US Navy pour mettre en œuvre un capteur MAD depuis un P8.

²²⁰ Le SOCOM a acquis cet été pour 30 mio\$ d'ALTIUS-600, probablement la version M qui est une munition rodeuse.

²²¹ Deux types, lancés par tube et aptes à une mise en œuvre en essaim sont spécifiés (80-100 kg, plus de 350, voire 600 nds, 30-60 mn à 190-300 Nq pour l'un ; 22-45 Kg, plus de 120 voire 205 nds, 30-60 mn à 50-80 km et CU DLIR passive uniquement pour l'autre).

²²² MoRFIUS (Mobile Radio Frequency-Integrated UAS Suppressor), HPM développé par Lockheed Martin et intégré à l'ALTIUS-600.

²²³ Le Common Launch Tube permet, par exemple, de mettre en œuvre des missiles AGM-176 Griffin, des GBU-44/B Viper Strike ou des GBU-69/B Small Glide Munitions. Ce type de tube a aussi servi à mettre en œuvre des drones type Coyote.

²²⁴ Il s'agit d'un UAV Quadcopter auquel est fixé un câble de recueil destiné à offrir une prise aux crochets de bout d'aile du drone.

MQ-25 STINGRAY

Le MQ-25 fait l'objet du programme UCASS (Unmanned Carrier Aviation Air System) en continuité des programmes CBARS (Carrier-Based Air Refueling System), UCLASS (Unmanned Carrier-Launched Surveillance and Strike) et J-UCAS (Joint Unmanned Combat Air Systems). Il est en « low-rate initial production » avec une perspective d'acquisition de 72 exemplaires. 7 prototypes ou préséries existent déjà. L'IOC est prévue pour 2025 avant le déploiement de longue durée d'un détachement de MQ-25 à bord d'un porte-avions en 2026.

Dates : 2002 - .

Acteurs : NAVAIR, Boeing et sa filiale Aurora Flight Sciences.

Porteurs potentiels : Porte-avions.

Cas d'usage affichés : Ravitailleur en vol, ISR et relais de communication en tâches secondaires ; des tâches de frappe sont en perspective. En fait, le MQ-25 ouvre la voie au Collaborative Combat Aircraft (CCA) et à l'objectif affiché d'un groupe aérien embarqué robotisé à 60% à l'horizon 2045.



PERFORMANCES DES VECTEURS :

Récupérable automatiquement par appontage, y compris, à terme, en silence radio.

Longueur : 15,54 m, envergure : 22,86 m (9,44 m replié), plafond 39 000 ft, vitesse max > 600 nds, rayon d'action ~ 2200 Nq

Tâche dimensionnante : délivrer en vol environ 6 tonnes de carburéacteur à plus de 500 Nq de son porteur. La mission type est de ravitailler 8 F/A-18 par 4 MQ-25 pour doubler leur rayon d'action. Le MQ-25 emporte la nacelle de ravitaillement utilisée par le F/A-18 en mission de ravitailleur. Il n'y aura aucune amélioration du débit de carburant délivré.

Contrôle : le MQ-25 est supervisé par le « Common Control System » (MD-5 Ground Control Station de Lockheed Martin), commun aux UAS de l'US Navy. Depuis le bord, il est contrôlé depuis le Unmanned Aviation Center (UAWC). Il pourra être supervisé depuis des E-2, P-8 et F/A-18 à travers un système MUM-T²²⁵. Les échanges exploitent les liaisons de données tactiques et le projet « Black Ice crew vehicle interface » de Boeing. L'architecture de contrôle du MQ-25 est ouverte aux tiers car conforme à l'Open Mission System specification.

PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

Affectés aux Unmanned Carrier-Launched Multi-Role Squadrons (VUQ), les MQ-25 seront détachés par groupe de 5 au sein des flottilles embarquées d'E-2.

Le MQ-25 est mentionné comme un système autonome et non comme un RPAS²²⁶. Les tâches du MQ-25 imposent de fait la mise en œuvre de dispositifs aériens reposant sur du « Man-Unmanned Teaming ».

Des essais virtuels de contrôle en vol depuis E-2, P8 et F/A-18 ont fait l'objet de communiqués. Il s'agirait d'essaims de 4 drones. Si la mise en œuvre depuis un E-2 ou un P8 s'inscrit dans la perspective de leur emploi de ravitailleur, l'expérimentation à partir d'un F/A-18 ne fait pas mystère de sa finalité offensive : les drones y sont décrits comme susceptibles de constituer la ligne offensive du chasseur embarqué.

La tâche ISR reposerait sur un haut niveau d'autonomie : la description de la zone de recherche et des zones d'interdiction de vol suffiraient à attribuer la tâche.

²²⁵ Man-Unmanned Teaming.

²²⁶ Remotely Piloted Aircraft System.

NEMESIS/NOMAD

Le programme “Netted Emulation of Multi-Element Signature against Integrated Sensors” comprend des “Distributed Decoy and Jammer Swarms (DDJS)” associés de manière cohérente à des “effective acoustic countermeasures”, et des “Multiple Input/Multiple Output Sensor/Couter measures” (MIMO S/CM)”. NEMESIS est un “Innovative Naval Prototypes program”.

NEMESIS forme un ensemble cohérent de systèmes de guerre électronique en réseau qui exploite en particulier des essais persistants de leurres et de brouilleurs en charges utiles de drones aériens. Seuls les essais de « Netted Offboard Miniature Active Decoys » (NOMAD), possibles précurseurs des « DDJS », sont décrits ici (LOCUST, décrit par ailleurs, est un autre candidat à la fonction).

Dates : 2014 -

Acteurs : Pour NOMAD : ONR, NRL (vecteur) BAE Systems (charge EM), Raytheon (charge IR).

Porteurs potentiels : Bâtiments et aéronefs pour la partie essaim (voire ballons en haute altitude (60 000 à 120 000 ft) et sous-marins).

Cas d’usage affichés : Participation au leurrage de zone multi-milieux, leurrage des missiles hypervéloces.

PERFORMANCES DES VECTEURS :

Vecteur : vecteur expérimental NOMAD (Netted Offboard Miniature Active Decoy)²²⁷ du NRL.

Lancement : éjection par cartouche de CO₂ d’un tube diamètre 15,24 mm (6 pouces) et de longueur 121,92 cm (4 pieds). Lancements multiples en séquence rapide.

Récupérable ou pas.

Structure de coûts : « bas coût »

Longueur : 91,44 cm²²⁸ Diamètre : 1,80 m

Autonomie : au moins une heure.

La conception offre une meilleure résistance au vent.

²²⁷ Le NOMAD fait l’objet d’un brevet US20180281939 d’octobre 2018 déposé par l’US Navy.

²²⁸ Préfigure éventuellement des vecteurs compatibles de la taille « A » OTAN : 91,44 cm de long (3 pieds), 12,38 cm de diamètre (4,875 pouces). (Bouées acoustiques).



PERFORMANCES DE L’ESSAIM :

La documentation accessible mentionne que l’essaim dispose d’un “traitement cognitif” pour une action coordonnée en réseau. Les vecteurs de l’essaim échangent des données en temps réel, se positionnent et évoluent de façon coordonnée. Ils agissent de manière « semi-autonome » pour cibler senseurs ou réseaux adverses, les leurrer et les brouiller. L’approche est connexe de la GE cognitive.



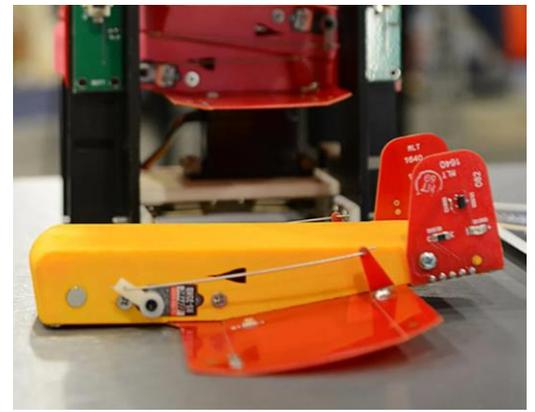
CICADA (Close-in Covert Autonomous Disposable Aircraft)

Dates : 2006 – 2019

Acteurs : Naval Research Laboratory, Office of Naval Research, Zepher et Platform Aerospace (vecteur)

Porteurs potentiels : Aéronefs, ballons, munitions de précision (mise en œuvre par canon évoquée pour un modèle spécialement conçu).

Cas d'usage affichés : METOC, NRBC, SIGINT à terre, saturation.



PERFORMANCES DES VECTEURS :

Vecteur : CICADA (2006-2017)

Lancement par tube, taille « A²²⁹ » ou « G », d'un conteneur cylindrique freiné par parachute avant libération des drones. Chaque vecteur rallie une position préprogrammée pour y orbiter avant de descendre (1000 ft/mn) se poser (précision < 15ft) et établir la communication avec la plate-forme de supervision. Lancement par mini-drones également réalisé (par la NASA en particulier).

Altitude maximale de largage : ~57 000 ft

Non récupérable.

Structure de coûts : 1000\$ (proto), 250 \$ (série). Un circuit imprimé et des pièces imprimées en 3D.

Poids : 65g (mk5), dont des MEMS (pour mesure des taux d'humidité, de la température et de la pression, et de la vitesse du vent vertical) et un modem de téléphone cellulaire.

Longueur : <12 cm Envergure : <12cm

Livré en conteneur taille « A » (32 vecteurs mk5) ou Taille « G » (10 vecteurs mk5).

Propulsion : aucune (planneur).

Rayon d'action : 40 Nq (mk5 au max, finesse de 3,5)²³⁰

Autopilote : proto NRL, navigation GPS

Communication : réseau téléphone (SMS), radio en réseau maillé auto-configurable (antenne intégrée dans l'aile). Emission jusqu'à épuisement de la batterie pour une portée de moins de 1500 m).

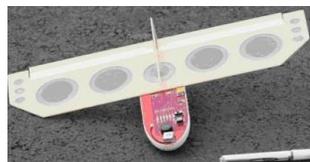
PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

Lancements de 100 puis 1000 agents réalisés.

CICADA constitue un exemple d'essaim scripté, préprogrammé, où les capteurs sont en réseau. Aucune véritable autonomie n'est décrite dans la documentation accessible. C'est un automate multi-agents programmable.



mk2



mk3



mk4



mk5



gun-launched

²²⁹ Taille « A » OTAN : 91,44 cm de long (3 pieds), 12,38 cm de diamètre (4,875 pouces). (Bouées acoustiques). La Taille « G » est une demi-taille A.

²³⁰ Exemple : largage à haute altitude ; dérive de 9,5 NQ pour une orbite à 18 000 ft avant descente.

PERDIX

Dates : 2013 – 2017

Acteurs : Strategic Capabilities Office, Naval Air Systems Command, Defence Innovation Unit, US Navy, US Air Force.
Massachusetts Institute of Technology (Lincoln Labs) pour le vecteur.

Porteurs potentiels : Aéronefs, missiles

Cas d'usage affichés : Brouillage, leurrage, anti-personnels, ISR, METOC.



PERFORMANCES DES VECTEURS :

Vecteur : Perdix (2010-2017)

Lancement par tube leurre puis dépliage en vol

Altitude maximale de largage : 30 000 ft

Non récupérable.

Structure de coûts : pièces en impression 3D, COTS²³¹

Poids : 290g, dont une caméra de smartphone

Longueur : 16,5 cm Envergure : 30 cm

Livré plié²³² en conteneur taille leurre MJU-10/B²³³

Propulsion électrique.

Vitesse de croisière : 60 Nds (30 000 ft), 35 Nds au niveau de la mer

Vitesse max : 80 Nds (25 000 ft), 35 Nds au niveau de la mer

Autonomie : 45' (30 000 fts), 75' (niveau de la mer)

Rayon d'action : 40 Nq. Altitude d'emploi : HA-BA

Autopilote : proto MIT, navigation GPS

Portées de communication : relais entre drones

PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

Lancement de 103 agents identiques en octobre 2016 par 3 F/A 18 Super Hornet volant à Mach 0.6 dans une température extérieure de -10°C.

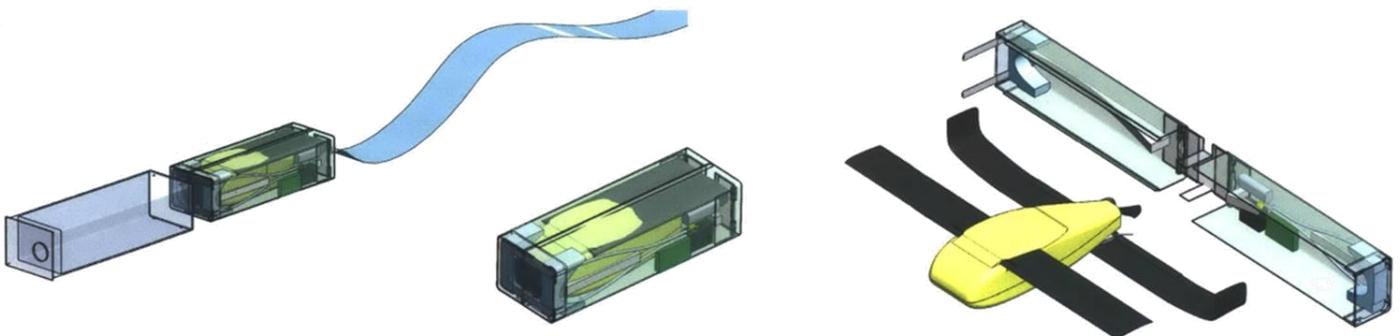
Les différents essais ont concerné, entre autres, la rupture de communication avec l'opérateur et l'altération des données GPS.

Autoréparant, l'essaim s'adapte aisément à l'arrivée ou au départ d'agents et reste coordonné.

L'essaim vole en formation adaptative.

La prise de décision, collective et distribuée, n'est pas le fait d'une unité dirigeante. Chaque Perdix communique et collabore avec chaque autre Perdix de l'essaim.

L'opérateur sélectionne des "Plays" (exemple : surveiller une zone) et l'essaim décide au mieux de la manière d'y recourir. Parce que l'essaim ne peut sélectionner de Play hors du Playbook prédéfini, l'opérateur peut prédire le comportement de l'essaim sans être contraint à la micro-gestion.



²³¹ Commercial Of The shelf.

²³² 48mm x 62mm x 180 mm.

²³³ 54 mm x 67mm x 205 mm.

REMEDY

Expérimentation connexe au “Reactive Electronic Attack Measures” (REAM) program²³⁴.

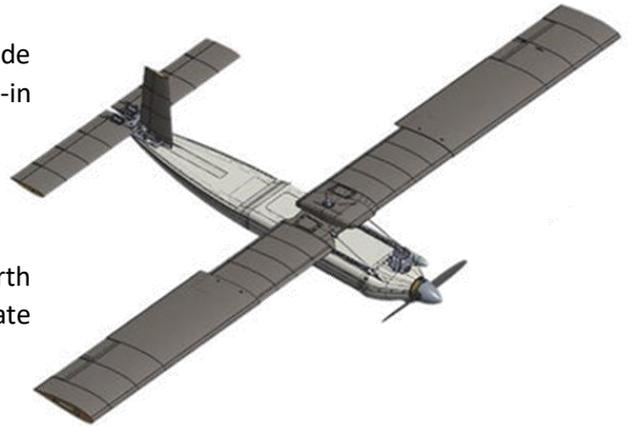
Remedy vise à alimenter la GE cognitive avec un flux suffisant de données en exploitant un essaim de capteurs déportés (close-in sensors).

Dates : 2016 - 2019

Acteurs : ONR, US Navy, Naval Air Systems Command.
Northrop Grumman (avec VX Aerospace, North Carolina State University and South Carolina State University, pour le vecteur).

Porteurs potentiels : Aéronefs.

Cas d’usage affichés : GE cognitive, ISR en secondaire.



PERFORMANCES DES VECTEURS :

Vecteur : DASH X (structure en carbone)

Lancement : par aéronef depuis un conteneur à sous-munitions de diamètre 40 cm (Tactical Munitions Dispenser (TMD) type SUU-64/B, 65/B ou 66/B). Largage puis ouverture du conteneur avant ouverture du parachute de freinage et dépliage en vol.

Non récupérable.

Structure de coûts : outillage et procédés à bas coût

Longueur : 1,73 m Envergure : 3,45 m

Propulsion : moteur thermique.

Vitesse : 85 Nds (max)

Autonomie : 10h à 60 Nds

Communication : Data Link

PERFORMANCES DE L’ESSAIM :

Les performances de l’essaim ne sont pas documentées et rien n’indique que des essais de cette fonctionnalité, largement mise en avant, aient été conduits.

Man-Unmanned Teaming depuis un aéronef habité qui peut être le largueur (la cible étant le EA-18 Growler qui est biplace).



²³⁴ Notifié à Northrop Grumman en avril 2018 pour une fin en 2019. L’objectif est de développer des algorithmes d’IA en vue de traiter les signaux à formes d’onde complexes, inconnues et évolutives pour déclencher automatiquement un brouillage efficace.

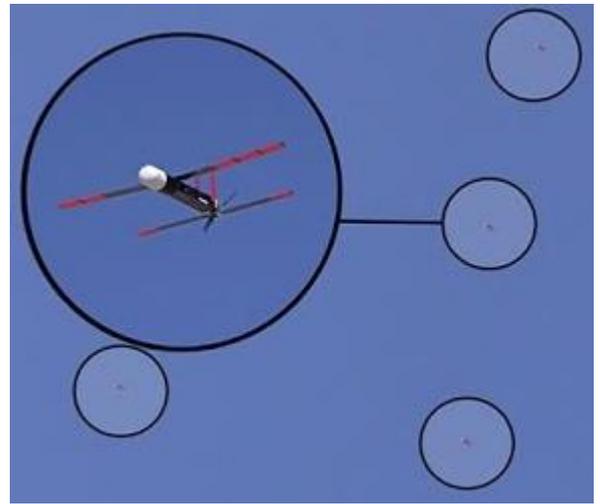
LOCUST (Low-Cost Unmanned aerial vehicle Swarming Technology)

Dates : 2016, prolongé en 2021 par le High Volume Long Range Precision Strike (HVLRRPS pour USVs) and Fires (HVLRRPF pour UUVs)²³⁵ (munitions voleuses)

Acteurs : US Navy Office of Naval Research, US Marine Corps, Raytheon, Georgia Technological Research Institute.

Porteurs potentiels : Bâtiments de surface, sous-marins aéronefs et véhicules terrestres

Cas d'usage affichés : ISR (remplacement hélicoptères), antinavire, munitions voleuses, GE (cf NEMESIS).



PERFORMANCES DES VECTEURS :

Vecteur : Coyote block 1 de Raytheon (2007-2017)

Lancement par tube taille « A », dépliage en vol

Altitude maximale de largage : 30 000 ft

Non récupérable

Prix : 15 000 \$ (objectif : <10 000 \$, voire 5-7 000 \$)

Poids : 5,9 Kg dont charge utile : 0,9 Kg

Longueur : 90 cm Envergure : 1,47 m

Livré en conteneur taille « A²³⁶ »

Propulsion électrique

Vitesse : 70 Nds (max), 54 Nds (croisière)

Autonomie : 2 h (croisière)

Rayon d'action : 110 Nq

Altitude d'évolution : HA-BA

Autopilote : Cloud Cap Technologies Piccolo Nano

Portées de communication : gamme VHF

PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

Lancement de 33 agents identiques en 3 minutes puis constitution rapide de l'essaim (essai à la mer en octobre 2016). En avril 2021, un navire aurait été coulé lors d'un essai²³⁷ suite à une désignation d'objectif par un essaim qui pourrait être de ce type.

Chaque UAV pourrait se positionner de façon autonome pendant le vol en formation sans recevoir de commande explicite pour se placer.

Un UAV dirige, les autres suivent. Le « dirigeant » change si nécessaire. L'essaim serait autoréparant, c'est-à-dire qu'à la destruction d'un UAV, les autres unités pourraient modifier leur comportement de façon autonome et mener à bien la tâche.

L'opérateur pourrait rediriger des UAV distincts afin qu'ils exécutent d'autres tâches. En outre, l'essaim pourrait se diviser en groupes plus petits pour exécuter d'autres manœuvres, ou encore un seul UAV pourrait quitter la formation en vue d'examiner la cible de plus près, puis réintégrer l'essaim afin de lancer une attaque.



²³⁵ Système de lancement par tubes ad hoc du Coyote Block-3 de Raytheon.

²³⁶ Taille « A » OTAN : 91,44 cm de long (3 pieds), 12,38 cm de diamètre (4,875 pouces). (Bouées acoustiques).

²³⁷ Unmanned Systems Integrated Battle Problem (UxS IBP) 21.

V-BAT

La dernière version du produit, le V-BAT 128 a une autonomie et une charge utile accrue par rapport à la précédente version, le V-BAT 118. En 2019, le V-BAT a remporté la compétition Multi-Mission Tactical UAS du Naval Air Warfare Center Aircraft Division (NAWCAD). Depuis juin 2022, il bénéficie du programme d'accélération APFIT (Accelerate the Procurement and Fielding of Innovative Technologies). Désormais associé au logiciel Hivemind de Shield AI, il peut être utilisé en essaim.

Dates et historique : 2010 - .

Acteurs : DARPA²³⁸, Shield AI (Martin UAV et auparavant MLB Company), Brigham Young University¹, US Navy.

Porteurs potentiels : Bâtiments de surface.

Cas d'usage affichés : ISTAR, GE, relais de communications.



PERFORMANCES DES VECTEURS D'ESSAI :

Vecteurs : V-BAT 128 (Shield AI et sa filiale Martin UAV) (2021). Le V-BAT s'est révélé bien adapté à un emploi aéromaritime. Son exploitation en sécurité par les équipes de pont d'envol a fait l'objet d'une attention particulière (pas de zone de sécurité), ainsi que son montage rapide²³⁹. Il pourrait être mis en œuvre par des vents de 25 nds et résisterait bien aux rafales.

Lancement et récupération verticaux sans installation autre qu'une petite surface plane²⁴⁰. Transition vers un vol horizontal en moins de 15s.

Poids : 56,6 Kg dont charge utile modulaire : 11,3 Kg. Le rapport charge utile/poids est un point fort du V-BAT.

Longueur : 2,74 m Envergure : 2,95 m

Propulsion thermique

Vitesse max : 90 Nds

Autonomie : 11 h²⁴¹ (45' en stationnaire)

Rayon d'action : ~300 Nq

Plafond : 20 000 fts

Traitement et filtrage embarqué des données.

Communication : liaison de donnée et mesh.

PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

Hivemind, « edge autonomy » de Shield AI, permet aux essais d'opérer de manière autonome, sans GPS ni communication ni supervision : Hivemind « lit » le champ de bataille et réagit de lui-même.



²³⁸ Projet initial en 2010.

²³⁹ 30 minutes à deux.

²⁴⁰ 3,6 x 3,6 m

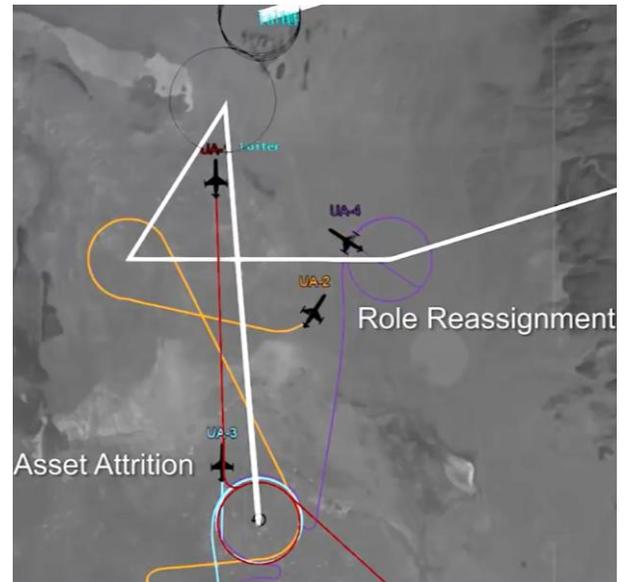
²⁴¹ En vol horizontal

CODE (Collaborative Operations in Denied Environment)

CODE²⁴² ouvre la voie au fonctionnement collaboratif des drones en espace contesté. En 2016, l'Air Force affichait une capacité, jugée insuffisante, de mise en œuvre simultanée de 60 « drone Combat Air Patrols » (CAP). CODE permet à un seul opérateur de superviser un groupe de drones en collaboration autonome, en espace contesté.

Dates : 2016 - 2019

Acteurs : DARPA, Air Force Research Laboratory et Naval Air Systems Command qui a pris la suite de la DARPA. Daniel H. Wagner Associates, Scientific Systems Company, Smart Information Flow Technologies, Soar Technology, SRI International, Vencore Labs dba Applied Communication Sciences, en phase I. Raytheon, Lockheed-Martin, Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory (White Force Network), pour la phase II.



Porteurs potentiels : Drones et armes en service, plates-formes de mise en œuvre y compris aéronefs habités.

Cas d'usage affichés : Ceux des drones en service mais dans un environnement plus exigeant.

PERFORMANCES DES VECTEURS :

Vecteur : RQ-23 Tigershark (MALE) (2006) qui existe en plusieurs versions, utilisés ici uniquement en support de l'expérimentation.

Lancement par décollage sur piste.

Récupérable par atterrissage sur piste.

Prix : 50 000 \$

Poids : > 205 Kgdont charge utile : 34 – 45 Kg

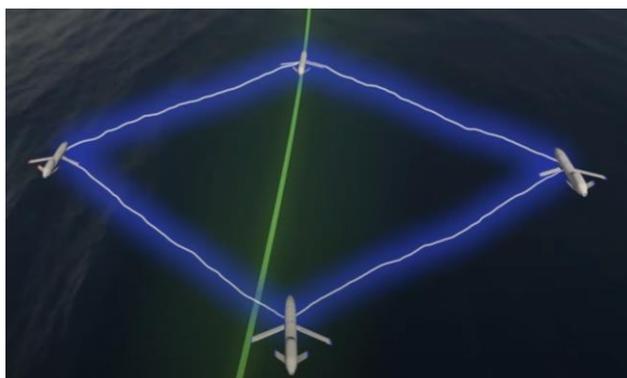
Longueur : 4,3 m Envergure : 6,6 m

Propulsion thermique

Vitesse : 80 Nds (max), 55-60 Nds (croisière)

Autonomie : 7 à 15 h

Altitude maximale : 14 000 ft



PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

En février 2019, 6 Tigershark ont été exploités simultanément par un seul opérateur lors d'essais d'ensemble englobant 14 drones supplémentaires simulés (Live virtual constructive test environment).

Les responsables d'essais soulignent l'efficacité des fonctionnements en environnement dégradé²⁴³, qui évitent aux drones de devoir reprendre individuellement la dernière tâche programmée. Les essais ont aussi porté sur le vol en formation, le respect des « no-fly zones », la gestion dynamique des trajectoires (cibles, menaces émergentes), la gestion de l'attrition et la réaffectation des rôles.

CODE s'appuie sur des tactiques à base de « Plays » permettant de couvrir les différentes tâches et leurs variantes. Pour les actions coordonnées, CODE présente des recommandations au superviseur qui valide ou pas et ordonne les changements de tâche. Dans le respect des règles d'engagement, les drones détectent et engagent les cibles en collaboration, au bénéfice d'une supervision minimale.



²⁴² CODE possède une « modular open software architecture ». CODE est un logiciel propriété du gouvernement américain.

²⁴³ Navigation collaborative pour maintenir formation et trajectoire, communications en réseau maillé (mesh).

GOLDEN HORDE et Networked Collaborative and Autonomous (NCA) Weapons

Dates : 2019 - 2021. Continuité de CODE²⁴⁴ et prolongé par Golden Horde Colosseum²⁴⁵ pour intégrer dans un ensemble collaboratif des munitions en réseau, (AGM-158 JASSM ER/LRASM²⁴⁶, ADM-160 MALD X²⁴⁷ et SiAW²⁴⁸).

Acteurs : Air Force Research Laboratory, US Air Force. Scientific Applications Research Associates (SARA) (contrat de 100 m\$). Raytheon (vecteur SDB II).

Porteurs potentiels : Aéronefs. (Véhicules : variante roquette²⁴⁹)

Cas d'usage affichés : Frappe, Brouillage, leurrage, SEAD.



PERFORMANCES DES VECTEURS D'ESSAI :

Vecteur : GBU-53 II StormBreaker modifiée en "CSDB-1 (Collaborative Small Diameter Bomb)". La GBU-53 est issue d'un programme conjoint Air Force - Navy (2006-2022). La CSDB-1 est une arme standard modifiée pour intégrer la charge utile expérimentale d'autonomie collaborative de SARA.

Non récupérable. Coût unitaire : 220 916 \$²⁵⁰ (Navy)

Poids : 93 Kg dont 48 Kg de charge explosive

Autodirecteur : Radar, IR, laser semi-actif, GPS et homing sur brouillage GPS.

Longueur : 176 cm Envergure : 168 cm

Diamètre : 18 cm Sans propulsion.

Portée : 60 Nq (cibles fixes) 40 Nq cibles mobiles.

Navigation : GPS et INS

Communications : « Network Enabled Weapon » (NEW), à travers une liaison « Weapon Data Link » bidirectionnelle (L16). Messages NEW clés :

- In Flight Target Update (IFTU)
- In-flight controller hand-off
- In flight re-targeting
- In flight abort
- Weapon in Flight Track (WIFT)
- Bomb Hit Indicator (BHI)

PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

Lancement par F16 de 6 munitions air-sol agissant en réseau, en essaim coordonné, le 25 mai 2021 (à noter que c'était l'ambition affichée par CODE).

Les essais ont concerné, entre autres, la priorisation des cibles, les ordres de guidage collaboratif dont la validation d'un « In Flight Target Update ». Il s'agissait de valider le concept de "Networked Collaborative and Autonomous (NCA) Weapons" où les armes agissent ensemble, indépendamment de la plate-forme de lancement, en temps réel, de manière dynamique, sans être considérés comme des SALA²⁵¹.

Un "Playbook" d'algorithmes collaboratifs (les « Plays ») est sélectionné avant la mission. Chaque "Play" code un comportement collaboratif prédéfini qui est activé ou désactivé en fonction de conditions prédéfinies. Le système sélectionne²⁵² des comportements préétablis et, ainsi, ne peut violer les règles d'engagement programmées. Seuls des cibles ou groupes de cibles sélectionnés par un opérateur peuvent être engagés. Pour cette raison, le système est présenté comme « semi-autonome ».

²⁴⁴ Collaborative Operations in Denied Environment, programme de la DARPA initié en 2016, décrit page précédente.

²⁴⁵ Qui implique la DIU, et, "en compétition", L3Harris, Shield AI, STR, Lockheed Martin, EpiSci, Autonodyne LLC, Heron Systems, le Georgia Tech Research Institute et le John Hopkins Applied Physics Laboratory. L'Etat fournit le "digital, agile, open, and government-owned research and development testbed capacity for NCA weapons".

²⁴⁶ Joint air-to-surface standoff missile/Extended Range (Lockheed Martin). Long Range Anti-Ship Missile (variante du JASSM).

²⁴⁷ Miniature Air-Launched Decoy (Raytheon). Version « N » dans l'US Navy (Decoy et Jammer "stand in"). En essaim, ce vecteur serait rendu apte aux « cognitive electronic attacks » (détection, catégorisation, ciblage en cours de mission).

²⁴⁸ Stand-In Attack Weapon, basé sur la version "extended range" de l'AARGM (Advanced Anti-Radiation Guided Missile) et destiné aux F35.

²⁴⁹ En 2019, un essai contre une cible à la mer aurait démontré une portée de 70 Nq.

²⁵⁰ Pour la GBU-53 II. Prix inconnu pour la version « collaborative » qui est une variante prototype.

²⁵¹ Système d'Armes Létal Autonome (ou LAWS : Lethal Autonomous Weapon System).

²⁵² C'est le « play calling », à l'image de l'action d'un entraîneur pour son équipe ou de l'action autonome de celle-ci.

Carrera et Speed Racer

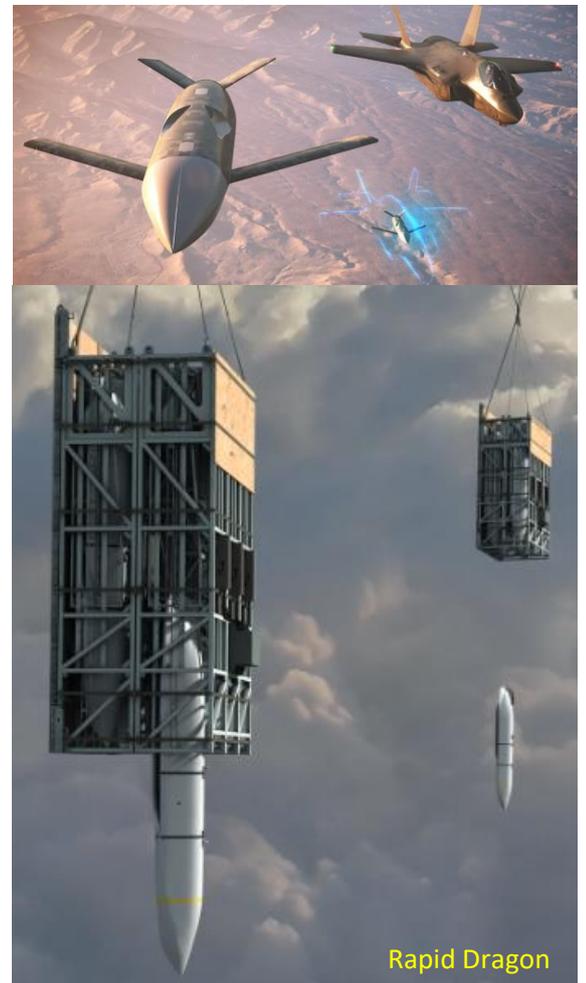
Objet du projet Carrera, le Speed Racer est un démonstrateur, précurseur d'un vecteur autonome bon marché et consommable, destiné à faire équipe avec le F-35 mais aussi à massifier l'engagement aérien. L'aspect industriel et les processus de fabrication²⁵³ sont au cœur d'un projet qui vise la production de masse. Les Speed Racers sont conçus pour former des équipes en réseau, chacun ayant une charge utile spécifique à sa tâche. Les Speed Racers agissent en avant du F-35, supervisés par son pilote²⁵⁴. La prise en compte du facteur humain dans le MUM-T²⁵⁵ est un autre point clé du projet : l'autonomie se veut flexible, c'est-à-dire, par exemple adaptable à la qualification du pilote. Le Speed Racer est la base de conception du CMMT (Common Multi-Mission Truck), élément du concept « Crewed-uncrewed Distributed Team » dont Lockheed Martin se fait le promoteur et qui a pour but de faire agir les drones en dispositif, dans la profondeur et non en ailiers de proximité. L'AFRL s'est intéressé aux synergies envisageables entre Golden Horde et Speed Racer qui reprend des contributions de Lockheed Martin au programme Skyborg.

Dates : 2020 -

Acteurs : Lockheed Martin sur fonds propres²⁵⁶.

Porteurs potentiels : Aéronefs.

Cas d'usage affichés : Senseurs, GE.



PERFORMANCES DES VECTEURS :

Largable en vol et non récupérable. Pour éviter d'occuper des points d'emport externes du F-35 et faire masse lors des engagements, les Speed Racer pourraient être largués en masse par un dispositif de type Rapid Dragon²⁵⁷ du même fabricant depuis un aéronef de transport.

Le coût unitaire visé est entre 1 et 2 mio \$.

Le Speed Racer dispose de charges utiles modulaires.

Propulsion thermique (Kratos Turbine Technologies).

Communication entre plates-formes : par satellite.

PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

La documentation ouverte présente des essais de quatre drones en collaboration avec un F-35. Ils sont envisagés en bien plus grand nombre lorsqu'ils sont largués depuis des avions de transport.



²⁵³ Processus de conception numérique StarDrive et nouveau processus de fabrication. La conception numérique est un des aspects du programme Next Generation Air Dominance (NGAD).

²⁵⁴ Ils sont aussi susceptibles de faire équipe avec des satellites en orbite basse.

²⁵⁵ Man-UnManned Teaming.

²⁵⁶ Il est possible que Lockheed Martin ait bâti Speed Racer sur les études faites dans le cadre du défunt programme de missile de croisière à bas coût Gray Wolf, arrêté en 2019 au profit de Golden Horde. LM affirme que Speed Racer s'appuie sur des travaux remontant, pour certains, à 2007. Quoi qu'il en soit, LM annonce avoir investi 100 mio \$ autour de ce projet (IA, vecteurs, communications, architectures ouvertes, connectivité JADC2, satellites en orbite basse, etc).

²⁵⁷ Une grappe de silos verticaux, aérolargués, descendent sous parachutes en larguant leurs missiles de croisières (6 à 9 JASSM-ER pour une grappe). Les données de tir peuvent être rafraîchies en vol pendant la descente sous voile. Les avions de transport n'ont pas besoin d'être modifiés. Des images de synthèse d'un système, dédié aux leurres ADM-160 MALD, ont également été publiées ; il est reproduit ci-dessus.

GREMLINS

(Largage et récupération en vol de multiples drones aériens à bas coût réutilisables et destinés à agir en essai)

Dates : 2016 -

Acteurs : DARPA, US Air Force, US Navy, SOCOM.
Dynetics (Leidos) (avec Kratos Unmanned Aerial Systems (vecteur), Airborne Systems, Applied Systems Engineering, Kutta Technologies, Moog, Sierra Nevada Corporation, Systema Technologies, and Williams International (réacteur)).

Porteurs potentiels : Aéronefs.

Cas d'usage affichés : ISR, frappe (cibles mobiles et fixes), SEAD.



PERFORMANCES DES VECTEURS :

Vecteur : X-61A « Gremlins Air Vehicule » (GAV), Dynetics (2016-2022)

Lancement : par aéronef depuis soute (« rotary weapon bay » des B1 et B52 par exemple) ou point d'emport externe (chasseurs ou avions de transport (C130 par exemple)). Déploiement en vol.

Altitude maximale de largage : 40 000 ft.

Récupérable par avion de transport (C-130) via un « roll-on/roll-off recovery system » : le « Gremlins Autonomous Docking System » (GADS), conçu pour en récupérer 4 en 30 minutes (7'/vecteur), afin de les reconditionner en moins de 24 heures pour être réutilisables « sans maintenance » une vingtaine de fois. A terme, une réutilisation dans le même vol du porteur est envisagée, ainsi qu'une récupération en soute ou sous voilure.

Altitude maximale de récupération : 20 000 ft.

Structure de coûts : réutilisation des parties coûteuses en fin de vie (propulsion, charges utiles)

Poids : 680 Kg, dont charges utiles pour un total de 65,7 Kg et 1,2 kW (optronique, SAR (synthetic aperture radar), illuminateur laser, GE, explosif).

Longueur : 4,2 m Envergure : 3,47 m

Hauteur : 0,52 m Largeur : 0,57 m

Propulsion : turboréacteur (~missile de croisière).

Vitesse : Mach 0,6 (max)

Autonomie : 1h à 300 Nq, 4h à 25 Nq.

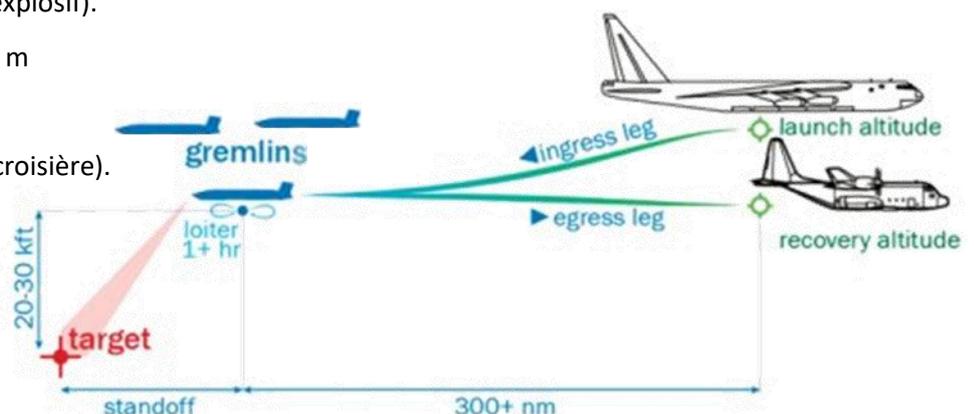
Communication : Data Link

PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

Jusqu'à 8 vecteurs pour un même opérateur, le système étant qualifié de semi-autonome. Des essais à 12 sont envisagés.

Chaque UAV communique avec tous les autres au sein d'un essaim où les vecteurs sont identiques mais où les charges peuvent être diverses.

Les étapes du projet se sont jusqu'ici concentrées sur le vecteur et sa mise en œuvre.



Sparrowhawk

Le Sparrowhawk se présente en continuité du programme Gremlins de la DARPA pour lequel il a concouru. Il donne à des drones MALE²⁵⁸, peu aptes à évoluer en espace contesté, une capacité « stand off ». A l'instar du rôle envisagé pour les avions de chasse habités, ils se comportent alors en « quarterback » de leurs vecteurs déportés. Pouvant être exposé à l'attrition, le Sparrowhawk est aussi destiné à assurer la continuité de la mission, lors des relèves entre ses drones MALE porteurs. La variante 25M du MQ-1C Gray Eagle est destinée à mettre en œuvre ce type de vecteur, du moins en option. A ce titre, le Sparrowhawk est présenté comme un Air Launch Effect (ALE).

Dates : 2020

Acteurs : General Atomics sur fonds propres²⁵⁹.

Porteurs potentiels : Drones MALE (MQ-9, MQ-1C).

Cas d'usage affichés : ISTAR (en particulier « sous la couche »), SIGINT, ELINT, brouillage.



PERFORMANCES DES VECTEURS :

Largable et récupérable en vol automatiquement.

Longueur : 3 m, envergure : 4,26 m,

Poids 226 Kg dont charge utile modulaire de 27 Kg.

Propulsion thermique

Vitesse max 150 nds, croisière 110 nds.

Autonomie : 10 h. Ravitaillable en vol une fois récupéré par son drone mère.

Plafond 25 000 ft, Rayon d'action ~ 500 Nq

Contrôle : Metis Software Defined Control Station de GA sur ordinateur portable.

Communication entre plates-formes : meshONE datalink.

Conforme aux standards d'architecture ouverte.

PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

L'aspect collaboratif repose en particulier sur CODE « Cooperation in Denied Environments », approche également retenue pour Golden Horde.

L'emport simultané de 4 engins par drone MALE semble envisagé (Le MQ-1C a 5 points d'emport externes).



²⁵⁸ Les forces armées américaines testent intensivement des cas d'usage en combat de haute intensité de vecteurs initialement conçus pour le contre-terrorisme. Leur mise à niveau se poursuit suivant plusieurs axes dont la résistance au brouillage des communications (liaison laser par satellite et autonomie, en cas de rupture des liens (y compris GPS), à travers le POD « Agile Condor » de SRC Inc). Ces incréments capacitaires correspondent au standard Multi-Domain Operation (M2DO). L'intégration d'une autoprotection va elle aussi dans le sens d'une meilleure aptitude à opérer en environnement contesté. L'aspect offensif n'est pas oublié avec l'intégration envisagée d'IRST (Pod « Legion ») pour l'engagement air-air autonome et de munitions rodeuses (exemple : conception d'un conteneur de lancement à 10 tubes « A size » destinés à mettre en œuvre des munitions rodeuses de type ALTIUS-500)). L'emport de PODs type Agile Condor ou Legion fait entrer de plain-pied les drones MALE en parc dans les tâches autonomes. Le dogme d'ouverture du feu sur décision opérateur opère un glissement vers le concept, à la flexibilité assumée, de « niveau approprié d'appréciation humaine » (Le document DODD 3000.09 de 2012 devait être mis à jour avant la fin de l'année 2022 (Congressional Research Service du 14 novembre 2022)).

²⁵⁹ GA cherche à accéder au marché, aujourd'hui occupé par Boeing, Dynetics et Kratos qui eux bénéficient de programmes.

LongShot

LongShot est un « air launched UAV » capable de mettre en œuvre divers armements air-air. Il appartient à la famille des « remote carriers ». Destiné à accroître les distances d'engagement air-air et la protection des vecteurs aériens habituellement pourvus d'une escorte de chasseurs, il constitue une des réponses aux nouveaux missiles à très longue portée introduits par la Russie (R37) et la Chine (PL-21)²⁶⁰. En contrepoint, les remote carriers pourraient transformer les dispositifs aériens actuels en faisant la part belle à l'emploi massif de leurs porteurs, majoritairement des avions de transport, et en marginalisant, au moins en nombre, les avions de supériorité aérienne²⁶¹, et certaines de leurs caractéristiques courantes, comme la furtivité ou l'architecture monoplace. Le prototype est attendu pour le 2^{ème} semestre 2024. Comme les autres remote carriers, il revalorise le parc d'aéronefs et de missiles existants en les mettant à parité avec les menaces les plus récentes. Il estompe la frontière entre chasseurs et bombardiers²⁶², offrant à ces derniers une capacité air-air.

Dates : 2020 - .

Acteurs : DARPA. General Atomics, Northrop Grumman et Lockheed Martin, en concurrence pour la 1^{ère} phase²⁶³.

Porteurs potentiels : Chasseurs, Avions de transport, Drones.

Cas d'usage affichés : Engagement air-air, qui est bien la finalité, même si, très vite, d'autres capacités moins exigeantes sont envisagées.

PERFORMANCES DES VECTEURS :

Largable en vol depuis une variété de porteurs. L'éventuelle récupération, assez logique au vu du coût unitaire, reste floue. L'autodestruction du vecteur après emploi de ses armes est évoquée.

Le vecteur serait furtif, frugal en communications (la L16 est évoquée). Il se reposerait sur le réseau pour accomplir sa tâche et non sur le traitement de senseurs propres dont il serait dépourvu.

Si le LongShot est susceptible de mettre en œuvre des missiles air-air longue portée²⁶⁴, il est également envisagé de le doter de nombreux missiles à plus courte portée²⁶⁵ et d'une capacité de munition rodeuse.

²⁶⁰ ~400 km de portée, conçus spécifiquement pour abattre les AWACS, tankers et autres aéronefs lents et peu manoeuvrants, ils visent à repousser ces derniers loin de la zone d'engagement afin de réduire considérablement l'efficacité d'un dispositif allié.

²⁶¹ En corolaire, la guerre commerciale fait rage : CONOPS promus et Business models sont directement liés.

²⁶² B-52, B-2 ou B-21 seront parfaitement en mesure de les mettre en œuvre. Il en sera probablement de même du P-8.

²⁶³ GA est passé en phase II en 2023, ce qui ne veut pas dire que les autres n'y passeront pas non plus.

²⁶⁴ Par exemple 4 AIM-120 pour le Lockheed Martin TE-CAV (Tactical Expendable Combat Air Vehicle).

²⁶⁵ Cuda « hit to kill » de Lockheed Martin, Peregrine de Raytheon, Small Advanced Capability Missile (SACM) et Miniature Self-Defense Munition (MSDM).



PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

Rien n'est dit du fonctionnement en essaim qui est cependant clairement affiché.

Les remote carriers sont fait pour alimenter le combat aérien sans être forcément liés à la supervision directe d'un chasseur habité. Ils se placent dans la perspective des Collaborative Combat Aircraft (CCA) du Next Generation Air Dominance (NGAD).



UTAP-22 (Unmanned Tactical Aerial Platform) (MAKO, depuis 2017)

Conçu spécifiquement pour le vol en essai, l'UTAP-22 est dérivé de la cible aérienne BQM-167A Skeeter. Il adopte une cinématique proche de celle d'un AV-8B. Mis en service 3 ans avant le XQ-58A Valkyrie et mis en œuvre suivant les mêmes principes, il est une bête de somme des expérimentations d'autonomie collaborative. Beaucoup plus compact que le XQ-58A, il ne possède pas l'allonge requise pour un emploi hors porteur sur le théâtre Pacifique mais offre la fiabilité et le faible coût requis pour des expérimentations. Il est mis en œuvre dans le cadre des programmes LCASD (Low Cost Attributable Strike Demonstrator) et Skyborg (l'UTAP-22 a servi au premier test de l'ACS (Autonomy Core System)). Le DIU²⁶⁶ a financé l'intégration de senseurs sur la plate-forme et des expérimentations d'autonomie collaborative.

Dates : 2015 - .

Acteurs : AFRL, DIU, Kratos.

Porteurs potentiels : Navires de commerce reconvertis (drone et catapulte en conteneur), aéronefs.

Cas d'usage affichés : Frappe , ISR, GE (y compris leurres).



PERFORMANCES DES VECTEURS D'ESSAI :

Le MAKO de KRATOS est lancé par catapulte et fusées RATO²⁶⁷. Récupéré sous parachute, son coût unitaire est inférieur à 3 mio \$. A l'été 2021, dans une version équipée d'un IRST et d'un Missile Approach Warning Systems (MAWS), il a fait l'objet de tests pour être lancé depuis un chasseur F-15²⁶⁸.

Longueur : 6,1 m, envergure : 3,2 m,

Poids 930 Kg. La charge utile est répartie entre soute (158 Kg) et points d'emports externes (408 Kg).

Propulsion thermique, vitesse max Mach 0,91.

Plafond 50 000 ft, Rayon d'action 1 400 Nq

Autonomie 3 h

Il serait apte au vol en très basse altitude et pourrait supporter des accélérations de 9G.

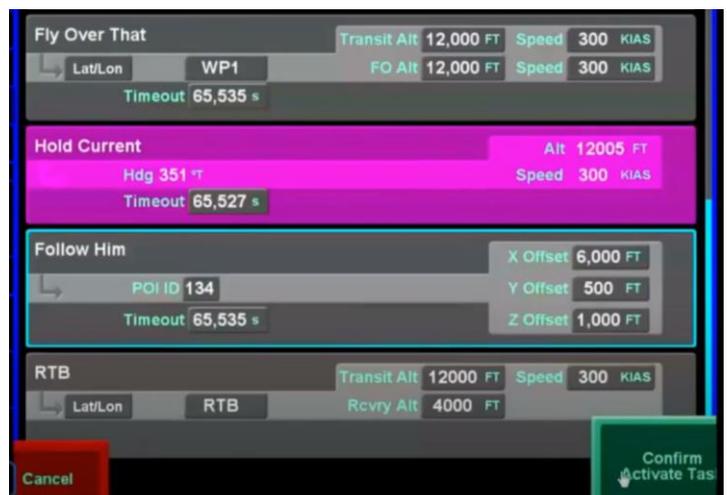
Communication : Liaison de données tactique et UHF.

Il affiche une capacité à opérer en espace contesté.

Il a été le premier drone de ce type à être proposé à l'export.

PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

Dès décembre 2015, deux UTAP-22 (et un 3^{ème} virtuel) ont volé en coopération avec des AV-8B (continuous collaborative airborne collaboration). A cette occasion, ils auraient montré leur aptitude à être détachés, à employer leur charge utile de manière « semi-autonome » et à rejoindre ensuite la formation. Les UTAP-22 étaient supervisés par l'AV-8B via liaison de données (cf IHS ci-dessous). Des essais de transfert de supervision ont également été menés.



²⁶⁶ Defence innovation Unit (Defence Innovation Unit Experimental DIUx, à l'époque).

²⁶⁷ Rocket-Assisted Take Off.

²⁶⁸ Il n'est pas fait état d'essais en vol dans la littérature ouverte. Le Japon a mis en œuvre l'UAV TACOM de cette manière à partir de F-4EJ et de F-15.

LCASD (Low Cost Attritable Strike Demonstrator)

Le LCASD se positionne en convergence avec le programme Skyborg qui fait partie des programmes Vanguard de l'AFRL, objets de toutes les attentions et d'un avancement accéléré. C'est probablement l'aspect « low cost » qui est au centre de l'expérimentation, pour valider l'aspect « attritable » et faire masse sur le champ de bataille. Le programme tirerait parti des expérimentations « Have Raider » qui visaient à faire voler un F-16 autonome en ailier²⁶⁹. LCASD pourrait fournir un 1^{er} prototype à Skyborg en 2023, comme, par exemple, le récent Block2 du XQ-58A. Des capacités de « dog fighting » sont prévues d'être implantées pour 2023.

Dates : 2016 - .

Acteurs : AFRL, Kratos.

Porteurs potentiels : Navires de commerce reconvertis (drone et catapulte en conteneur)

Cas d'usage affichés : Frappe , ISR, GE.



PERFORMANCES DES VECTEURS D'ESSAI :

Le vecteur d'essai est le XQ-58A Valkyrie, aussi appelé AttritableONE. Furtif, lancé par catapulte et fusées JATO²⁷⁰, récupéré sous parachute, son coût unitaire en grande série serait inférieur à 3 mio \$²⁷¹. Il affiche une capacité à être également lancé depuis des avions (chasseurs, bombardiers, avions de transport).

Longueur : 9,14 m, envergure : 8,23 m,

Poids 2,7 tonnes dont 272 Kg de charge utile (un XQ-58A a déjà procédé au largage en vol d'un ALTIUS-600 ; il pourrait aussi emporter deux GBU-53).

Propulsion thermique, vitesse max Mach 0,72.

Plafond 45 000 ft, Rayon d'action ~ 3000 Nq

Il serait apte au vol en suivi de terrain et pourrait supporter des accélérations supérieures aux avions habités.

Il pourrait être en cours d'acquisition, pour un faible nombre, par l'Australie, le Canada, le Japon ou le Royaume Uni.

PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

Après avoir sollicité le vecteur, les essais se concentrent depuis novembre 2022 sur le travail en autonomie collaborative avec des avions de combat. Les LCASD doivent aussi être en mesure de voler en essaim autonome, sans faire équipe avec un avion habité qui les supervise.

En coopération avec des chasseurs habités, des groupes de 3 LCASD sont envisagés.

Le XQ-58 a aussi servi à tester l'ACS (Autonomy Core System) développé dans le cadre du projet Skyborg de l'AFRL.



²⁶⁹ Réalisé par Lockheed Martin pour l'AFRL avec le concours de Calspan Corp pour démontrer le travail en équipe avec un chasseur habité pour des tâches de frappe air-sol sous menace. Lockheed Martin insiste sur la logique de drones détachés par le chasseur avec une grande latitude pour accomplir la tâche.

²⁷⁰ Jet-Assisted Take Off.

²⁷¹ 3 mio \$ pour une commande inférieure à 100, 2 mio \$ au-delà (spécifications). C'est le prix connu de l'UTAP-22, bien plus petit.

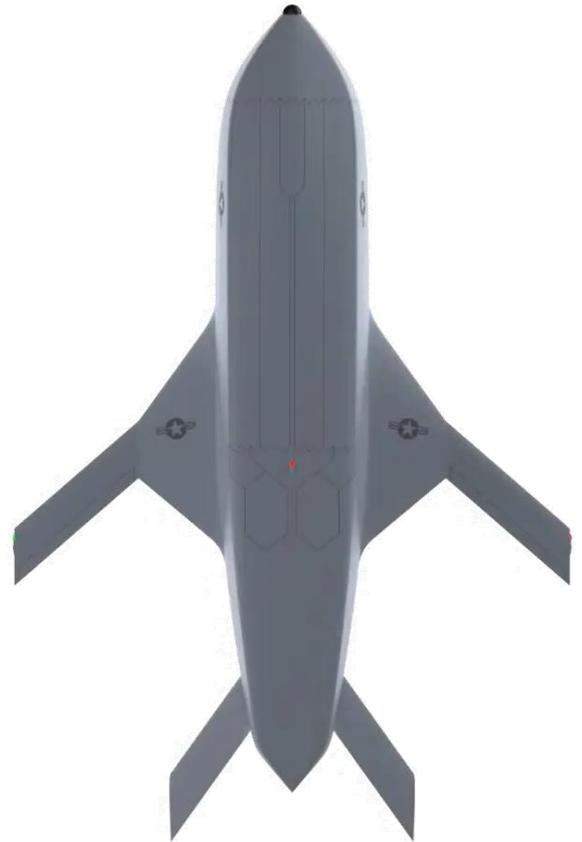
Skyborg

Skyborg (ou Autonomous Attributable Aircraft Experiment AAAX) vise la « full mission autonomy » pour un système de systèmes composé de vecteurs « attributables » à bas coût qui sera dérivé des résultats obtenus. Il s'agit de faire masse et de générer des sorties aériennes sur un tempo élevé. Skyborg fait partie des 4 programmes « Vanguard » de l'AFRL qui adoptent un mode « incubateur » pour un développement accéléré au contact direct du besoin militaire²⁷². Après l'open, modular, government-owned, autonomy core system (ACS), la 2^{ème} phase vise à développer des prototypes modulaires dotés de senseurs performants. L'objectif est aussi de construire une confiance des pilotes dans l'emploi en sécurité de ce type de drone. Le mot UCAV est prononcé et c'est sans doute une des perspectives de Skyborg. L'IOC d'un prototype en 2023 ne semble envisageable qu'en convergence avec le programme Low Cost Attributable Strike Demonstrator). Le CCA (Collaborative Combat Aircraft du NGAD capitalisera sur Skyorg.

Dates : 2018 - .

Acteurs : AFRL, AFLCMC (Air Force Life Cycle Management Center), General Atomics, NorthropGrumman, Kratos, AeroVironment, Autodyne, BAE System Controls, Blue Force Technologies, Fregata System, Lockheed Martin, NextGen Aeronautics, Sierra Technical Services, et Wichita State University.

Cas d'usage affichés : En fonction des modules : ISR/Strike, lancement d'armes, interdiction, offensive counter air/defensive counter air, Advanced Battle Management System.



PERFORMANCES DES VECTEURS :

Ont servi de support au développement de l'ACS : Kratos UTAP-22 Mako et XQ-58 Valkyrie, General Atomics MQ-20 Avenger, Lockheed Martin/Calspan Vista X-62 (F-16 biplace pouvant embarquer un équipage²⁷³).

Skyborg repose sur une architecture ouverte qui sépare conduite et système de mission. La résilience repose sur la robustesse des communications de la navigation et de l'autonomie.

Les phases de décollage et d'atterrissage sont automatiques. Skyborg capitalise sur les technologies développées dans le cadre des expérimentations Haver Raider et Auto Ground and Air Collision Avoidance systems.

PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

Skyborg vise l'autonomie tactique pour des actions de court terme dont délégations et limites sont fixées par l'homme. Le fonctionnement sans supervision permanente, autorise un repérage autonome, une navigation indépendante, une coordination automatique entre plusieurs vecteurs et un commandement par objectif.

Deux MQ-20, équipés du POD IRST « Legion », ont évolué de manière coordonnée en 2020 à l'occasion d'Orange Flag.

Un volet MUM-T est également prévu dans le déroulement des expérimentations. Le respect des règles d'engagement est mis en avant, ce qui, dans le contexte, indique un recours à la technologie des « Plays ».

²⁷² Coopération entre bureau programme, AFRL, AFWIC (Air Force Warfighting Integration Capability), les principaux commandements et le Secretary of the Air Force (Acquisition, Technology, and Logistics) (SAF/AQ).

²⁷³ Il permet d'observer en temps réel le comportement autonome, à la manière de ce qui a été fait dans l'industrie automobile. Il sera aussi utilisé pour développer le vol tactique en formation avec des drones. Le Variable In-flight Stability Test Aircraft (VISTA) simule le comportement en vol de différents types d'avions. Il permet d'aller 10 fois plus vite dans le développement de l'autonomie.

Have Raider I et II

L'expérimentation visait à évaluer la possibilité de combiner UCAVs²⁷⁴ et chasseurs habités dans un même dispositif face à une menace évolutive. Have Raider bénéficie de l'architecture ouverte USAF Open Mission Systems (OMS) qui permet l'intégration rapide de logiciels tiers.

En 2015, Have Raider I est davantage orientée vers la mise en œuvre de l'aéronef et l'accomplissement de tâches relativement élémentaires, liées au vol en formation. Il s'agit de démontrer que le X-62 peut automatiquement détecter, rallier et voler en formation avec son leader, de la même manière qu'un équipier pourrait le faire. Les essais ont permis de détacher le F-16 VISTA pour une tâche d'attaque au sol simulée, avant qu'il ne reprenne la formation sur son leader piloté. Les essais ont également permis de valider le système d'anticollision automatique. Ils ont ouvert la voie à l'expérimentation Have Raider II qui s'est déroulée en 2017.

Celle-ci avait pour objet de confronter l'autonomie à un environnement évolutif, imposant des reconfigurations à la machine. Trois objectifs supplémentaires avaient été retenus :

- Planifier et exécuter automatiquement une attaque air-sol ;
- Exécuter les tâches en fonctions des priorités imposées par la supervision humaine et les moyens disponibles ;
- Reconfigurer les tâches de manière dynamique pour réduire l'exposition à la menace tout en gérant les pannes, pertes de capacités, détournements et ruptures des communications.

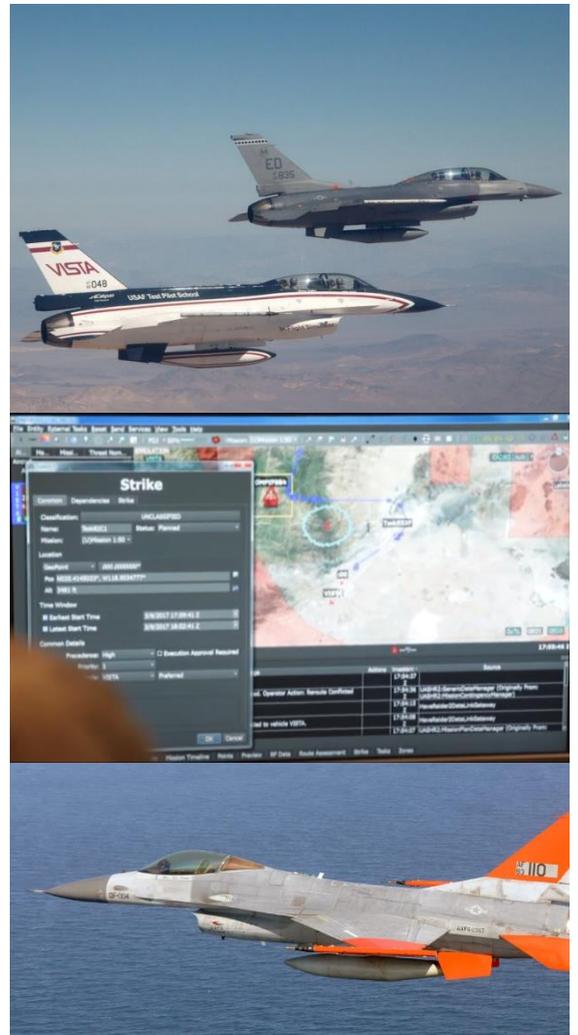
Une tâche typique consistait en une attaque air-sol qui se trouve perturbée en vol par l'irruption d'une menace sol-air, imposant au VISTA de l'éviter tout en effectuant sa passe d'attaque. D'autres événements ont été injectés comme la perte de communications, l'irruption de multiples menaces sol-air et de cibles à traiter. Des pilotes chevronnés ont été ensuite confrontés aux mêmes tâches pour permettre de comparer les résultats.

Dates : 2015 - 2017.

Acteurs : AFRL, U.S. Air Force Test Pilot School, Lockheed Martin, Calspan Corp.

Porteurs potentiels : Aéronefs retirés du service et reconvertis à l'image de ceux qui sont reconvertis en cibles.

Cas d'usage affichés : Frappe air-sol (cas d'usage traité dans l'expérimentation).



PERFORMANCES DES VECTEURS D'ESSAI :

Le Vista X-62 (F-16 biplace pouvant embarquer un équipage²⁷⁵) joue le rôle de l'UCAV.

Communication : Liaison de données depuis le sol dans le cadre de l'expérimentation.

PERFORMANCES DE L'ESSAIM :

Plusieurs UCAVs ont très probablement été simulés en sus du X-62.

La manière d'évoquer la supervision fait penser à la technologie Playbook.

²⁷⁴ Unmanned Combat Air Vehicle, ici simulé par le X-62 VISTA (F-16 biplace modifié)).

²⁷⁵ Il permet d'observer en temps réel le comportement autonome à la manière de ce qui a été fait dans l'industrie automobile. Il sera aussi utilisé pour développer le vol tactique en formation avec des drones. Le Variable In-flight Stability Test Aircraft (VISTA) simule le comportement en vol de différents types d'avions. Il permet d'aller 10 fois plus vite dans le développement de l'autonomie.

Air Combat Evolution (ACE)

Dédié au facteur humain, ACE vise à accroître la confiance des pilotes de chasse dans les drones collaboratifs. En partant du combat tournoyant, parce qu'il s'agit du vol le plus dynamique, ACE doit permettre au pilote d'agir en symbiose d'un dispositif collaboratif étendu, apte à couvrir tout le spectre des missions.

ACE part du constat que la supervision de drones collaboratifs amène le pilote à agir comme un chef de mission. La DARPA se place implicitement dans la perspective du chasseur monoplace et vise la valorisation de l'existant. ACE hiérarchise les fonctions cognitives de haut niveau, réservées à l'homme, et les fonctions de bas niveau, laissées à l'IA.

ACE se décline en AlphaDogfight pour la proximité et AlphaMosaïc pour la profondeur. ACE traite d'abord les actions à vue (phase 1). Dans un deuxième temps, ACE valide des méthodes pour mesurer, accroître et prédire la confiance de l'homme dans l'autonomie (phase 2). In fine, ACE étend son approche à des scénarios opérationnels complexes impliquant plusieurs aéronefs, habités ou pas, ouvrant ainsi la voie à une expérimentation en vraie grandeur.

Dates et historique : 2019 - 2024.

En 2016, le logiciel ALFA²⁷⁶ de la société Psibernetix²⁷⁷ était rendu célèbre pour avoir, en situation d'infériorité²⁷⁸, systématiquement battu un pilote chevronné²⁷⁹, lors d'exercices tactiques sur simulateur. ALFA se destinait tant aux drones qu'à la fonction de copilote virtuel. Il a contribué à dérisquer ACE, sans toujours convaincre ceux qui n'y ont vu qu'un jeu vidéo. La compétition AlphaDogfight de 2020, organisée sur 3 jours par la DARPA²⁸⁰ a vu la victoire de Falco, l'IA de la société Heron Systems²⁸¹, rachetée depuis par Shield AI. Cette dernière a combiné la technologie acquise avec ses propres capacités pour produire Hivemind, IA « edge », qui permet aux essaims d'opérer de manière autonome, sans GPS, ni communication, ni supervision : Hivemind « lit » le champ de bataille et réagit de lui-même. Interfacé avec l'affichage tête haute, il est aussi testé au sein de l'USAF (F-16/A-10), à la fois en tant que co-pilote et MUM-T²⁸².

Acteurs : AFRL, ARCNet (Autonomy Research Collaborative Network), DARPA, Dynetics, SoarTech ("trust model"), Collins Aerospace, Raytheon Technologies, l'Operator Performance Laboratory de l'Université de l'Iowa (Cognitive Assessment Tool Set), Calspan (modification aéronefs d'essai (L-39 Albatros²⁸³)), Johns Hopkins University Applied Physics Lab, Lockheed Martin, Boeing, EpiSci, Georgia Tech Research Institute, Shield AI et physicsAI.

Porteurs potentiels : Aéronefs de combat.

Cas d'usage affichés : Toute la gamme des missions réalisables en ayant recours à l'autonomie collaborative.



Hivemind dans un affichage tête haute

²⁷⁶ Combinant logique floue et algorithmes génétiques, ALFA est bâti sur la technologie des « genetic fuzzy trees ». Il est couplé à une arborescence de décision élaborées par des pilotes. Initié en 2015, ALFA synthétise les données de tous les capteurs du dispositif aérien et exploite les erreurs de l'adversaire. Sa boucle OODA (Observe Orient Decide Act) complète, pour 4 avions, (collecte et analyse des données senseurs pour cartographier le scénario, analyse des modes d'action (MA) en cours ou création d'un nouveau MA) est quasi instantanée (6,5 ms), ce qui constituait l'objectif recherché. Quelques mois auront suffi pour atteindre ce résultat.

²⁷⁷ Rachetée depuis par Thales.

²⁷⁸ Scénario de référence : 2 bleus épaulés par un AWACS et disposant de missiles à courte et longue portée contre 4 rouges équipés de missiles à longue portée. Début d'action à 54 Nq des adversaires.

²⁷⁹ Pilote/instructeur qualifié Air battle Manager, Ground Control Intercept officer et AWACS Mission Commander.

²⁸⁰ Confrontation des IA à un pilote de F-16.

²⁸¹ Heron Systems mettait en avant sa capacité à déployer une IA multi-agents d'apprentissage par renforcement.

²⁸² Man-UnManned Teaming.

²⁸³ Le pilote en place avant exécute les ordres de l'IA et l'instrumentation mesure la réponse physiologique du pilote en place arrière pour déceler les indices révélateurs de la confiance accordée ou pas à l'IA. Le nombre de désengagements de l'IA, les mouvements de la tête et du regard sont des métriques d'évaluation. In fine, des L-39 et F-16 seront convertis pour être pilotés par l'IA.

ANNEXE III :

ARMES LASER : POINTS CLES

- TECHNOLOGIE

Une arme laser est, d'une manière générale, constituée d'une source laser, dont le rôle est de convertir de l'énergie électrique en un faisceau de photons (lumière) infrarouge, idéalement collimaté²⁸⁴ ou focalisé²⁸⁵ sur une cible distante. À quelques exceptions près, les démonstrateurs de dernière génération exploitent des sources industrielles conçues pour des applications de découpe (longueur d'onde de l'ordre de 1 μm). Le guidage du faisceau (beam director en anglais), permettant de pointer en permanence le faisceau sur la cible (en mouvement), est réalisé par une tourelle mobile (tip tilt), asservie par plusieurs voies de détection : a minima une détection radar grossière et de la télémétrie, complétée par un pointage fin, avec un second laser infrarouge. Les armes laser de très forte puissance, ambitionnant des portées supérieures à 10 km nécessitent également des sous-systèmes d'optique adaptative, intra- et infra-cavité (la cavité est le cœur du système de transformation d'énergie électrique/photonique) pour, d'une part, compenser les effets thermiques au sein de la cavité, et, d'autre part, compenser les turbulences et la diffusion de l'atmosphère, le long du trajet du faisceau. Généralement, la tourelle ne supporte que l'optique de focalisation / collimation ainsi que les capteurs de guidage. La source (ou les sources) laser, le refroidissement, la gestion de l'énergie des servitudes sont à proximité et ne s'ajoutent pas à la masse mobile.

Une arme laser est un système dont la complexité croît avec la puissance délivrée par la source. En effet, si une source de l'ordre du kW nécessite peu de servitudes, une gestion de la thermique modeste et une masse mobile raisonnable, une source à plusieurs centaines de kW génère des contraintes fortes d'intégration, conséquences du mauvais rendement de conversion d'énergie électrique/photonique (80 % de l'énergie électrique consommée est convertie en chaleur), mais également de la taille du miroir de focalisation, dont le diamètre est proportionnel à la portée visée.

Le guidage du faisceau est implémenté par un jeu de lentilles sur les sources de puissance modérées (< 10-30 kW, Figure 1). Au-delà, pour des raisons de tailles et de tenue au flux, l'usage de miroirs s'impose (Figure 2 et Figure 3).



Figure 1– Système HELMA-P de CILAS, 2 kW (source DGA)

²⁸⁴ C'est-à-dire cylindre de lumière, imparfait, comme nous le verrons, dans le cas du laser.

²⁸⁵ Assimilable à un bicône autour de la distance de focalisation, ce qui est simplificateur dans le cas du laser.



Figure 2 – Système THEL (Tactical High Energy Laser), US-Israël

U.S. NAVY'S LaWS

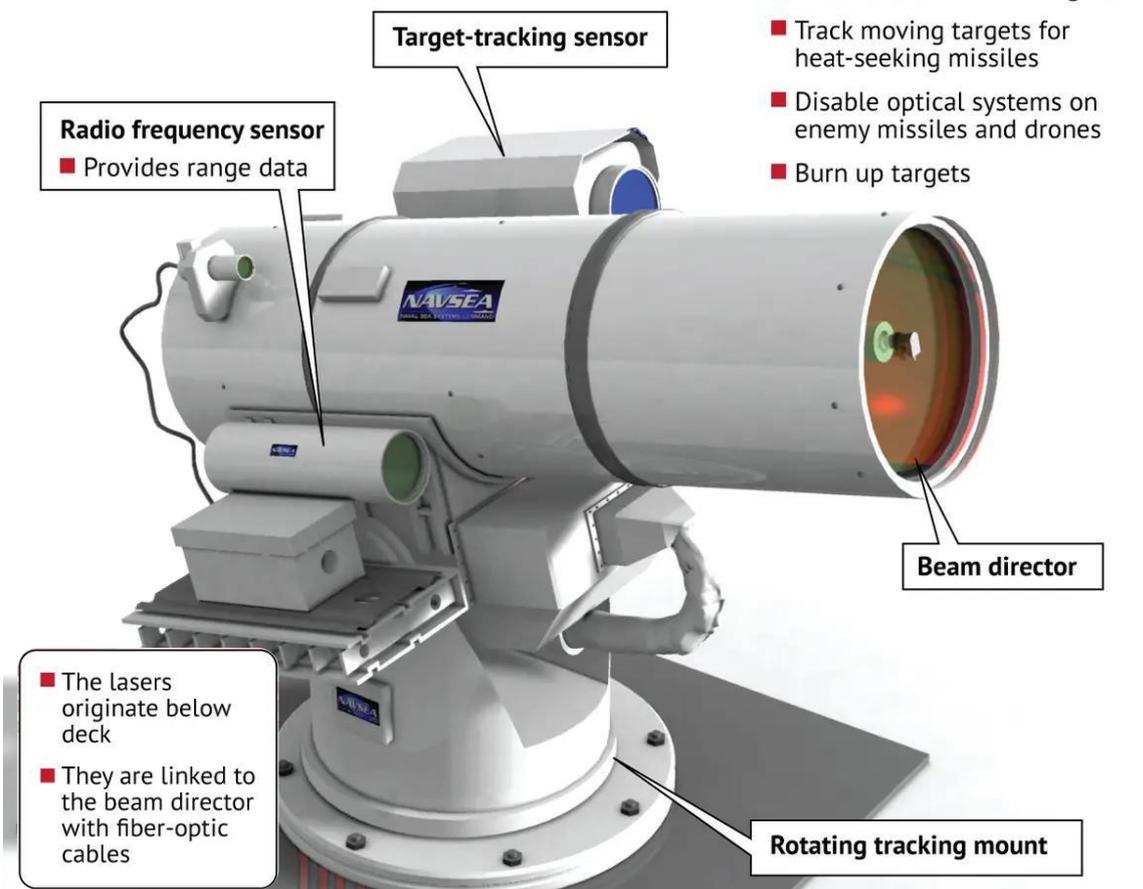


Figure 3 US NAVY LaWS (source Stratfor), avec 6 sources laser pour un total de 60 kW.

À moyen terme, la recherche de puissances toujours plus élevées conduira à l'avènement de sources à combinaison cohérente. L'ONERA est le leader en France sur ce sujet.

L'effet terminal d'une arme laser sur une structure est avant tout thermique : un échauffement, idéalement très rapide, avec pour conséquence une perte des propriétés mécaniques, un changement de phase ou une combustion, aboutissant à un perçage.

- PROTECTION DES PERSONNES : DISTANCES DE SECURITE, CADRE LEGAL

o VLE, DNRO ET REFLEXIONS SPECULAIRES

Pour l'homme, les valeurs limites d'exposition au laser (VLE) sont exprimées en W/m^2 . Elles sont déterminées à travers un processus fastidieux qui tient compte de la classe du laser, de son caractère impulsionnel ou continu, de la durée d'exposition, de la longueur d'onde et du risque sur l'œil (cristallin ou rétine) ou la peau. Aux longueurs d'onde des lasers retenus comme référence de cette étude, on trouve les valeurs suivantes :

	$\lambda = 1070 \text{ nm}$	$\lambda = 2050 \text{ nm}$
VLE peau en W/m^2	2000	1000
VLE œil en W/m^2	127	2000

Tout comme les VLE, les calculs de DNRO (distance nominale de risque oculaire) sont spécifiés dans la norme NF EN 60825-1. Pour les cas qui nous intéressent, les valeurs suivantes peuvent être établies :

P (kW)	λ longueur d'onde (nm)	θ divergence (μrad)	DNRO peau (km)	DNRO œil (km)
2	1070	33	34	136
100	1070	157	50	202
1	2050	100	11	8

A 1μ , les distances nominales de risque oculaire (DNRO) deviennent très rapidement importantes, posant à minima des problèmes de prévention des interférences mutuelles et d'entraînement.

A cela s'ajoutent les risques moins maîtrisables découlant de l'interaction du faisceau et de sa cible et pouvant conduire à des réflexions spéculaires sur les optiques planes ou à des répartitions spatiales imprévisibles, lors de la rencontre avec des objets de petit diamètre, au regard de celui de la tache, comme les bras rotor des multicoptères. Les quelques 40 W réfléchis par une optique plane, soumise à un laser de 2 kW à 1μ , sont à comparer avec la valeur limite d'exposition de la pupille humaine à 4,8 mW²⁸⁶, pour donner une idée des difficultés à conserver en sécurité le personnel du tireur ou celui d'autres unités de la force, quand la direction de l'énergie réfléchie fluctue de manière imprévisible.

Certes, une arme laser n'est mise en œuvre que sur une cible accrochée et cesse son action lorsque la télémétrie n'est plus sur la cible ; pour autant, ces sécurités, intégrées à l'arme, ne suffisent pas, on le voit, à préserver les personnels tiers y compris amis. Le port de lunettes de protection dédiées semble peu compatible avec les contraintes du combat, d'autant, qu'à 1μ , elles altèrent la perception visuelle.

o CADRE LEGAL

Le protocole additionnel à la Convention sur l'interdiction ou la limitation de l'emploi de certaines armes classiques, qui peuvent être considérées comme produisant des effets traumatiques excessifs ou comme frappant sans discrimination (Protocole IV, intitulé « protocole relatif aux armes à laser aveuglantes »), comprend quatre articles, dont les trois premiers sont reproduits ici :

Article 1^{er} : Il est interdit d'employer des armes à laser spécifiquement conçues de telle façon que leur seule fonction de combat ou une de leurs fonctions de combat soit de provoquer la cécité permanente chez des personnes dont la vision est non améliorée, c'est-à-dire qui

²⁸⁶ Comme on l'a vu, la Valeur Limite d'Exposition (VLE) de l'œil à 1μ est de 127 W/m^2 . On retient un diamètre de 7 mm pour la pupille à pleine ouverture.

regardent à l'œil nu ou qui portent des verres correcteurs. Les Hautes Parties contractantes ne transfèrent de telles armes à aucun État ni à aucune entité autre qu'un État.

Article 2 : Dans l'emploi des systèmes à laser, les Hautes Parties contractantes prennent toutes les précautions réalisables pour éviter les cas de cécité permanente chez des personnes dont la vision est non améliorée. De telles précautions comprennent l'instruction de leurs forces armées et d'autres mesures pratiques.

Article 3 : L'aveuglement en tant qu'effet fortuit ou collatéral de l'emploi militaire légitime de systèmes à laser, y compris les systèmes à laser utilisés contre les dispositifs optiques, n'est pas visé par l'interdiction énoncée dans le présent protocole.

On le voit, pour les HEL, même si le fortuit et le collatéral sont acceptés, des précautions d'emploi doivent être appliquées pour les éviter. A cet effet, l'emploi des lasers est régi par un certain nombre de textes, en particulier l'arrêté du 11 décembre 2014, relatif à la mise en œuvre du règlement d'exécution (UE) n°923/2012 (FRA.7024 alinéa e), qui se réfère au document 9815 de l'OACI sur les émetteurs lasers et la sécurité des vols.

○ CONSEQUENCES

Si rien aujourd'hui n'interdit l'usage d'une arme laser, son emploi n'est pas anodin au regard de la maîtrise des dommages collatéraux potentiels et de la prévention des interférences ou des méprises. Pour ces raisons, et sans s'arrêter à son efficacité propre, qui sera néanmoins examinée par la suite, on peut douter fortement de l'avenir de l'arme HEL à 1 μ pour contrer les essaims de drones en combat aéromaritime.

A 2 μ , les distances nominales de risque oculaire sont plus réduites et s'appliquent au cristallin et non à la rétine. A la différence des lunettes de protection pour laser à 1 μ , celles qui sont adaptées à 2 μ n'altèrent quasiment pas la perception visuelle²⁸⁷.

- AUTRES FACTEURS DETERMINANTS

Cette partie offre une réflexion à partir d'éléments de vulnérabilité laser des cibles considérées vis-à-vis d'un rayonnement de l'ordre de 1 μ et pour des densités de puissance réalistes, dans la gamme 500 à 3000 W/cm². Le cas de l'optronique dans le visible et en bande I (longueur d'onde inférieure à 1 100 nm (soit les caméras à capteur silicium)) est également abordé. Enfin, la puissance laser est discutée sous l'angle portée vs durée d'engagement.

○ LA DENSITE DE PUISSANCE

La densité de puissance (I en kW/cm²) n'est que le rapport entre la puissance photonique déposée sur la structure et la surface de la zone irradiée. En négligeant les pertes dans l'atmosphère, la puissance est donnée par la source. Il reste donc à déterminer la surface irradiée. Contrairement aux idées reçues, un faisceau laser n'est pas parfaitement collimaté (ce n'est pas un cylindre de lumière). Il y a toujours une divergence, idéalement très faible, qui dépend de la qualité de la cavité laser, de l'ouverture et de la longueur d'onde.

La puissance laser d'une source est une donnée fortement dimensionnante d'un point de vue système et intégration. Mais d'un point de vue effet terminal, c'est le produit densité de puissance par le temps

²⁸⁷ A 2 μ , les optiques en plexiglass ou en plastique CR39 absorbent énormément, ce qui limite considérablement les réflexions potentielles sur les optiques planes. A la même longueur d'onde, les traitements anti-reflets du verre risquent de se dégrader et d'absorber.
A 2 μ , il est envisageable de se passer de protection oculaire au-delà de quelques mètres.

d'irradiation (fluence) qui est déterminant, dans une certaine mesure. La Figure 4 l'illustre en montrant le temps de perçage d'une coque de drone en plastique en fonction de la puissance et du diamètre de la zone irradiée (à puissance constante, plus la surface irradiée est importante, plus la densité est faible). Sans surprise, les durées de perçage d'un diamètre de 5 mm sont inférieures à la seconde, et un écoulement d'air reste sans effet, alors qu'il faut près de 10 s pour une irradiation de 30 mm.

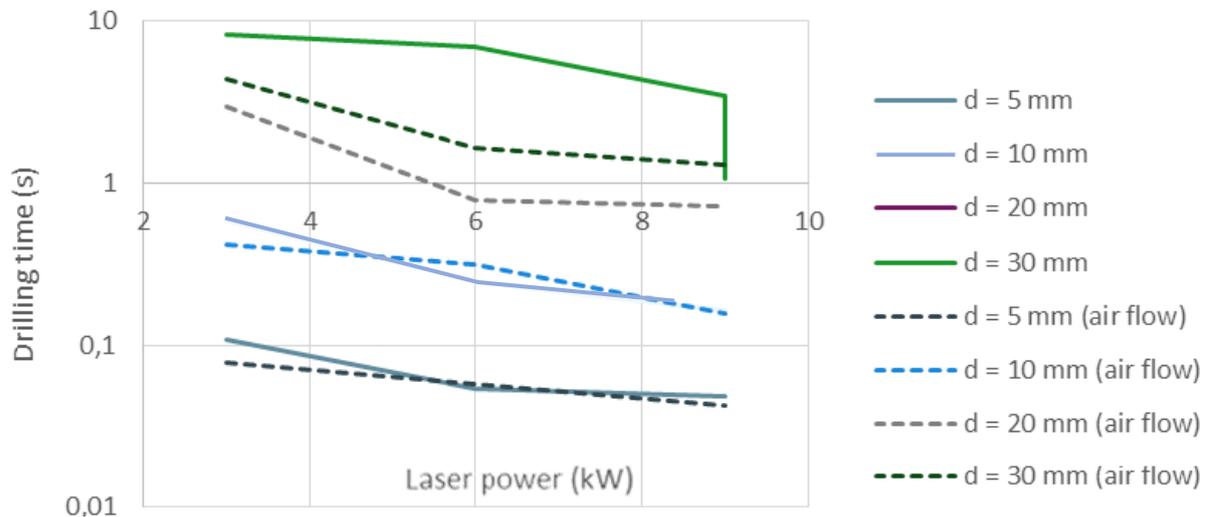


Figure 4 - durée de perçage d'une coque de drone vs. puissance et diamètre

De manière très simplifiée, sans focalisation, une arme laser avec une divergence de 10 μ rad (ce qui est déjà excellent) avec une tache de \varnothing 20 mm à 1 km, produit une tache de 20 cm à 10 km. Pour conserver une densité de puissance de 1 kW/cm², la puissance de la source doit être :

- A la portée de 1 km, P = 3,1 kW
- A la portée de 10 km, P = 314 kW

D'un point de vue système, ce ne sont pas les mêmes objets, mais l'efficacité terminale est la même (en négligeant les aspects de propagation atmosphérique).

Le bénéfice d'une très forte puissance (100 kW et au-delà) est une portée accrue, OU une durée d'engagement plus courte. Ce dernier point est impératif pour le traitement de menaces en essaims.

○ LA GEOMETRIE DU FAISCEAU

Sans tenir compte de l'influence du milieu de propagation (l'atmosphère), un faisceau gaussien en régime focalisé²⁸⁸ peut être approché, de manière très simplifiée, selon le schéma suivant, en considérant un miroir de grande focale²⁸⁹ :

²⁸⁸ On retiendra ici une focalisation fixe, ce qui est le cas aux grandes puissances. Aux petites puissances, un laser peut être doté d'une focalisation dynamique mais l'étude ne le prend pas en compte.

²⁸⁹ Introduction to Laser Weapon Systems, Air Force Institute of Technology, DEPS, 2010.

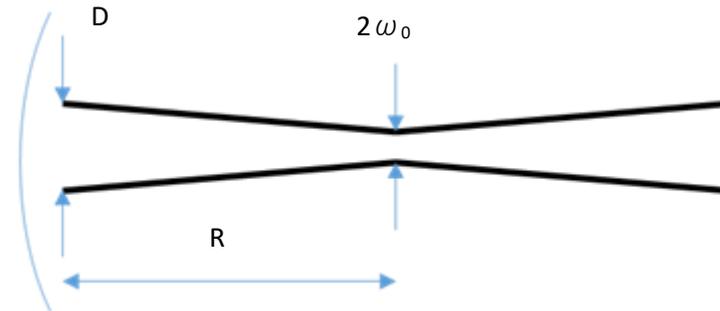


Figure 5 Schéma très simplifié de l'évolution du diamètre du faisceau le long de l'axe optique

$2\omega_0$, le diamètre du faisceau à la distance focale, est alors donné par la formule suivante :

$$2\omega_0 = 4M^2 \times \left(\frac{R \cdot \lambda}{\pi D}\right)$$

Où R est la distance focale, D l'ouverture de l'optique de focalisation et M^2 le facteur de qualité²⁹⁰ du faisceau.

La divergence du faisceau est de : $\theta = 2 \tan^{-1}\left(\frac{D-2\omega_0}{2R}\right)$

Pour les armes de référence de l'étude on obtient :

- Pour un laser de longueur d'onde 1070 nm, de puissance 2 kW, ayant un facteur de qualité M^2 de 1 et une ouverture de 4 cm, on obtient un diamètre du faisceau $2\omega_0$ de 2 cm à 600 m soit une densité de puissance de 637 W/cm² ; la divergence est de 33 μ rad.
- Pour un laser de longueur d'onde 1070 nm, de puissance 100 kW, ayant un facteur de qualité M^2 de 30 (c'est pénalisant, mais raisonnable) et une ouverture de 50 cm, on obtient un diamètre du faisceau $2\omega_0$ de 17 cm à 2 100 m, soit une densité de puissance de 440 W/cm² ; la divergence est de 157 μ rad.
- Pour un laser de longueur d'onde 2050 nm, de puissance 1 kW, ayant un facteur de qualité M^2 de 1 et une ouverture de 8 cm, on obtient un diamètre du faisceau $2\omega_0$ de 2 cm à 600 m, soit une densité de puissance de 318 W/cm² ; la divergence est de 100 μ rad.

Eléments résumés dans le tableau ci-dessous :

Puissance (kW)	Facteur de qualité M^2	R Focalisation (m)	D Ouverture (cm)	λ Longueur d'onde (nm)	$2\omega_0$ à R (cm)	I Densité de puissance à R (W/cm ²)	Θ Divergence (μ rad)
2	1	600	4	1070	2	637	33
100	30	2100	50	1070	17	440	157
1	1	600	8	2050	2	318	100

○ LE COUPLAGE LASER - CIBLE

Le couplage d'un rayonnement laser avec la cible conduit à un échauffement rapide de la zone irradiée. De cet échauffement résulte :

- Une perte de propriétés mécaniques (affaiblissement) ;

²⁹⁰ La qualité d'un faisceau laser est caractérisée par le facteur M^2 , qui compare la vraie forme du faisceau à celle d'un faisceau gaussien idéal.

- Un changement de phase (fusion) ;
- Une pyrolyse ou une combustion ;

Ces deux derniers points conduisent éventuellement à un perçage de la structure par consommation de la matière (Figure 6).



Figure 6 – Sandwich aéronautique après irradiation laser

Points clés :

- Le phénomène thermique est « lent » : de quelques secondes à plusieurs dizaines de secondes.
- La cinétique thermique dépend :
 - o Des paramètres laser : longueur d'onde, densité de puissance et durée d'irradiation ;
 - o Des propriétés optiques et thermiques du matériau impacté, notamment son état de surface, sa réflectance spectrale (inversement sa capacité à absorber une partie du rayonnement incident), de même que sa capacité à conduire (évacuer) la chaleur.

Ainsi, un acier poli présente une réflectance spectrale de l'ordre de 70 % à 1064 nm (30% de l'énergie portée par le rayonnement laser est donc absorbée). Le même acier, avec une surface sablée absorbe de l'ordre de 70% du rayonnement.

La conduction thermique joue un rôle important dans la diffusion de la chaleur au sein du matériau irradié. La température de fusion du titane est de l'ordre de 1660 °C, alors que celle de l'aluminium est 1000 K plus faible. Les alliages de titane sont naturellement réputés plus résistants à la chaleur. Pour autant, la conductivité thermique de l'aluminium est de l'ordre de 226 W/m.K, alors que celle du titane est de 6 W/m.K. En conséquence, la chaleur créée dans la zone irradiée d'un alliage de titane ne se propage pas, ou peu, dans la masse. Conséquence : la température croît très rapidement, et atteint le point de fusion. A l'opposé, la chaleur créée dans l'aluminium s'écoule facilement dans la masse, la température s'élève, mais lentement, sans nécessairement atteindre la fusion, voir même induire une oxydation en surface (Figure 7).

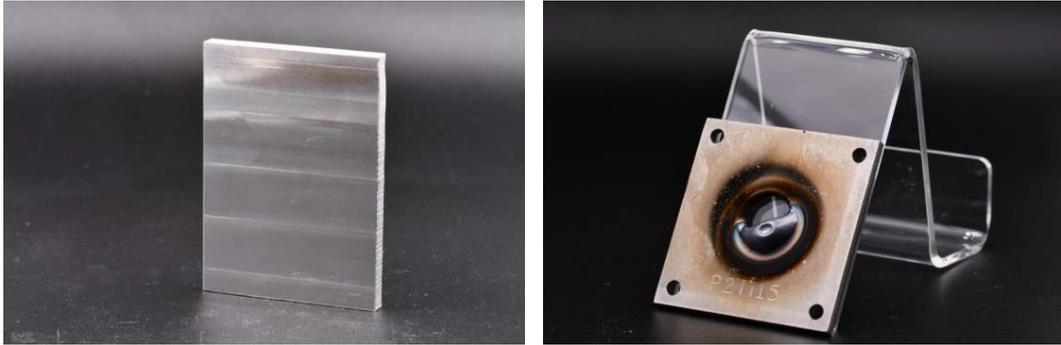


Figure 7 - résultats de l'irradiation d'une plaque l'aluminium (gauche) et de titane (droite), d'épaisseurs comparables, soumises au même flux laser.

Autre exemple, la réaction d'un carbone-époxy de 3,7 mm d'épaisseur pour trois densités de puissance, où sont relevées les températures en face avant et face arrière.

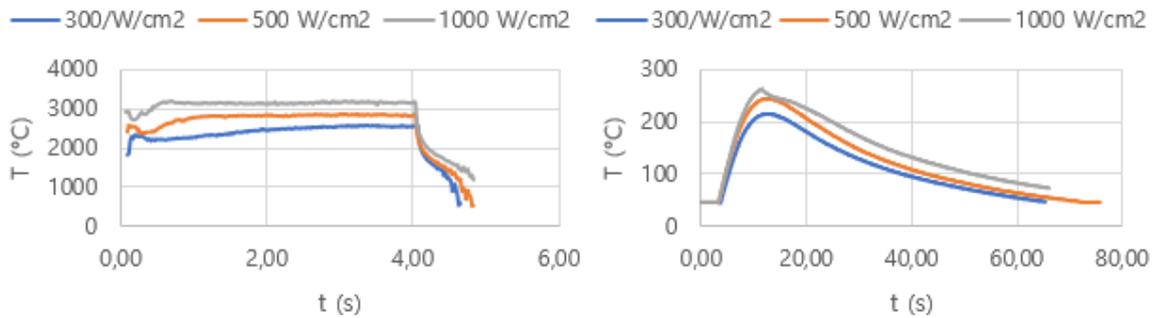


Figure 8 : face avant

Figure 9 : face arrière



Figure 10: échantillon à 500 W/cm²

Dans les trois cas la température n'est pas suffisante pour endommager les fibres de carbone, même si la matrice a brûlé.

Ainsi, pour les lasers embarqués actuels et anticipables aux horizons de l'étude, il n'est pas question de percer la structure d'une cible réalisée en fibre de carbone-époxy comme l'ALTIUS-600M ni même d'ailleurs le fuselage en kevlar-époxy d'un drone Perdix.

Les structures en fibre de verre époxy constituent un cas particulier. Ce matériau est semi-transparent à 1μ ; une partie de l'énergie le traverse et peut provoquer simultanément un effet thermique sur les composants embarqués. Ce type de structure se perce très bien et très vite.

○ LA VULNERABILITE DES DISPOSITIFS ELECTRO-OPTIQUES

Les cibles de référence disposent généralement d'un guidage terminal par voie optique. L'analyse de la vulnérabilité d'un système optronique en bande II (moyen infrarouge, de 3 à 5 μ m), soumis à un rayonnement laser en proche infrarouge est relativement délicat à mener sans connaissance précise des substrats et traitements optiques. En revanche, les caméras à matrice silicium ont des optiques en verre ou en polymères transparents à la longueur d'onde laser. On distingue alors classiquement trois cas de figure :

- Agression « dans le champ » : la pupille du laser est « vue » par la caméra. Le rayonnement laser est alors focalisé sur la matrice du capteur, par l'objectif. Les fluences sont bien au-delà des seuils d'endommagement. Une zone de pixels plus ou moins importante est détruite quasiment instantanément ;
- Agression « hors champ » : le rayonnement laser pénètre dans l'objectif et interagit avec les montures et le diaphragme. Il y a de multiples réflexions internes qui éblouissent le capteur ;
- Agression « hors bande » : un ou plusieurs composants optiques ne sont pas compatibles avec la longueur d'onde laser. Le capteur est généralement ébloui, mais pas nécessairement détruit. En revanche, l'objectif peut être endommagé, si la fluence est suffisante (Figure 11).



Figure 11- destruction d'un objectif, suite à une agression laser hors bande. La monture du capteur, en plastique, est également endommagée. Cependant, la caméra fonctionne toujours (avec un objectif neuf)

A noter que les capteurs à infrarouge sont souvent dotés d'optiques en Germanium qui ne sont pas perméables aux lasers à 1μ .

○ LA TOURELLE

La tourelle orientant le laser conditionne le temps de réaction de l'arme et la stabilité de la tache laser sur la cible. Ce dernier point influe de manière déterminante sur le temps de perçage de la structure visée. Il est donc nécessaire de retenir une tourelle gyrostabilisée deux axes, performante. Au vu de l'état de l'art, on la caractérisera pour l'essentiel par :

- Une vitesse de ralliement de 2 rad/s associée à une accélération de 4 rad/s² (temps de ralliement pour un dépointage maximum inférieur à 1,48s) ;
- Une précision de pointage en poursuite de 12 µrad ;
- Un bruit de poursuite à un sigma de 20 µrad en gisement et de 10 µrad en élévation ;
- Une optronique d'acquisition et de poursuite de la cible performante, en cohérence avec les

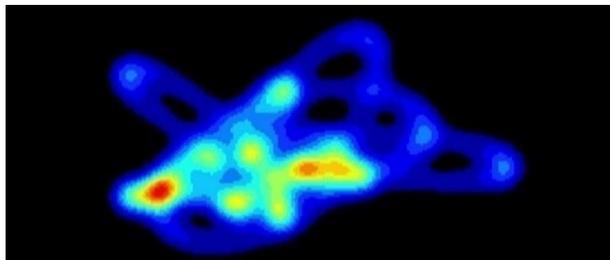


Figure 12-exemple de bruit de poursuite modélisé

exigences précédentes et adoptant une poursuite par enveloppe de contraste ; l'optronique de poursuite ne doit pas être brouillée par la réaction thermique provoquée par l'action du laser sur la structure : ce phénomène, s'il n'est pas maîtrisé, risque d'augmenter considérablement le temps de perçage ; c'est un point clé de ce type d'arme ;

- Une architecture de type « Lyre », 3 axes, alliant stabilité et faibles parallaxes qui seront néanmoins traitées avec le plus grand soin (correction de la parallaxe en temps réel et pondération des écartométries senseurs) ;
- Une prise en compte des conditions d'emploi extrêmes, induites par les mouvements de plateforme, telles que, en angle et période : roulis : 20°/11s, tangage : 4°/5s, lacet : 5°/9s, pilonnement : 1.4 m/3,6°/s ;
- Un champ de battage optimum en site et gisement.

En supposant que la tourelle bénéficie d'une désignation d'objectif tridimensionnelle²⁹¹, ces choix permettent de réduire au maximum le cycle : ralliement, recalage, détection, acquisition, poursuite, augmentant ainsi le seuil de saturation.

Une telle approche permet, pour une cible donnée, d'évaluer de manière réaliste le temps nécessaire à chaque séquence de destruction.

Dans le cadre de l'étude, un programme Scilab a été élaboré à cette fin et a été utilisé, sur la base du scénario et de la menace de référence, pour dérouler des séquences d'engagement réalistes par les armes de référence, tant pour percer les structures des cellules que pour détruire les optiques dans le visible.

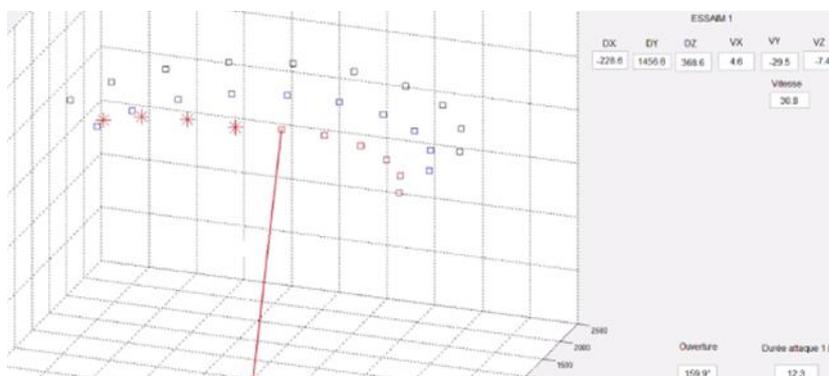
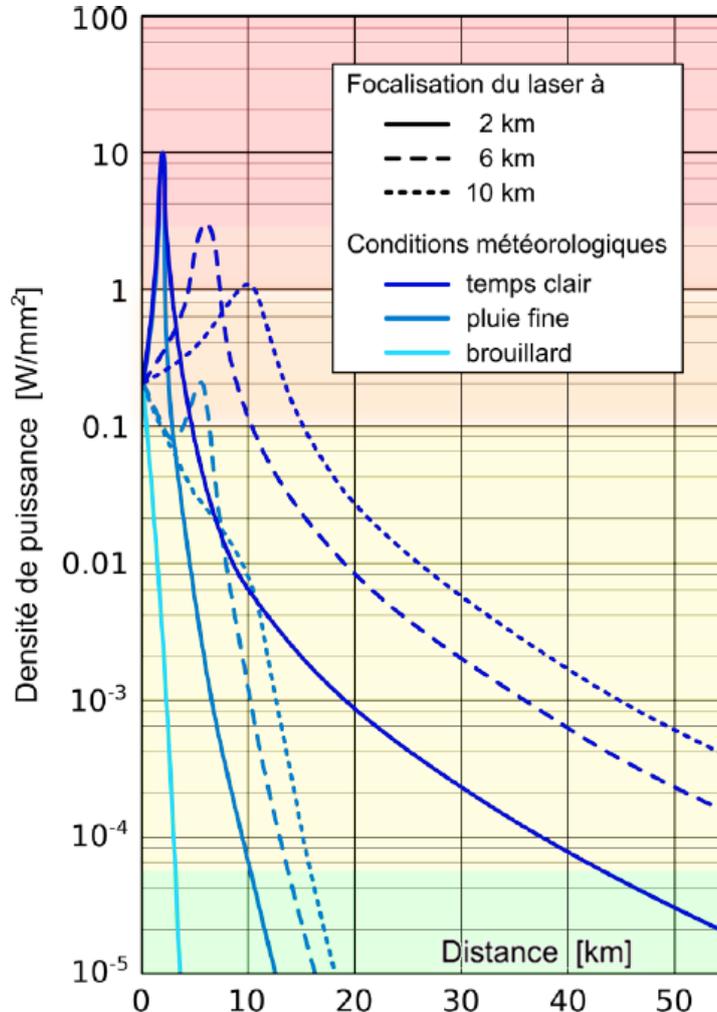


Figure 13 : copie d'écran d'un engagement simulé de la menace de référence

²⁹¹ Pour une DO bidimensionnelle, une phase de recherche est à prendre en compte.

- L'IMPACT DES CONDITIONS ATMOSPHERIQUES

La propagation du faisceau laser dans l'atmosphère est fortement impactée par les précipitations, le brouillard et les aérosols en général. Le graphique suivant, résultat de calculs pour un laser à 30 kW, l'illustre de manière explicite, surtout aux portées les plus importantes ²⁹²:



- EXEMPLE ET ANALYSE D'UNE ARME EMBARQUEE

Au titre des réalisations emblématiques contemporaines, il faut citer HELIOS (High Energy Laser with Integrated Optical dazzler and Surveillance), de Lockheed Martin, déployé sur l'USS Preble de type Arleigh Burke, à la place du Phalanx avant. Cet équipement est susceptible de faire l'objet d'une petite série. De la classe des 60 kW, l'arme est intégrée au système AEGIS.

Si on considère une ouverture estimée à 50 cm, une longueur d'onde $\lambda = 1070$ nm, un facteur de mérite $M^2 = 30$ et une focale à 3 km on aboutit à une tache laser de l'ordre de 25 cm de diamètre à cette distance, soit une densité de puissance de 122 W/cm², clairement insuffisante face à des structures en carbone-époxy. Il faudrait au moins 300 kW pour parvenir à les percer. Les annonces d'une montée en puissance d'HELIOS sont cohérentes avec les mesures conservatoires affichées (150 kW) et les ambitions mises en avant. Au titre de l'intégration, on parle d'une puissance d'alimentation de 400 kW et d'un dispositif de refroidissement de 68 tonnes. On mesure la difficulté que pourrait représenter

²⁹² Aktueller Stand der militärischen Lasersysteme. Rapport pour armasuisse W+T, Rheinmetall Air Defence, Zürich, 2015.

l'intégration de deux armes sur le même navire pour assurer un champ de battage complet. L'accroissement de la puissance unitaire soulève des défis du même ordre.



ANNEXE IV

ARMES HPM : POINTS CLES

Par définition, une arme HPM est une source électromagnétique d'une puissance rayonnée de 100 MW à 100 TW²⁹³, opérant de 1 MHz à 300 GHz (au-delà c'est le domaine des Masers et Lasers). L'agression sera due soit au champ électrique soit au champ magnétique.

- DEUX TYPES D'ARMES TRES DIFFERENTES QUI NE PRODUISENT PAS DU TOUT LES MÊMES EFFETS

Les armes HPM peuvent produire sur les composants électriques et électroniques des effets gradués, suivant une échelle AFRL de 0 à 5, communément admise et reproduite ci-dessous :

5	Domages	- impose le remplacement ou la réparation de l'électronique ou la réinstallation complexe des logiciels (software et/ou firmware)
4	Hors service	- impose une intervention externe (le calculateur ne redémarre pas)
3	Perturbation	- l'équipement réussit à redémarrer seul : le programme en cours s'arrête mais le processeur reprend après un temps de récupération
2	Interférence	- perturbation, uniquement le temps de l'illumination
1	Sans effet	
0	Inconnu ou non observé	

Il faut bien noter qu'il s'agit d'une échelle de laboratoire, destinée à évaluer des effets lors d'essais. En pratique, du point de vue de l'arme, les niveaux 3 à 5 relèvent tous du domaine « hard kill » ; en effet, les seuils pour obtenir un effet 3 sont du même ordre de grandeur que ceux requis pour un effet 4 : la technologie sollicitée est la même, elle est ancienne et requiert des puissances supérieures à 1 GW, pour des durées d'impulsion inférieures à 1 μ s. Toujours du point de vue de l'arme, le niveau 2 relève du « soft kill » : s'appuyant en pratique sur une technologie de brouilleur, il est englobé, par abus de langage, dans les armes HPM, bien qu'ayant recours à des puissances et des formes d'onde très différentes, permises par les technologies qui sont celles des émetteurs radars modernes. Par des effets transitoires, dans le premier cas, persistants dans le second, les deux types d'armes ont pour objet d'abattre le drone, que sa destruction précède ou pas son impact avec la surface. Dans la suite nous parlerons d'HPM « hard kill » pour désigner les premiers et, par abus de langage, d'HPM « soft kill » pour évoquer les seconds. Les premiers cherchent à détruire instantanément l'électronique embarquée, les seconds à perturber les courants des bobines des moteurs d'actionneurs (gouvernes, rotors), le temps nécessaire pour assurer l'impact du porteur avec la planète.

²⁹³ Il s'agit d'une puissance rayonnée dite ERP (Emitted Radiated Power) c'est à dire du produit $P_e \times G_e$ (P_e = puissance intrinsèque du générateur (magnétron, vircator, klystron, machine Flux Compressive Generator (explosif), Générateur de Marx, ...) et G_e = Gain de l'élément rayonnant (ce dernier peut aller de 0dBi (Antenne omnidirectionnelle, donc Gain = 1), à un gain de 50 dBi (rayonnement directionnel, de classe 0.5° d'ouverture en site et en gisement, ce qui conduit à un cercle d'efficacité de 8 m à 1 km). Pour une puissance rayonnée de 100 TW (c'est le maximum de l'état de l'art en 2025-2030), il faut considérer des dimensions d'antenne imposantes (exemples : 10 m x 10 m à 3 GHz et 5 m x 6 m à 9 GHz).

Le tableau suivant éclaire les différences fondamentales qui existent entre les deux armes, afin que les abus de langage et la référence à une échelle commune des effets ne masquent pas la différence radicale qui existe entre les deux types d'armes et leurs effets :

	HPM « Hard Kill » (arme à impulsion)	HPM « Soft Kill » (brouilleur)
Cible agressée	Electronique embarquée	Moteurs d'actionneurs
Temporalité	Instantané et définitif	Transitoire, le temps que dure le brouillage
Rayonnement émis	Impulsion très courte à très forte puissance	Forme d'onde complexe
Directivité	Dans un lobe étroit ²⁹⁴ en pointant une antenne	Dans un vaste volume ou dans des lobes étroits et simultanés (Balayage électronique)
Technologie	Analogique et ancienne	Emetteur radar moderne

Ce ne sont pas les mêmes objets, ce ne sont pas les mêmes effets. Seule la finalité de la lutte anti-drones les rassemble sous le même terme de HPM, qui ne s'applique véritablement qu'au premier.

- MODES D'ACTION, TECHNOLOGIES ET ORDRES DE GRANDEUR

o "FRONT DOOR" & "BACK DOOR": LES COUPLAGES CHAMP ELECTROMAGNETIQUE – CIBLE

Le couplage champ électromagnétique - cible utilise les ouvertures de la structure ou bien passe au travers de la cellule si elle n'est pas métallique (l'utilisation de composite favorise la pénétration de l'onde électromagnétique).

En couplage direct, ou dans la bande, dit « front door », l'onde électromagnétique agressive s'attaque à l'électronique via les ouvertures de l'équipement²⁹⁵ (typiquement les antennes²⁹⁶, les optiques des caméras²⁹⁷), avec pour objectif de perturber, de casser, du composant électronique (typiquement les étages d'entrée) ; idéalement le signal agressif se doit d'être dans la bande passante de l'antenne, sinon il subira des pertes. Le couplage « front door » est aggravé par les émetteurs/récepteurs « état-solide » (technologie AESA), très largement utilisés (téléphones portables, radars, etc.). Avant l'arrivée de cette technologie, les parties « émission » et « réception » pouvaient être séparées, ce qui permettait de protéger les étages récepteurs par des dispositifs comme, par exemple, des « éclateurs » ou des diodes, qui transformaient l'énergie électromagnétique trop intense en courant électrique pour le diriger vers une masse. Cela n'est plus possible aujourd'hui avec les technologies AESA puisque l'antenne, l'émetteur et le récepteur, ne font souvent plus qu'un. A noter que la simple mise en place de grilles sur

²⁹⁴ L'arme HPM a une focalisation moindre que l'arme laser : pour une dimension de l'élément rayonnant de 2m, le faisceau est d'environ 200 m à 2 km.

²⁹⁵ Pour information, une cage de Faraday atténue l'onde électromagnétique de 120 dB. La même cage avec un orifice de 2cm de diamètre n'offre plus qu'une atténuation de 40 dB.

²⁹⁶ Toute antenne est une « porte d'entrée » privilégiée pour les ondes électromagnétiques ; c'est un élément très vulnérable qui permet à l'impulsion électromagnétique de « pénétrer » dans un matériel même si celui-ci est protégé.

²⁹⁷ Idéalement, il faut être dans la focale de la caméra.

des antennes AESA ou sur l'optique de capteurs CCD suffit à les protéger en faisant arquer le champ électrique appliqué.

En couplage indirect, dit « back door », l'onde électromagnétique agressive pénètre dans l'équipement par diffraction et/ou réflexions multiples, pour exciter (voir faire résonner) l'électronique²⁹⁸, en s'attaquant aux boucles (avec le champ magnétique) ou aux fils susceptibles de faire antenne²⁹⁹, afin de générer des signaux parasites, de même niveau que les signaux utiles. Les boucles et fils généralement ne sont autres que les pistes des circuits imprimés, l'ensemble du câblage et les moteurs actionnant les gouvernes ou les rotors. Les cavités deviennent quasiment des antennes et donc des récepteurs de l'onde ; des résonances peuvent se produire selon les dimensions des cavités.

Théoriquement, les armes HPM « hard kill » sont classées en deux types : Bande étroite (BE) ou large bande (LB). Selon les types, les bandes émises sont plus ou moins larges et plus ou moins accordables. Le type BE serait plus orienté attaque « front door » alors que le type LB serait adapté à une agression en « back door » (recherche de couplage).

En pratique, les puissances nécessaires pour obtenir l'un ou l'autre effet sont comparables : le surcroît d'énergie nécessaire en « back-door » est compensé par la protection des composants attaqués en « front door » : les ordres de grandeurs sont identiques. Bien sûr, l'agression HPM est facilitée par une électronique « front door » sans protection.

○ ETAT DE L'ART

▪ POUR DES EFFETS « HARD KILL » DE NIVEAU 3 A 5

La génération d'une impulsion de forte puissance est nécessaire à ce type d'arme HPM pour :

- exciter l'électronique en dehors de son fonctionnement nominal par génération d'un spectre large pour attaquer toutes les entrées possibles : effet obtenu par une impulsion³⁰⁰ courte et un front montant raide ;
- vaincre les pertes de propagation, dans l'atmosphère, ce qui nécessite une forte puissance crête ($P_e \times G_e$), et dans l'équipement, ce qui requiert à la fois de très forts champs (en V/m) et de l'énergie (en Joule). A ce titre, plus la distance augmente, plus la pluie compromet fortement l'efficacité de l'arme.

Les technologies connues pour réaliser ce type d'impulsion sont les suivantes :

- Générateurs de Marx (décharge rapide de condensateurs, pour une tension de sortie de 50 kV à 1 MV)³⁰¹,
- EPFCG (Explosive Pumped Flux Compressive Generator³⁰²) : charge explosive, et donc « one

²⁹⁸ Du fait de la miniaturisation électronique (moins d'électrons pour commuter (aujourd'hui gravure à 3 nm pour une grille, soit 30 atomes, nécessitant des tensions d'alimentation en baisse, proches de 0.5 V)), les composants sont plus sensibles au couplage électromagnétique dont la surtension risque davantage de perturber le fonctionnement ou d'endommager les composants électroniques.

²⁹⁹ Une grande part du câblage externe n'est pas protégée : fils ou pistes en l'air (le fil du reset reste souvent en l'air, formant une excellente antenne) et boucles (un fil lové en boucle traversé par un champ magnétique va générer une force électromotrice qui peut être parfois du même ordre de grandeur que les signaux utiles (quelques V)).

³⁰⁰ Pour des raisons de rendement thermique et de besoin en énergie primaire il est impossible de rayonner de telle puissance en continu.

³⁰¹ N Capacités, décharge synchronisée via des éclateurs => durée de vie ou nombre d'impulsions limités (Il existe de multiples variantes mais ce principe est limité en nombre d'impulsion (usure). 50 kV à 1 MV. Volume H= 40 cm D=10 cm. Autre variante : bobines supraconductrices permettant de transformer le courant continu (batterie) en une impulsion de 50 kV à 1 MV.

³⁰² 100 MJ (c'est 100 000 fois l'énergie d'une impulsion Vircator (technologie à tubes) mais sans aucune directivité).

shot », sous faible volume (obus, grenade), et permettant de générer des champs de 1000 Teslas³⁰³ ;

- Générateurs à tube (technologie dérivée du radar³⁰⁴ : magnétron³⁰⁵, vircator ((VIRtuel CATHode oscillatoR)³⁰⁶, klystron, ...)

▪ POUR UN EFFET « SOFT KILL » DE NIVEAU 2

Cette approche relève du brouillage non-linéaire adapté. La technologie sollicitée pour réaliser ce type d'effet recourt à des modules d'émission à état solide, analogues à ceux qui composent les radars AESA³⁰⁷. Les formes d'onde transmises sont sophistiquées et bénéficient très certainement de nombreux essais et mises au point. Elles se basent très probablement sur des signaux de brouillage à code de phase, afin de perturber la rotation des moteurs actionnant les gouvernes d'un drone à voilure fixe ou les rotors d'un multicoptère. Cette technologie récente est la moins documentée pour ce qu'elle a d'innovant et qui relève de la forme d'onde ; elle est bien connue pour le reste. Indépendante du type de drone, son mode d'action ne semble pas devoir être remis en cause par d'éventuels nouveaux procédés de construction des drones³⁰⁸. Elle présente l'avantage d'assurer également détection et pistage de la menace puis de contribuer à l'évaluation de la destruction des cibles.

▪ COUPLES ARMES - PORTEURS

Poids, volume, consommation, compatibilité électromagnétique sont très variables selon la technologie et l'effet recherché. Armes et porteurs constituent donc des couples à optimiser :

- pour un usage à terre, avec un besoin de répétitivité, on trouvera :
 - pour un effet 3 à 5 : de gros générateurs et de grandes antennes de rayonnement pour compenser la propagation ;
 - pour un effet 2, uniquement, compte tenu de la faible puissance requise (de la classe de celle des radars), la technologie d'antenne et d'émetteur sera celle des radars : des générateurs compacts, à base de modules à état solide et à balayage

³⁰³ Soit $H = B/\mu \Rightarrow H \sim 1000 \text{ A/m}$ et $E \sim 300\,000 \text{ V/m}$: valeur typique d'un orage.

³⁰⁴ L'origine de l'arme HPM est la recherche d'impulsions courtes dans le domaine radar, afin d'acquiesir une meilleure résolution en distance. Aujourd'hui, ce besoin est couvert par la compression d'impulsion et les FM/CW. Les radars s'orientent donc vers des émetteurs état solide dit AESA (Silicium, AsGa ou GaN : puissance, pour 1000 modules : $\sim 10 \text{ MW}$). Mais, à l'origine, les radars ont utilisé une multitude de technologies d'émetteurs (magnétron, klystron, tube à onde progressive (TOP), gyatron, carcinotron, ...). La performance recherchée n'était pas la puissance crête mais de multiples critères (spectre, puissance moyenne, ...). C'est le besoin de forte puissance d'une arme HPM qui a amené à réutiliser ces émetteurs, voire à créer de nouveaux tubes (à résonance, relativiste, ...). Par exemple, le klystron radar était de classe 10 à 30 MW ; en utilisation HPM il est proche de 200 MW en bande S et de 100 MW en bande X (les performances sont optimisées pour la génération d'impulsion courte). Ce type d'émetteurs est toujours conséquent : 4 à 5m, 500 kg. En pratique, ce type d'arme HPM incorpore des technologies complexes : alimentation THT ($> 500 \text{ kV}$), canon et collecteur à électrons (forte puissance), tube à vide et un ensemble de circuits RF de très forte puissance (guide d'onde, circulateur, antenne).

³⁰⁵ Magnétron relativiste : P_e de 4 GW (10 GHz) à 10 MW (300 GHz), impulsion $< 1 \text{ kJ}$.

³⁰⁶ Vircator de 1 à 10 GHz avec $P_e \sim 1$ à 2 GW (c'est la technologie la plus prometteuse à moyen terme). Avec des impulsions $< 1 \text{ kJ}$. L'objectif 2025 _2030 pour la technologie vircator est 1 GW, 1 μs , 1 kJ (chiffres clés). A ce jour, aucune source n'a pu générer ces chiffres. Parfois, P_e dépasse 1 GW mais la puissance transmise dans le pulse est nettement inférieure à 1 kJ. A moins de 3 GHz, l'état de l'art est celui de la DARPA, avec le successeur du vircator, le reditron : 2.5 GW, 6 % d'efficacité, 30 ns d'impulsion (impulsion un peu courte), et l'aurora reflex-diode HPM, source pour la production d'impulsions de 400 J en 100 ns, en-dessous de 1GHz.

³⁰⁷ Un brouillage de perturbation HPM non permanent (effet 2), avec une puissance de 10 MW (sur une base de 1 000 modules actifs à état solide de 10 W chacun), peut être efficace à une distance d'un kilomètre (on est dans l'échelle d'un radar de Rafale, soit une antenne de 60cmx60cm). Une précision de pointage à 0,5° y est associée.

³⁰⁸ Les actionneurs d'un « Active Flow Control » ont une vulnérabilité analogue.

électronique, pour garantir une capacité multi-menaces. ;

- pour un bâtiment de surface il y a un besoin de répétitivité, une forte suggestion de compatibilité électromagnétique³⁰⁹, une moindre contrainte d'énergie primaire et de volume : on retiendra uniquement des armes susceptibles de produire l'effet 2, dotées d'antennes planes de taille acceptable, intégrées à la structure ou montées sur tourelle ;
- pour un missile de croisière destiné à produire un effet 4 à 5, les fortes contraintes d'emport conduiront à un générateur de petite taille et surtout à un élément rayonnant à faible encombrement, voire à nombre d'impulsions limité ;
- pour un obus de gros calibre ou une « grenade », seuls les effets 4 et 5 sont visés, pour un tir unique ;
- pour un drone aérien de petite taille on retiendra, soit la même approche « one shot » pour des effets 4 et 5, soit la recherche d'un effet 2 renouvelable, en proximité immédiate de la cible visée.

Le paragraphe suivant liste quelques réalisations emblématiques.

o ORDRES DE GRANDEUR, CONTRAINTES ASSOCIEES, EXEMPLES

▪ POUR DES EFFETS DE NIVEAU 3 A 5

La densité surfacique de puissance, S, s'établit de la manière suivante :

$$S = \frac{E^2}{Z} = \frac{Pe \times Ge}{4\pi D^2} \text{ avec } Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

où μ est la perméabilité magnétique

et ϵ est la permittivité diélectrique

Pour une attaque Front Door, où l'agression a lieu par les antennes et l'objectif consiste à détruire les étages d'entrée, la saturation par agression permanente n'est pas envisageable. La saturation de la chaîne pendant la durée de l'impulsion (maximum 1 μ s toute les ms) va nécessiter un temps de récupération pour la réception, cependant celui-ci reste très faible (typiquement 1 μ s) devant la période

³⁰⁹ Sur un navire, au vu de l'état de l'art, il est envisageable d'obtenir, par exemple, une isolation de 80 dB (ce chiffre correspond à deux antennes qui se regarderaient dans les lobes diffus à 100 m de distance, sans écran de protection ni diffraction sur des arêtes (un masque ou bouclier permet de gagner 15 à 20 dB environ) ; à ce chiffre, très grossier, il faut ajouter la présence d'ondes dite rampantes et des trajets multiples très complexes (exemple réflexions sur une antenne tournante, sur l'hélicoptère en plage arrière, ...). En conséquence, à première vue, une émission HPM de 1 GW, soit 90 dBW, n'inflige alors que 10W maximum à l'autre antenne (valeur acceptable pour des antennes RESM : en effet, une impulsion allant de 100 ns à 1 μ s ne détruit pas les diodes de protections, qui protègent à environ 1 kW (sous réserve, bien sûr, que toutes les antennes soient protégées par des diodes ou des éclateurs (à noter que les nouveaux radars AESA (à modules état solide AsGa, Gan ou Si) n'ont pas de diode de protection (pertes d'insertion trop importante,...), et, donc, les niveaux maximaux admissibles en entrée sont beaucoup plus faibles)). L'impulsion HPM étant très courte, le taux de désensibilisation est quasi nul (le blanking devrait être de l'ordre 1 μ s par ms, en considérant le temps pour désensibiliser les chaînes). On pourrait presque considérer la comptabilité électromagnétique comme atteinte. En pratique, elle ne serait que très difficilement modélisable en phase de conception, une telle puissance d'un GW n'ayant jamais été approchée sur un navire. Il faudrait faire une étude de compatibilité très complexe sur la base d'un modèle de CAO du navire (notamment pour prendre en compte les ondes rampantes et les multi-trajets mais aussi les différentes configurations (hangar hélicoptère ouvert/fermé etc...)). Une telle modélisation est très compliquée et n'est maîtrisée que par de très rares entreprises ; elle s'étalerait sur des années. Il faut en effet résoudre les équations avec une amplitude de chiffres de 120 dB entre les puissances émises et celles reçues par les autres antennes ; 120 dB, soit 12 zéros après la virgule et ce pour de multiples configurations. Les résultats, difficilement modélisés, ne pourraient être validés qu'in situ. La prise de risque devient alors très importante et l'incertitude domine.

de répétition de l'arme HPM (typiquement 1ms) : le traitement n'en sera que faiblement perturbé. Il faut donc détruire l'étage d'entrée.

Pour une attaque Back Door, exploitant une ouverture pour attaquer l'électronique du vecteur, la perturbation générée doit être de l'ordre de grandeur des signaux (la perturbation s'additionnera (se superposera) avec le signal). Les deux exemples ci-dessous en illustrent les effets :

- Exemple 1, effet du champ magnétique : la boucle de courant traversée par un flux magnétique H va générer une tension parasite e.

$$e = \mu \times S \times \frac{dH}{dt}$$

Pour : H = 1 A/m, dt = 10 ns , S = 10 cm² (boucle typique d'un petit circuit imprimé).

Le niveau d'agression est de : e = 1.2 Volt (soit une agression identique à un signal utile).

Le champ électrique équivalent est de : $E = Z \times H = 377$ Volts/m

A ce champ électrique E, il faut rajouter les pertes de propagation dans l'UAV (le champ électrique se propage par diffraction sur de multiples obstacles (pertes de 10 à 15 dB pour des obstacles simples)). En conséquence, un champ électrique de l'ordre 5000 V/m peut être considéré comme suffisant pour rendre non opérationnel l'UAV et nous considérerons qu'un champ de 20 000 V/m l'endommagera définitivement.

- Exemple 2, effet du champ électrique sur la piste ou un fil qui fait antenne d'une longueur de quelques centimètres. La longueur d'onde du HPM est aussi de quelques centimètres. En conséquence, le gain de l'antenne « parasite » peut varier de 0 à - 20 dBi selon les orientations et ceci avec des impédances très variables. A titre d'exemple, considérons un gain effectif de - 20 dBi (donc une faible valeur), soit une surface équivalente Sa, à 1 GHz, de 10⁻⁵m².

Supposons que pour perturber la fonction reset, le besoin soit de 0,5 V sur 50 ohms. La puissance est de $Q = U^2/R = 0,01$ W.

Le champ Electric agresseur $E^2 = (Z \times Q)/Sa$.

En application de la formule, la puissance reçue par l'antenne (la piste du reset) est :

$$\frac{E^2 \times \text{Surface effective de l'antenne}}{Z}$$

Soit E ~ 1000 V

La tension à la sortie de la piste est d'environ 0.5 V, tension susceptible de reseter l'électronique.

Dans les deux exemples, les ordres de grandeurs sont donc identiques.

D'autres chiffres méritent d'être pris en considération comme ordre de grandeur :

Exemple 3, lors d'essais nucléaires dans le pacifique, des appareils électroniques domestiques furent détruits et une compagnie de téléphone perdit une partie de son réseau filaire et hertzien. La bombe atomique généra, en cette occasion, un champ d'une intensité d'environ 6000 V/m au sol sur les lieux des dommages.

Exemple 4, un orage se caractérise par des tensions typiques de 20 000 V/m avec des crêtes à 300 000 V/m (les tensions de claquage dans l'air sont de 3 600 kV/m).

Exemple 5, une clôture électrique (10 000 V, 2 Joules, impulsion de 1 µs) détraque l'allumage d'une débroussailleuse quand celle-ci passe sous le fil à environ 1 m), mais l'action n'est pas destructrice.

Exemple 6, l'arrêt d'un PC (Pentium III) peut être provoqué par une tension de 5 à 15 kV/m, selon la forme d'onde et le spectre associé.

▪ POUR UN EFFET DE NIVEAU 2

Pour une agression par brouillage non linéaire adapté visant les moteurs de sustentation ou de commande de gouverne on peut approcher le sujet à travers l'effet produit sur une spire dans un des électro-aimants du rotor d'un tel moteur électrique :

Valeur typique du courant alimentant un moteur brushless pour drone : $I = 0.1 \text{ A}$.
En conséquence le champ $H = I / 2R$ avec R , rayon de la spire, valant 1 cm .

Donc $H = 5 \text{ A/m}$

Une arme de classe 10 MW à 1 km va générer : $E \sim 20 \text{ V/m}$ ou $H \sim 0,05 \text{ A/m}$ dans toutes les spires (avec des variations d'angle) de tous les électroaimants, y compris ceux qui ne sont pas alimentés dans le moteur, provoquant une perturbation des moteurs et par conséquence également de l'autopilote.

Pour un drone ayant recours à la même technologie à 10 m de sa cible, la puissance nécessaire serait d'environ 1 KW (soit 10 modules de 10 W).

▪ SEUILS ASSOCIES AUX DIFFERENTS EFFETS

En conclusion, en matière de vulnérabilité des drones on retiendra les valeurs de seuil de :

- quelques 10 V/m^{310} pour une interférence visant actionneurs de gouvernes ou moteurs de rotors durant le temps d'illumination ;
- $10\,000 \text{ V/m}$ pour une mise hors service ou une perturbation plus ou moins rémanente de l'électronique embarquée ;
- $20\,000 \text{ V/m}$ pour une destruction de l'électronique embarquée.

- QUELQUES REALISATIONS EMBLEMATIQUES

Tous milieux confondus, un rapide panorama de quelques réalisations de référence permet de se faire une idée des points de fonctionnement visés, des facteurs de forme et de poids. Rien qu'aux Etats-Unis, la recherche sur les armes micro-ondes de forte puissance s'étale sur une soixantaine d'années, privilégiant, il est vrai, les effets 4 et 5.

○ POUR DES EFFETS « HARD KILL » DE NIVEAU 4 ET 5

Ranets E (Russie 2000) : HPM monté sur camion, avec une impulsion de 10 ns . (soit, $P_e = 10 \text{ MW}$ et $G_e = 50 \text{ dBi}$ environ, soit, au mieux, quelques TRW).



³¹⁰ L'AFRL considère qu'un premier seuil perturbant est atteint à 200 V/m : Hardening Unmanned Aerial Systems against high power microwaves threat in support of forward operations, Coningsby J Burdon, 2017. La technologie d'Epirus prouve que des seuils plus bas, exploitant d'autres technologies, permettent d'obtenir un effet décisif sur les commandes de vols.

ADS (Active Denial System) (USA 2008) : Gyrotron $P_e=100\text{kW}$ et $G_e= 50 \text{ dBi}$ (au moins). A 96 GHz , la portée spécifiée est de 500 m . Pour un champ électrique de $10\,000 \text{ V/m}$, les calculs donnent 100m . Il vise une utilisation anti-mines ou, surtout, comme le Ranets, pour contenir les foules (à 96 GHz des échauffements de la peau se produisent).



Radars AESA d'avion : efficacité à 100 m pour une action destructrice, selon la DARPA, sur la base d'un $P_e \times G_e$ de classe 10 MW , ce qui donnerait une distance efficace d'environ 10 m et, en tous cas, inférieure à 100 m .

CHAMP (Counter-electronics High Power Microwave Advanced Missile Project) (USA 2012) (Boeing) : il s'agit d'un missile AGM-86 modifié qui, une fois largué, poursuit une trajectoire définie à basse altitude (100 m environ³¹¹), en survolant ses objectifs. Il est équipé d'une arme HPM à vircator, d'une $P_e \times G_e$ de 70 GW ($P_e = 100 \text{ MW}$ et gain d'antenne de 15 dB). Il aurait une capacité de 100 impulsions (sans doute limitée par l'usure du générateur de Marx, associé au vircator, et des éclateurs). Il est perdu par autodestruction. Dans la continuité de CHAMP, la perspective d'une version HPM du JASSM-ER³¹², voire d'un missile hypersonique doté de cette technologie, a été évoquée. En pratique, la charge HPM **HIJENKS**³¹³ capitalise sur CHAMP pour aboutir à un essai de synthèse à l'été 2022.



A la suite de CHAMP la DARPA a demandé à Raytheon de travailler sur la réduction de poids et de volume (voir projet **THOR**) et sur les aspects systèmes (voir projet **PHASER™**).

THOR (Tactical High power Operational Responder) (USA 2019) (BAE Systems)

C'est un « compactage » de CHAMP, avec pour objectif 300 kg et 100 litres en 2030 (hors élément rayonnant, certainement). THOR a été déployé à l'étranger, pour y être testé en situation réelle par les militaires américains. A l'issue de cette année de tests, annoncés comme réussis, il trouve une suite à travers le projet **Mjölnir**, porté par Leidos, et qui, pour un financement de $26 \text{ moi } \$$, a l'ambition d'accroître la puissance de 50% à l'horizon 2024 (c'est à dire de passer d'une distance efficace de 2 km à $2,5 \text{ km}$).



³¹¹ Avec 70 GW de puissance rayonnée, la distance efficace (pour $E= 10\,000 \text{ V/m}$) est d'environ 150 m , ordre de grandeur compatible avec une altitude de vol de 100 m .

³¹² Joint Air to Surface Stand Off Missile Extended Range.

³¹³ High Power Joint Electromagnetic Non-Kinetic Strike (programme conjoint USAF-US-Navy qui s'attache davantage à la charge qu'au vecteur, sans pour autant perdre de vue la cible du JASSM).

PHASER™(USA) (Raytheon): projet dont l'émetteur est le THOR, avec pour objectif de démontrer la possibilité de coupler poursuite et rayonnement, l'antenne rectangulaire est l'antenne de poursuite (en bande X certainement). Ceci permet d'évaluer la précision d'écartométrie : 0,1° environ, ce qui est compatible d'une ouverture de classe 1°. Le gain de l'antenne d'émission (cercle de 2 m de diamètre) donne une ouverture de 1° à 2°, selon la bande.



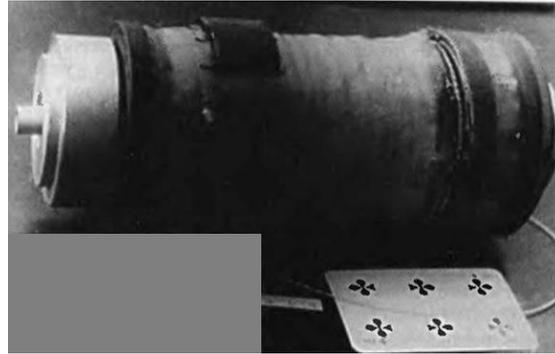
High-Power-Electro-Magnetics (HPEM) (Allemagne) (Diehl): Diehl a développé des sources HPM (générateur de Marx et oscillateur) dans des bandes supérieures à 1 GHz. Elles sont portables (voir photo). Les puissances générées vont de 50 kV (photo ci-contre) à 1 MV pour une station sol. Ici, le champ est de 50 000 V/m à 2 m, ce qui permet de stopper un véhicule à 10 ou 20m. A noter que le boîtier fait cage de Faraday pour préserver l'électronique lors des tirs.



MORFIUS de Lockheed Martin (MOBILE Radio Frequency-Integrated Unmanned aerial systems Suppressor), est basé sur l'emport d'une charge HPM par une version allongée du drone ALTIUS-600 ou un drone Coyote de Raytheon. C'est installé sur le premier de ces deux vecteurs, que MORFIUS a participé aux démonstrations et tests du programme terrestre MFP (Mobile Force Protection) de la DARPA. La puissance rayonnée est de 1 GW (dont 10 dBi de gain d'aérien). La charge HPM pèse 3.2 kg dans un volume cylindrique de 150 mm de diamètre et 180 mm de hauteur : c'est l'équivalent miniaturisé du HPM de Diehl. Pour sa mise en œuvre il faut diriger l'axe de l'antenne vers la cible et s'en approcher à moins de 50 m. La charge utile est réutilisable ; le nombre de coups est limité par la batterie, sans doute une dizaine. A l'image du Diehl, et pour ne pas être impacté par les émissions HPM, l'électronique embarquée est très probablement enfermée dans une cage de Faraday dont les ouvertures, notamment de refroidissement, sont fermées le temps de l'émission (cette solution n'est pas transposable à un drone assaillant qui ne peut anticiper le moment où il sera exposé au HPM).



Autres réalisations : pour l'Institut franco-allemand de Saint-Louis, une munition de 155 mm ; pour La Russie, ATROPUS, une grenade dont l'explosion libère une énergie de 1 MJ pour une efficacité dans un rayon de 400 m, selon les spécifications, 500 m par le calcul. Dans les deux cas, l'explosion écrase un solénoïde ; le flux magnétique étant conservé le champ magnétique devient considérable (supérieur à 1000 Teslas) et son rayonnement dans l'axe du solénoïde bénéficie d'un gain, très faible, mais réel. Si l'effet « hard kill » est effectif à quelques centaines de mètres, des perturbations sont attendues dix fois plus loin.



○ POUR UN EFFET « SOFT KILL » DE NIVEAU 2

Leonidas d'Epirus : il s'agit, pour la version terrestre, d'un produit et d'un projet pour la version navalisée³¹⁴. Un prototype vient d'être financé pour l'US Army à hauteur de 66 mio\$. Leonidas est à la fois un radar et un brouilleur, réalisé autour d'une antenne AESA (1000 modules actifs GaN (Nitrure de Gallium), pour une puissance rayonnée autour de 50 MW qui a sans doute des effets à plusieurs kilomètres. Le système assure également la détection et le pistage des drones. Ce concept est davantage en ligne avec les contraintes de compatibilité électromagnétique d'un bâtiment de surface. Il doit être en mesure de traiter plus de 20 drones simultanément, voire 30 ou 50. Il est adapté à tous les types de drones, au regard des technologies actuellement mises en œuvre et anticipables pour assurer la stabilité et les évolutions des drones.



Teledyne propose le RF SafeStop (photo ci-contre), qui est décliné en version navale et qui émet à une puissance de l'ordre du MW, sans doute pour une portée d'environ 100 m. Il s'agit là d'une impulsion HPM et non d'un brouillage. Il n'y a pas de destruction, compte tenu du niveau rayonné.



³¹⁴ La réflexion des signaux sur une mer peu agitée pourrait engendrer des trous de propagation atmosphérique épargnant les drones qui y seraient situés. Des moyens de compenser ce phénomène existent (agilité de fréquence par exemple). C'est un point de vigilance de la navalisation.

Leonidas Pod d'Epirus applique sa technologie de modules GaN à l'emport par un drone réutilisable (ici un quadcopter) pour agir de la même manière contre les drones assaillants. On peut considérer une puissance autour d'1 kW et une efficacité de l'ordre de 10 m.



○ QUELQUES REPERES

En conclusion, on peut donner les ordres de grandeur suivants qui, s'ils sont un peu simplificateurs, donnent de bons repères et reflètent bien les réalisations emblématiques évoquées précédemment :

Effet recherché	Ordre de grandeur des portées maximales	Ordre de grandeur des PIRE ³¹⁵ à générer
3 à 5	Kilomètre	10 TW
	Centaines de mètres	100 GW
	Dizaines de mètres	1 GW
2	Kilomètre	10 MW
	Dizaine de mètre	1 KW

Ces chiffres restent valables aux deux horizons de l'étude : ils reflètent des limites physiques.

- UNE VULNERABILITE SIGNANTE

A noter, qu'à terre, la vulnérabilité des équipements électroniques à l'arme HPM s'obtient en lecture directe lors d'un survol aérien ou satellite : la densité des ondes électromagnétiques issues d'un poste de commandement est à la fois une signature, qui le localise et l'identifie, mais aussi un marqueur de son niveau de vulnérabilité dans le domaine. Ça ne dit rien du caractère « front door » ou « back door » de la vulnérabilité, mais celle-ci est réelle et exploitable. La guerre en Ukraine, illustre parfaitement cette vulnérabilité des postes de commandement³¹⁶. A la mer, les navires de guerre sont tout aussi signants ; les installations sont plus soignées qu'à terre mais, on l'a vu, pas nécessairement moins vulnérables.

³¹⁵ Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) EIRP en anglais : puissance rayonnée dans la direction de l'antenne où la puissance émise est maximale.

³¹⁶ On se référera utilement à l'article « The graveyard of command posts, what Chornobaivka should teach us about command and control in large-scale combat operations », Lt. Gen. Milford "Beags" Beagle, U.S. Army, Brig. Gen. Jason C. Slider, U.S. Army, Lt. Col. Matthew R. Arrol, U.S. Army, Military Review Online Exclusive, mars 2023. Article dont l'image est extraite.



Image satellite de la signature électromagnétique d'un PC de brigade

Une telle carte peut être élaborée à la volée, par un capteur défilant³¹⁷, puis rapidement exploitée pour une frappe HPM. L'exploitation « en edge » du capteur de guerre électronique est tout à fait réaliste, d'autant qu'aucune identification des émissions n'est nécessaire : leur densité est suffisamment parlante et, dans le contexte, signe une exploitation militaire du spectre électromagnétique qui peut être directement interprétée par la machine. On est typiquement dans un fonctionnement d'essaim hétérogène et l'arme est non létale.

³¹⁷ Typiquement, une telle carte peut être obtenue en exploitant un capteur aéroporté d'une précision, tout à fait classique, de 1°RMS depuis une position à 100 km du PC ciblé. Elle peut être découpée par bandes pour dégrossir les fonctions des émetteurs. Le pod NERO (Network Electronic warfare Remotely Operated) de Raytheon, qui peut équiper les MQ-1C, est représentatif de l'état de l'art des capteurs de guerre électroniques susceptibles de rendre ce type de service. Il est possible que l'approche décrite soit dérivée ou connexe des efforts conduits pour localiser les IED (Improvised Explosive Device) commandés à distance, principalement au moyens de téléphones portables.

ANNEXE V

EFFET THERMIQUE SUR L'ELECTRONIQUE EMBARQUEE

L'agression thermique des composants électroniques à distance par une onde électromagnétique est évoquée ici à travers un exemple dimensionnant, afin de donner des ordres de grandeur et d'expliquer ainsi les raisons qui poussent à écarter cette approche pour traiter la menace des essaims de drones.

On considère une carte électronique classique : d'une surface de 100 cm² (10x10 cm) consommant 100 W qui doivent être évacués vers l'extérieur pour assurer son bon fonctionnement (c'est particulièrement critique pour les points chauds de la carte : gros boîtiers FPGA, BGA par exemple). Pour parvenir à évacuer ces 100 W de chaleur, la carte peut utiliser la convection (dans l'air, par exemple au moyen de radiateurs sur les gros boîtiers), la conduction (la carte peut renvoyer la chaleur vers la carcasse du drone), le rayonnement. Profitant de la vitesse du drone, la convection sera le mode principal, ce qui conduira à intégrer au design des entrées d'air qui seront autant d'accès pour les ondes électromagnétiques. Sur cette base de 1 W/cm², on peut raisonnablement considérer que les boîtiers électroniques n'ont pas de marge thermique. Donc, si l'arme apporte une contribution thermique de la classe des 1W/cm² pendant 1 s³¹⁸, les jonctions électroniques vont « brûler » car le drone sera privé de sa convection « naturelle ».

Pour apporter 1 W/cm² pendant 1 seconde à 1 km (c'est-à-dire déposer 1 Joule à la surface du boîtier), trois armes peuvent être considérées, à titre d'exemple :

- Une arme de 10 TRW avec une durée d'impulsion de 100 ns, répétable toutes les ms : la densité de puissance est de 10⁶ W/m², le champ électrique de 20 000 V/m, la chaleur déposée de 10 J. L'électronique embarquée est immédiatement détruite par le champ électrique appliqué, et en 1s par l'effet thermiquement : l'effet thermique est bien au rendez-vous mais il est postérieur à la destruction par surtension.
- Une arme de 10 GW avec une durée d'impulsion de 100 µs, répétable toutes les ms : la densité de puissance est de 10³ W/m², le champ électrique de 700 V/m, la chaleur déposée de 10 J. Il n'y a pas de destruction par le champ électrique mais l'électronique "brûle" après 1 seconde d'illumination. Il faut une onde de 100 µs/ms pour 10 J déposés, de 10 µs/ms pour 1 J déposé ; par ailleurs, il faut rester 1 seconde sur la cible. Pour y parvenir, il faudrait assembler 10 000 modules GaN environ, soit une antenne carrée de 5mx5m, ce qui semble déraisonnable à bien des points de vue.
- Une arme d'une puissance de 10 MW (équivalent du Leonidas d'Epirus Inc) avec une durée d'impulsion de 100 µs, répétable toutes les ms : la densité de puissance est de 1 W/m², le champ électrique de 20 V/m, la chaleur déposée de 0,01 J. L'électronique reste intacte, même en onde continue (CW).

On le voit, l'effet thermique est soit postérieur à l'effet de surtension, soit obtenu au prix d'installations énormes et coûteuses qui ne sont ni réalistes ni matures. Il est donc sans intérêt au titre de cette étude.

A noter, qu'à travers une structure en fibre de verre époxy, un laser à 1 µ applique rapidement un effet thermique sur les composants situés en arrière de la paroi traitée car ce matériau est semi-transparent à cette longueur d'onde. Il s'agit d'un cas trop particulier pour être exploité (drone confectionné dans ce matériau et électronique critique derrière la tâche laser) ; cependant, ce phénomène peut expliquer la chute plus rapide qu'anticipée de certains drones soumis à un tir laser.

³¹⁸ Une carte électronique peut éventuellement se mettre automatiquement à l'arrêt en cas de surchauffe mais la brièveté de l'agression thermique ne lui en laisse pas forcément le temps et dans tous les cas l'objectif est atteint.