

Enjeux et défis de cybersécurité des drones aéroterrestres, robots humanoïdes civils et militaires

SEMINAIRE ARISTOTE – ECOLE POLYTECHNIQUE

Jeudi 29 janvier 2026

Thierry Berthier

CREC Académie Militaire de Saint-Cyr Coëtquidan - Drones4Sec & ALM MECA

« Enjeux et défis de cybersécurité dans les révolutions robotiques civiles et militaires en cours »

Thierry Berthier

Résumé : La montée en puissance de l'Intelligence Artificielle en général et de l'IA générative en particulier a tendance à masquer la révolution en cours portée par la robotique. Qu'elle soit civile, industrielle ou militaire, la robotique se développe à grande vitesse et s'apprête à modifier l'ensemble des activités humaines.

D'un point de vue militaire, la guerre d'Ukraine est devenue la première guerre des drones de l'histoire humaine avec l'émergence d'une zone de 40 km de large le long de la ligne de front, devenue « invivable » pour le combattant humain. Cette zone totalement transparente est occupée par des drones aériens aéroterrestres qui opèrent en ne laissant aucune chance aux combattants humains. L'environnement brouillé par les belligérants impose de plus en plus d'autonomie dans les systèmes robotisés avec des capacités de déplacements et de ciblage sans liaison avec la base terrestre (gnss denied, gps denied). Ces systèmes robotisés offrent des surfaces d'attaques cyber plus ou moins importantes et deviennent des cibles cyber de première importance.

D'un point de vue civil (et militaire), la révolution de la robotique humanoïde accélère induit le déploiement rapide des premiers robots humanoïdes chinois opérationnels, en soldats sentinelles le long de la frontière entre la Chine et l'Inde. En version civile, ces robots humanoïdes chinois (UNITREE H1 et H2) sont déployés dans les Dark Factory chinoises pour remplacer les ouvriers humains. Là aussi, les enjeux de cybersécurité sont majeurs. Enfin, on estime que chaque foyer américain possédera, à courts termes, entre 2 et 3 robots humanoïdes domestiques, bons à tout faire à la maison (courses, bricolages, gardiens, jardinier, éducateur, etc...). On imagine alors sans peine les risques de cybersécurité liés à ces systèmes déployés au plus près des humains.

PARTIE I

Tendances et évolutions du combat de haute intensité

L'intensité du combat

$$I = \frac{E}{S * T}$$

Par ailleurs, on peut définir quantitativement l'intensité I d'un combat dans une zone donnée. Celle-ci s'exprime par l'égalité $I = E / (S \times T)$ où E désigne l'énergie du combat déployée sur la zone géographique S durant la période temporelle T . L'Energie de combat E tient compte de l'ensemble des munitions, balles, grenades, roquettes, bombes, missiles, tirés par les systèmes d'armes engagés durant la période T sur l'espace S .

Les derniers conflits (Arménie, Yémen, Ukraine, Israël, Birmanie) confirment les tendances observées depuis deux décennies :

- L'augmentation régulière de l'intensité du combat. Pour une définition de l'intensité du combat, on pourra se référer à [1] ; référence : « mesurer la (haute intensité) du combat » RDN n°860, mai 2023-
<https://www.defnat.com/e-RDN/vue-article.php?carticle=23175>
- La robotisation du champ de bataille dans tous les milieux : terrestre/aérien/naval/THA ;
- Le rôle croissant de l'intelligence artificielle dans les systèmes d'aide à la décision, les systèmes de commandement C2 et les systèmes robotisés ;
- L'IA apporte l'autonomie (cf. classement L0 > L5 cf. [2]) dans les systèmes robotisés ; RDN n°820, mai 2019 – « Systèmes armés semi-autonomes : que peut apporter l'autonomie ? » ;
<https://www.defnat.com/e-RDN/vue-article.php?carticle=22043&cidrevue=820>
- L'IA pour le renseignement permet de traiter automatiquement de grands volumes de données (capteurs, imagerie géospatiale) ;
- L'IA pour la simulation, en particulier le RL (Reinforcement Learning) pour les manœuvres des escadrilles et essaims de drones.

Les tendances fortes à court et moyen termes

L'évolution du combat de haute intensité s'articule autour de tendances qui structurent les doctrines des forces armées :

L'Économie du sang : Les armées « technologiques » cherchent à « retirer » le soldat humain de la première zone de confrontation pour le remplacer par des systèmes robotisés à haut niveau d'autonomie. Cela permet d'économiser la vie des soldats engagés en première ligne (économie du sang).

La saturation de l'espace de combat : Les armées recherchent la saturation de l'espace de combat grâce à l'IA et la robotique en essaims, saturation par le combat SCS (Swarm Counter Swarm).

La réduction des délais de la boucle OODA : Les chefs militaires cherchent à réduire tous les délais présents dans la boucle décisionnelle OODA (Observer, Orienter, Décider, Agir) grâce à l'IA et à l'autonomisation des systèmes et des processus décisionnels.

La massification des moyens du combat : L'objectif est d'augmenter l'intensité du combat et de déployer une énergie de combat maximale contre l'adversaire (cf. article RDN). Pour cela, les facteurs économiques et logistiques contribuent à la production d'intensité du combat.

La « Massification » des moyens du combat engendre deux questions centrales :

Q1 - Comment mettre en œuvre des systèmes d'armes, vecteurs de haute intensité dans la durée ?

Q2 - Comment créer de l'attrition en minimisant les coûts des armes et munitions ?

La liste (non exhaustive) des préconisations suivantes constitue un début de réponse aux deux questions :

- Le développement de Munitions Télé Opérées MTO (multi-milieus) terre/air/mer à bas coûts ; et d'unités de productions mobiles de ces MTO projetables au plus près des combats ;
- La généralisation de la robotique en essaim (Swarm) ;
- L'impression 3D/additive des châssis de drones aériens alimentant la production de MTO ;
- Les unités projetables, usines projetables réparties au plus près de la zone de conflit ;
- L'usage de Blockchain privées, de qualité militaire, pour garantir la conformité et la traçabilité des pièces de maintenance produites au plus près des zones de combat ;
- La préparation de missions grâce à la simulation/ML-RL et à l'optimisation des opérations
- L'automatisation de la collecte et du traitement du renseignement militaire : automatisation par les composantes de Machine Learning, par la Computer Vision, par l'IA générative, par des LLM multimodaux. (Ces technologies permettent de traiter de très grands volumes de données à moindre coût) ;
- Le développement d'IA-C2 dans les processus de décision des centres de commandement militaires : optimiser les décisions des chefs militaires pour réduire les délais de la boucle OODA.

La robotique militaire

Le domaine aérien

Dans le domaine aérien, il faut distinguer les différents types de drones, du nano-drone de quelques dizaines de grammes jusqu'au drone d'attaque ; drone tactique ou stratégique alors très proche de l'aéronef de combat.

Catégorie	Masse	Altitude de vol	Vitesse
Groupe 1	< 9 kg	< 365 m	< 100 km
Groupe 2	9 – 25 kg	< 1 000 m	< 250 km
Groupe 3	25 – 600 kg	< 5 500 m	< 250 km
Groupe 4	> 600 kg	< 5 500 m	Sans limitation
Groupe 5	> 600	< 5 500	Sans limitation

Dans la catégorie des drones tactiques : On souligne le développement de drones à longue endurance, longue persistance en vol, furtifs, silencieux, présentant une basse consommation d'énergie, capables d'intégrer des capacités de vol plané, moteur coupé, afin de réduire l'empreinte radar.

Dans la catégorie des petits drones et des munitions téléopérées (MTO) : on se dirige vers une production massive des drones aériens kamikazes porteurs de 500 grammes à 3 kg d'explosifs et « bons marchés ». L'impression additive 3D va permettre de faire baisser les coûts unitaires de drones et des unités de productions mobiles vont être développées. Produits en grand nombre, ces petits drones vont former des essaims dotés d'algorithmes « essaims » et de capacités de déplacement sans GPS (GPS denied) en zones de combat fortement brouillée. Cf. le Drone aérien ukrainien BACKFIRE capable de réaliser une pénétration de plus de 35km en territoire ennemi en vol autonome, peu sensible au brouillage :

<https://www.pravda.com.ua/eng/news/2023/11/20/7429586/>

Nous assistons au développement de drones RACERS, hyper manœuvrant, hyper accélérant incorporant de l'IA (Reinforcement Learning, RL) dans les autopilotes. Le RL permet de résoudre le vol « inhumain » en surpassant le meilleur des pilotes humains de drones Racers, depuis aout 2023.

Références : <https://www.youtube.com/watch?v=fBiataDpGlo>

Références : article publié dans Nature – “Champion-level drone racing using deep reinforcement learning” :

<https://www.nature.com/articles/s41586-023-06419-4>

La lutte Anti Drones (LAD) SCS (Swarm Counter Swarm) : La lutte Anti-Drone Active (SCS Swarm Counter Swarm) va se développer via des radars de détection et de suivi des petits drones. Les logiciels autopilotes embarqués vont permettre de développer des capacités de marquage de cibles, de suivi et d'interception automatique (Cf. plateforme ARISTEE).

Le domaine naval

Les essaims de drones navals de surface vont se développer de manière généralisée et seront opérés par toutes les armées (cf Turquie, Ukraine, Chine, Iran, Israël, USA, Russie).

Les vecteurs de surface sont capables d'embarquer de 100kg à 300kg de charge explosive. Comme pour le domaine aérien, les constructeurs vont s'engager dans le développement de software autopilote, de vecteurs furtifs, de turbines silencieuses, de propulsion électrique et hydrogène.

La robotique sous-marine va évoluer vers des rovers, des vecteurs et des torpilles robotisées à très haut niveau d'autonomie (L3-L4).

Au niveau de la dissuasion nucléaire, les sous-marins doivent devenir de plus en plus furtifs car les drones de profondeurs vont quadriller les fonds marins notamment pour la détection des SNLE.

Le domaine terrestre

Nous allons assister au développement de robots terrestres agiles et de plateformes modulables, multi missions. Les robots terrestres serviront également en escadrille et en essaims.

Des robots terrestres dédiés aux milieux extrêmes sont développés pour intervenir dans des environnements radioactifs et des environnements à haute température et forte pression (oil & gaz).

La robotique souterraine, d'exploration de bunkers, de caves, de tunnels va se développer notamment en mode « GPS denied » impliquant un très haut niveau d'autonomie pour les déplacements, pour l'exploration de zones contestées et pour le traitement d'objectifs.

La robotique souple ou robotique molle (cf. laboratoires suisses EPFL et ETH) va permettre d'explorer des zones non accessibles à un robot rigide. Elle va permettre de réaliser de l'inspection de décombres et de la recherche de blessés.

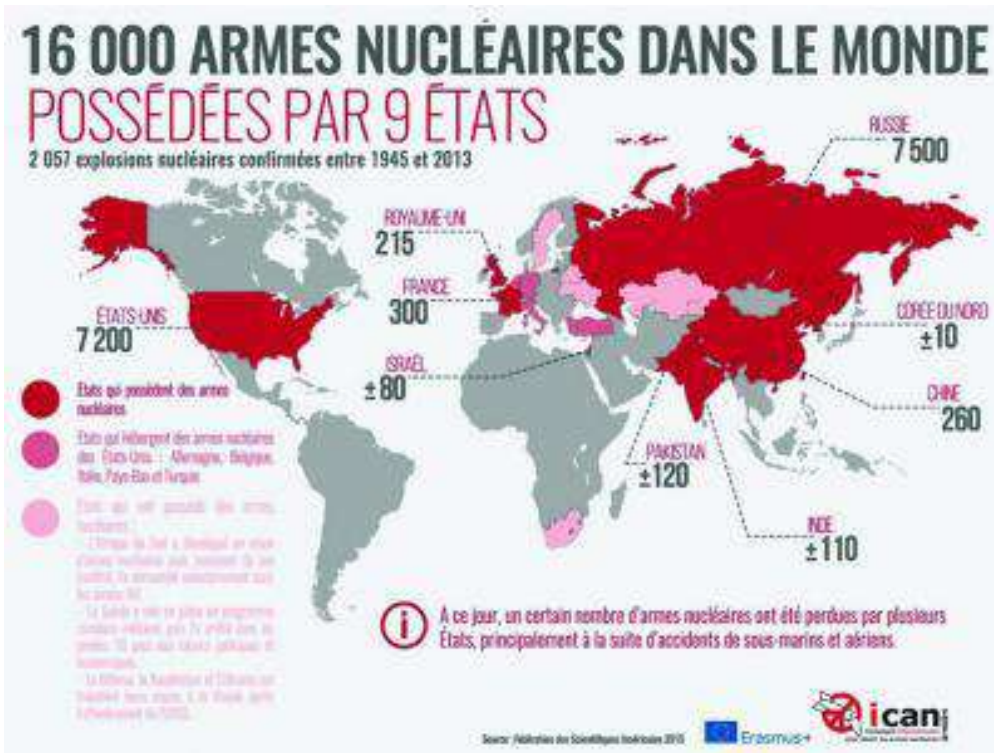
Nous proposons huit tendances fortes structurant la prochaine décennie de développement de la robotique mondiale :

Avec une très forte probabilité, les dix prochaines années devraient s'articuler autour des tendances suivantes :

- Une accélération de la convergence de l'Intelligence Artificielle avec la robotique ;
- Des systèmes robotisés de plus en plus autonomes (niveaux L2,L3,L4) ;
- Des drones aériens manœuvrant à des vitesses surhumaines (non pilotables par des télépilotes humains), hyper accélérant à très faibles rayon de braquage ;
- L'augmentation des niveaux d'autonomie des systèmes robotisés implique une augmentation de leur cybersécurité : nous allons assister au développement de la cybersécurité embarquée, de superviseurs SIEM UEBA spécifiques aux drones et robots ;
- La miniaturisation des capteurs, des moteurs, des batteries intervenant dans les systèmes robotisés ;
- L'augmentation des capacités de batteries électriques ;
- Le développement de moteurs à hydrogène adaptés aux robots et drones ;
- Le développement de matériaux furtifs, à très faible signature radar.

Tableau suivant : les Niveaux d'autonomie d'un système armé robotisé (article RDN 2022)

VERS UNE DOUBLE DISSUASION MILITAIRE



+



**Dissuasion nucléaire
historique (1950)**

**Dissuasion Robotique (2025)
Chine - USA**



URGENCE STRATEGIQUE : ACTUALISER L'ECHELLE D ESCALADE MILITAIRE D'HERMAN KAHN (1922 – 1983) SOUS LE PRISME DE CETTE DOUBLE DISSUASION

En 1962 Hermann Khan publie pour la Rand Corporation une échelle d'escalade des conflits à 12 échelons qu'il étend à 44 échelons en 1965 :

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

PARTIE II
CONSTATS et ROBOTIQUE VAMAFER

CONSTATS

C1)- L'intensité du combat (donnée par $I_c = E_c / (V_c \times T_c)$) augmente sur la totalité de l'espace de combat (Terre, Air, Mer, cyber, EM, PsyOps)

C2)- La robotisation s'accélère, avec une « dronification » massive des équipements intégrant de plus en plus de composantes d'IA

C3)- Le niveau d'autonomie de systèmes armés augmente (L0,L1,.. ,L5) ;

C4)- La guerre des drones devient centrale, prépondérante, accessible à toutes les typologies d'acteurs, étatiques ou non, cartels, groupes terroristes ;

C5)- Le niveau de létalité sur l'espace de combat augmente : la zone de confrontation tend à devenir une zone « invivable » pour le combattant humain en raison de la montée en performance des systèmes robotisés : Horizon hautement probable : une guerre de robots sans humains (cf. le syndrome du hachoir à viande ukrainien) ;

C6)- La robotique VAMAFER amplifie et accélère 1) 2) 3) 4) 5) et induit une course à la Vmax pour les drones aériens et les intercepteurs aériens.

Course Vmax pour les FPV d'attaque et pour les intercepteurs : nouvelles tactiques (ex : les oiseaux de Magiar en Ukraine).

CE QUE LA ROBOTIQUE VAMAFER NOUS APPORTE :

V = hyper VELOCITE (cf. minidrones racers FPV $V_{max} = 400 \text{ km/h}$ ou des drones à micro réacteurs $V_{max} > 700 \text{ km/h}$)

A = hyper AUTONOMIE (cf. Autopilotes embarqués sans connexions externe, insensibles au brouillage, Résolution du pilotage FPV RACER par Autopilote RL - EPFL & ETH 2024)

M = hyper MINIATURISATION (cf. miniaturisation des microturbines, des micro transpondeurs, des moteurs électriques, des boules optiques, caméras, sondes, effecteurs.)

A = hyper AGRESSIVITE (cf. accélération de racers 0 à 200km/h en 2s, trajectoires et stratégies optimales inhumaines ou NON HUMAINES (dues au RL, Attention CHATGPT, les LLM et l'IA générative ne servent à rien sur ces sujets. C'est le RL qui compte et l'IA bayésienne embarquée.

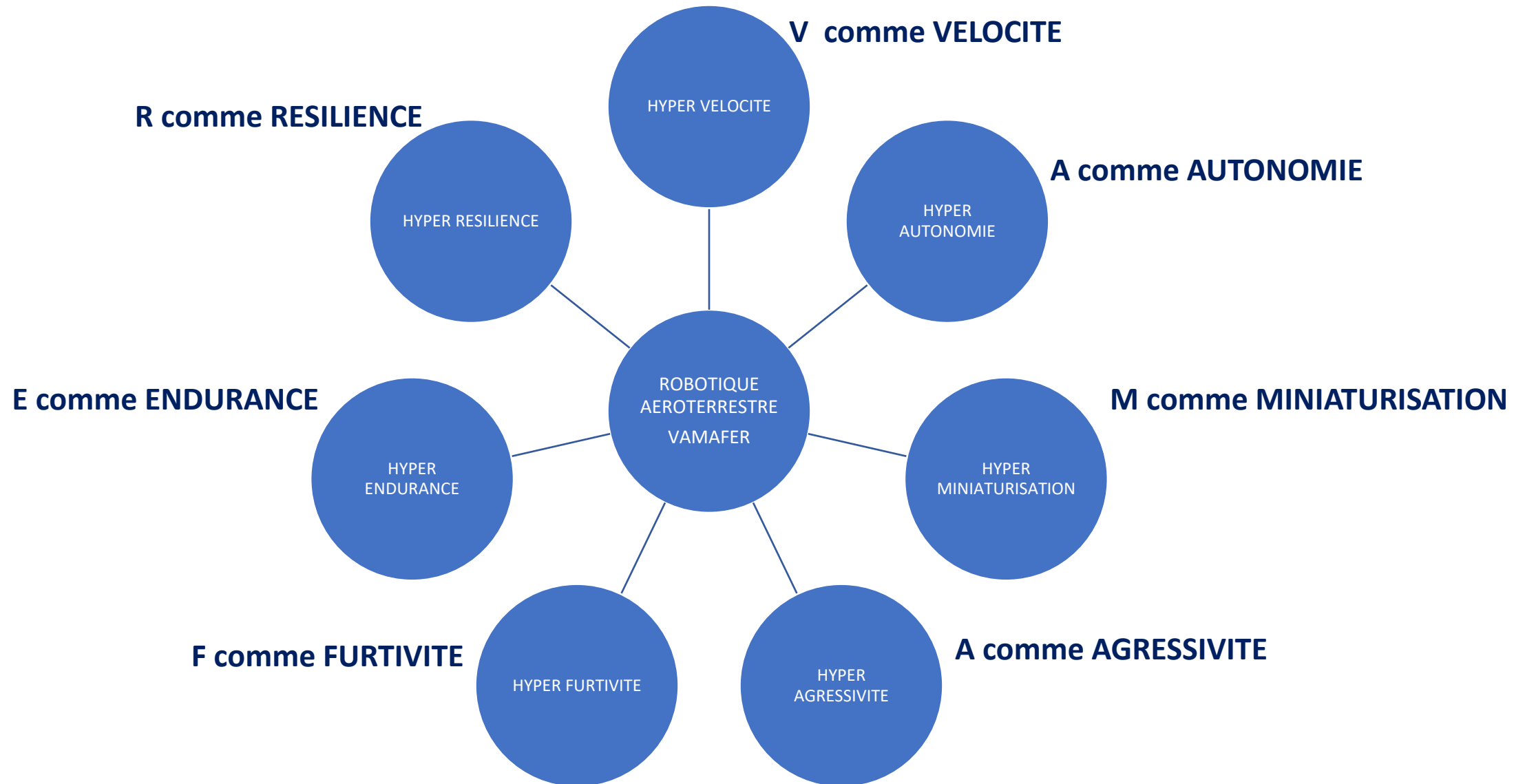
F = hyper FURTIVITE (cf. vol silencieux, hélices silencieuses, matériaux à très faible signature radar, vol chaotique)

E = hyper ENDURANCE (cf. vol persistant, drones planeurs, tactiques anti-LAD, USV navals ukrainiens équipés de missiles sol-air)

R = hyper RESILIENCE (cf. robotique molle, drones en milieux extrêmes, température, pression, ionisé, EM).

Le duo gagnant : ROBOTIQUE VAMAFER LOW COST

ROBOTIQUE « VAMAFER » = robotique du champ de bataille



QUELQUES METRIQUES NOUVELLES DE LA « GUERRE DES DRONES »

La métrique VSEV [Mancini – Berthier] (ou métrique DAD Detection Above Detected) est une métrique de furtivité qui concerne à la fois les drones aériens, terrestres et navals.

Contexte et définition : un drone d'observation D muni d'un capteur K_D est utilisé dans une mission de collecte de renseignements sur une cible C dotée d'un détecteur K_C .

Soit $L_{\max}(C/D, K_D)$ la distance maximale d'observation efficace d'une cible par le capteur K embarqué sur D . Au-delà de cette distance, on suppose que le drone ne peut plus remplir sa mission d'observation en utilisant le capteur K .

Soit $L_{\max}(D/C, K_C)$ la distance maximale de détection du drone D par le détecteur K_C opéré par la cible C .

La zone efficace de la mission d'observation opérée par D est décrite par l'intervalle efficace :

$$L_{\max}(D/C, K_C) < \text{distance}(C, D) < L_{\max}(C/D, K_D)$$

La métrique VSEV est définie par le ratio : $\rho_{VSEV}(C, D) = \frac{L_{\max}(C/D, K_D)}{L_{\max}(D/C, K_C)}$

Si $\rho_{VSEV}(C, D) > 1$ alors la mission d'observation est réalisable par D sans détection de la part de la cible.

Sinon, le drone D peut potentiellement être détecté par sa cible dès le début de sa mission d'observation.

Niveaux d'efficacité d'observation : Lorsque $\rho_{VSEV}(C, D) > 10^j$ alors l'efficacité d'observation de la cible C par le drone D est au moins de niveau j . La valeur maximale de j notée j_{\max} définit le niveau maximal d'efficacité d'observation de C par D actionnant son capteur K .

1 - Résilience d'un essaim homogène engagé sur une mission

Soit $E = \{A_1, A_2, \dots, A_{NE}\}$ un essaim homogène composé de NE agents robotisés de même nature (Drones, UGV, UAV, USV, AUV,...) formés en essaim pour accomplir une mission M décrite par des métriques d'objectifs de mission $ObjM = (O_1, O_2, \dots, O_k)$ et des seuils de réussite $S = (s_1, s_2, \dots, s_k)$ en dessous desquels l'objectif n'est pas réalisé : si $O_i < s_i$ l'objectif n'est pas réalisé.

Une fois l'essaim activé sur sa mission, il peut subir des pertes par destruction ou neutralisation d'une partie de ses agents robotisés.

On s'intéresse à la valeur minimale de l'effectif de l'essaim (après destruction d'une partie de ses agents) permettant encore de réaliser la mission M en respectant les seuils de réalisation des objectifs.

On note $N_{min-E} = N_{min}(ObjM, S, E)$ cet effectif minimal relatif aux objectifs de mission et aux seuils de réalisation.

La métrique de résilience de l'essaim E engagé sur la mission M d'objectifs $ObjM$ et de seuils S est définie par le ratio :

$$\rho_{RESI}(ObjM, S, E) = \frac{N_{min}(ObjM, S, E)}{NE}$$

$$0 < \rho_{RESI}(ObjM, S, E) \leq 1$$

Si $\rho_{RESI}(ObjM, S, E) = 1$ l'essaim E n'a pas de résilience sur la mission M , ses objectifs et ses seuils. Plus le ratio est proche de zéro, plus grande est la résilience de l'essaim sur sa mission.

La métrique du ratio des coûts intercepteur sur cible

$$R_c = \text{Coût(vecteur intercepteur)} / \text{Coût (cible à neutraliser)}$$

Exemple n°1 : calcul du ratio de coût d'interception; Cas d'un missile ASTER tiré depuis un bâtiment français en Mer Rouge contre un drone SHAHED lancé depuis le Yémen par un groupe Houties.

$$R_c = 2\,000\,000 \text{ euros} / 30\,000 \text{ euros} = 66,66 \text{ (!!)}$$

Idéalement, on doit toujours privilégier et rechercher le contexte où $R_c < 1$

Exemple n°2 : Cas d'un micro intercepteur FPV de type ROCKET DRONE à $V_{\max} = 350 \text{ km/h}$ (2000 euros) interceptant un drone d'observation ennemi russe ZALA LANCET (35 000 euros estimation)

$$R_c = 2000 \text{ euros} / 35\,000 \text{ euros} = 0,057$$

Attention aussi à tenir compte de la métrique collatérale des dommages engendrés par la non neutralisation de la cible. Le montant des dommages peut être potentiellement très élevé et justifier l'usage d'un intercepteur couteux contre une cible bon marché.

La métrique des vitesses max « intercepteur contre cible »

$$R_v = V_{\max}(\text{vecteur intercepteur}) / V_{\max}(\text{cible à neutraliser})$$

Exemple n°1 : Usage du FURY ou BLACKBIRD ($V_{\max} = 700 \text{ km/h}$) contre un hélicoptère ennemi ou contre un drone d'attaque SHAHED 136

$$R_v = 700 \text{ kmh} / 200 \text{ kmh} = 3,5$$

Autres RATIO à considérer dans un combat aérien DroneWarfare :

- Ratio des accélérations
- Ratio des rayons de braquage – « Faire des carrés dans le ciel, c'est plus avantageux que faire des ronds dans le ciel »
- Ratio des empreintes logistiques

METRIQUE DE DENSITE DE PRESENCE ROBOTIQUE DANS UN ESPACE DONNE V

$$\text{D-robotique} = \frac{\text{Nombre de robots présents dans l'espace de volume } V}{V}$$

PARTIE III
INTERCEPTIONS & INTERCEPTEURS HYPERVELOCES

180°

INTERCEPTION AIR-AIR PAR FPV MICRO INTERCEPTEUR

10000

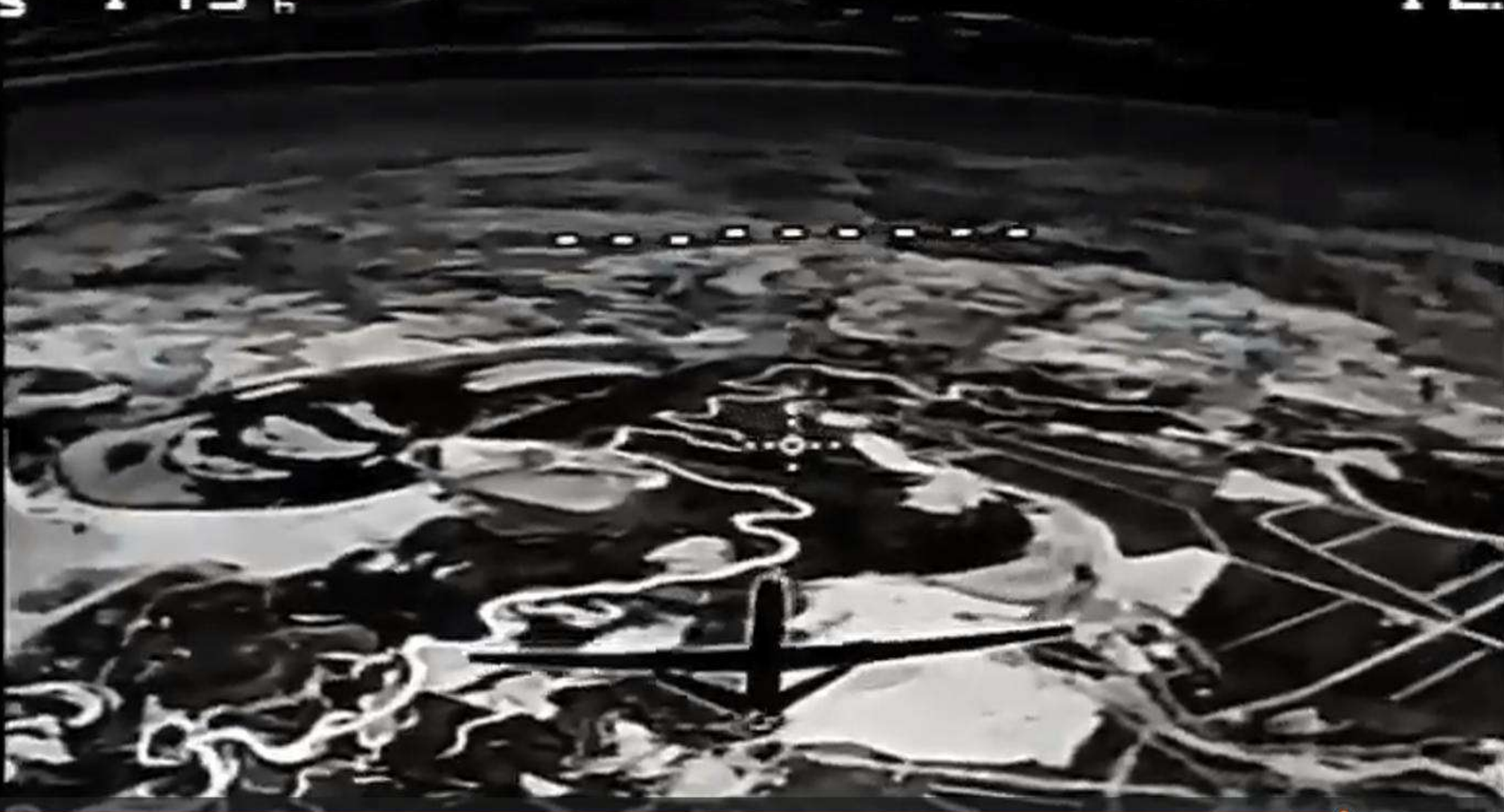
Родная

рад

A_S 143 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$

INTERCEPTION EN HAUTE ALTITUDE

12.0 A



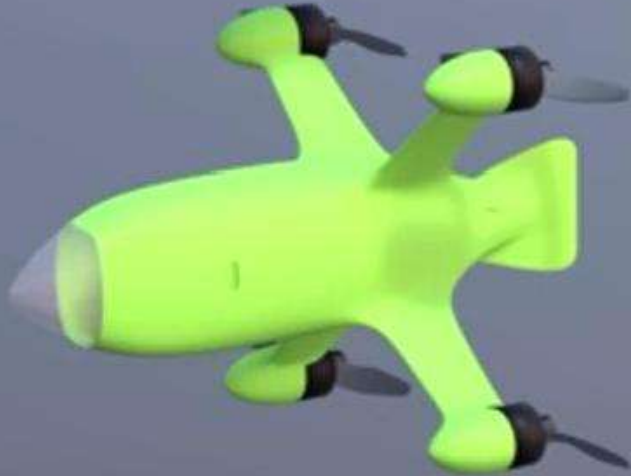
PERRAGREEN III



16.2 Kw

2.77 kg
6.1 lbs

585 kmh
360 kmh



8.9 Kw

1.85 kg
4.1 lbs

480 kmh
298 mph



5.2 Kw

1.05 kg
2.3 lbs

397 kmh
247 mph

way because drag rises with the square of the

C 50 °C 50 °C 58 °C 58 °C

2 6 6 1 4
2 6 7 8 6
2 6 7 0 0
2 6 9 5 7

585 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$

7 2 3 $\frac{\text{MA}}{\text{h}}$ / KM

3 6 . 6 V

2 . 6 4 KM

1 4 0 4 5

1 8 6 6 $\frac{\text{MA}}{\text{h}}$

The speed crept up all the way to 585.

W 8 6

PALMER LUCKEY - ANDURIL




**Un exemple français, souverain, unique :
l'intercepteur hypervéloc FURY ALM**



ALM MECA : TPE Alsace spécialisée en mécanique de haute précision – 17 collaborateurs

- **Le seul constructeur français de microréacteurs**
- **L'un des trois constructeurs européens de microréacteurs**
- **L'un des douze constructeurs dans le monde**
- **Le seul constructeur mondial de microréacteurs vectoriels**
- **L'un des deux constructeurs au monde de vecteurs intercepteurs hypervéloces à $V_{max} = 700 \text{ km/h}$**
- **Exploit technologique et industriel réalisés sans aucune aide ou soutien externe – Tout a été réalisé en fonds propres**





intercepteur FURY
 $V_{\max} > 700 \text{ km/h}$
 $\Gamma > 34G$

FURY ALM en vol - 2025



Principales caractéristiques du drone intercepteur FURY

- FURY ALM est le premier drone intercepteur hypervéloce 100% français. Il est développé et produit par ALM MECA
- FURY est propulsé par un microréacteur ALM MECA (lui aussi 100% français) alimenté par Kérosène
- La vitesse max de FURY dépasse les 700 km/h en vol horizontal ou vertical
- Dim FURY 110 cm x 110 cm
- Payload de 2 kg
- Très faible rayon de braquage de FURY (qui, mieux que des cercles, sait faire des carrés dans le ciel...)
- Accélérations dépassant les 20g
- Faible empreinte logistique de FURY : transportable et actionnable par un unique personnel.
- Décollage catapulte, rampe, vertical
- Microréacteur vectorisé (technologie inédite au niveau mondial à ce jour)
- FURY peut voler et planer, réacteur coupé, de manière furtive
- FURY est insensible aux conditions météo (vents forts, pluies fortes, très hautes températures, très basses températures, tempêtes de sable).
- Les caractéristiques de FURY sont toutes largement scalables (élongation 100 km → 300 km et plus; payload, Vmax, Accélération)
- FURY peut être téléopéré depuis une base terrestre ou voler en mode autonome.
- Il peut être utilisé sans charge, pour une interception cinétique ou avec charge pour une sphère d'interception au voisinage des cibles;
- FURY sait poursuivre et rattraper aujourd'hui tous les types de drones et d'hélicoptères, avec un ratio de vitesse $R_v > 3$
- FURY n'a qu'un seul concurrent à ce jour : l'intercepteur ROADRUNNER ANDURIL

FURY ALM

Vmax = 700 km/h



HYPERVELOCE FURY ALM INTERCEPTOR

ROADRUNNER ANDURIL



FURY ALM

$V_{max} = 700 \text{ km/h}$



HYPERVELOCE FURY ALM INTERCEPTOR







FURY en vol en Europe et hors d'Europe
Vmax > 700 km/h

Les défis hardware - software de l'interception Air-Air

Les défis hardware - software de l'interception hypervéloce (en particulier de FURY et de ses petits frères SPEEDY)

- Les intercepteurs hypervéloces de la classe FURY se situent à l'interface entre le segment des petits missiles et le segment des drones en offrant le meilleur des deux mondes.
- Il faut utiliser un autopilote spécifique, capable de gérer la haute vitesse et les fortes accélérations avec des latences minimales au sein des capteurs et des effecteurs embarqués sur FURY.
- Les fonctions de « DETECTION - LANCEMENT - POURSUITE - NEUTRALISATION AU VOISINAGE DE LA CIBLE » nécessitent un haut niveau d'automatisation (proche des softwares missiles bien connus et maîtrisés par les constructeurs de missiles).
- Nous avons développé (cf. colloques CAT2035 I et II) un ensemble de trois simulateurs d'interception Air-Air : deux simulateurs capacitaires de type SCS (Swarm Counter Swarm) et un simulateur de trajectoire d'interception. Ces simulateurs ne sont pas spécifiques à FURY. Ils s'adaptent à tous les types d'intercepteurs aériens (du petit Rocket-Drone quadricoptère (V_{max} 635 km/h) jusqu'au grand frère de FURY).

Outil indispensable des vecteurs d'interception hypervéloces :
LE SIMULATEUR D INTERCEPTION intégrant des :

- Modèles capacitaires

Et

- Modèles d'optimisation des trajectoires d'interception (murs de drones et autres)

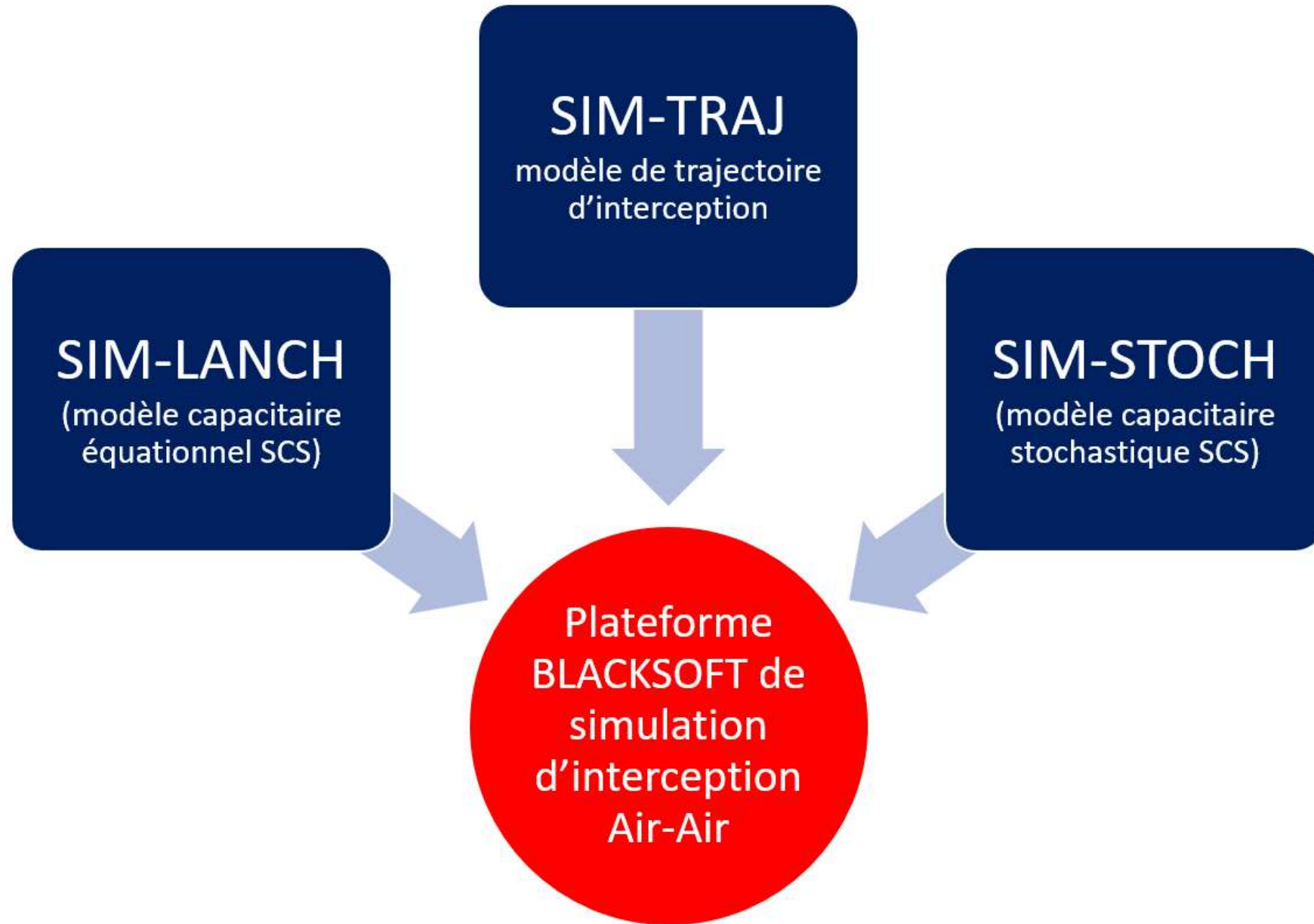
Nous avons développé 3 simulateurs complémentaires dédiés à l'interception anti-drones Air-Air.

Le premier simulateur « **SIM-LANCH** » s'appuie sur un ensemble de modèles équationnels de type Brachen-Lanchester pour apporter des réponses précises aux questions capacitaires inhérentes à la fonction d'interception : mon objectif ou cible potentielle à défendre est attaqué par N drones hostiles. Combien dois-je lancer de drones intercepteurs dans ce contexte pour espérer neutraliser les vecteurs d'attaques, avec une probabilité fixée ? le premier modèle capacitaire fournit des réponses utiles, facilement intégrables dans un système de lancement automatisé de drones intercepteurs et de gestion intelligente du flux de lancement.

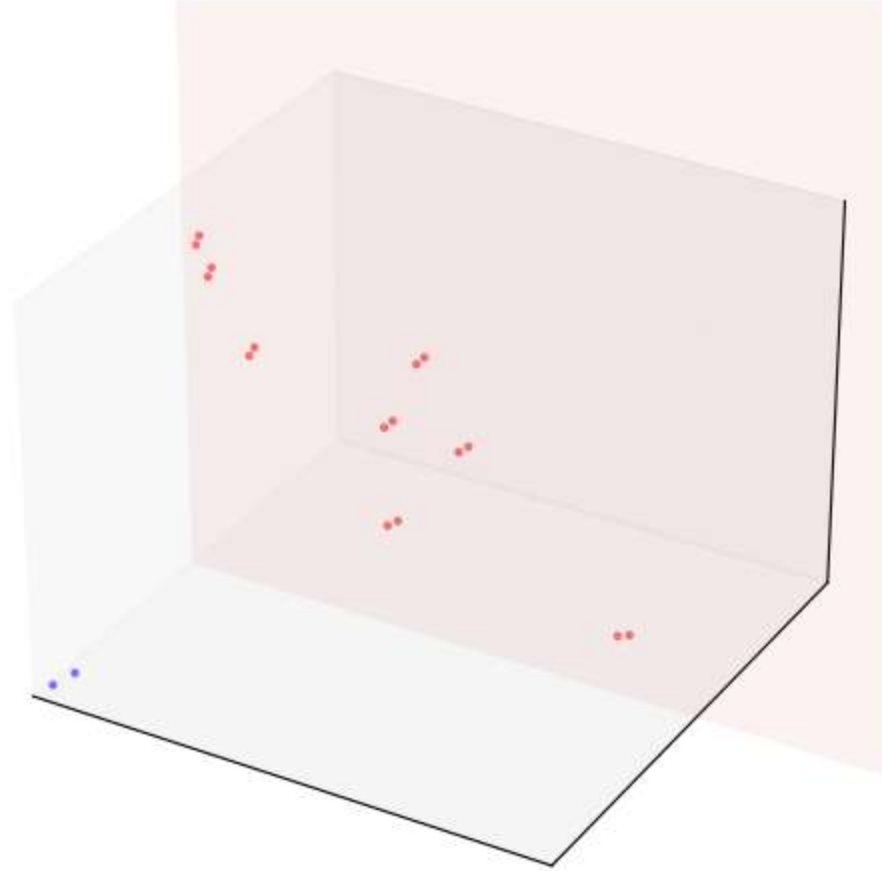
Le second simulateur « **SIM-STOCH** » s'appuie sur des méthodes stochastiques croisées et sur des modèles de Monte Carlo pour fournir des solutions optimales de lancement automatique de drones d'interceptions dans le cadre d'une attaque d'essaim (SCS). Ce deuxième simulateur est complémentaire du premier dans la gestion capacitaire du flux de drones intercepteurs SCS.

Ces deux premiers simulateurs ont été présentés lors de la conférence CAT 2035 (deuxième édition) en 2023. Notre troisième simulateur **SIM-TRAJ** simule la trajectoire d'un ou plusieurs drones intercepteurs lancés à la poursuite d'un ou plusieurs drones hostiles. Il permet d'envisager de nombreuses configurations et contextes d'interception :

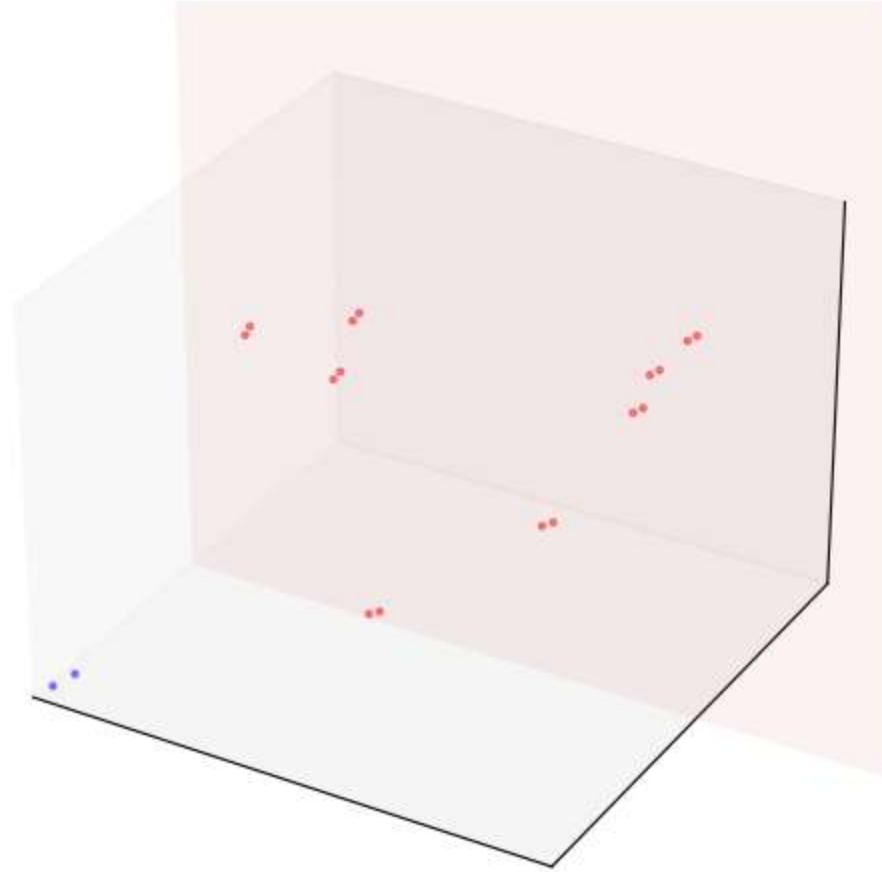
- **du contexte One-One (un intercepteur est lancé à la poursuite d'un drone ennemi)**
- **du contexte multidrones, où plusieurs intercepteurs sont lancés contre un groupe de drones ennemis**
- **du contexte « Mur de Drones »**



Vue 3D de poursuite – interception réussie



Vue 3D de poursuite – Echec de l'interception



Cybersécurité des intercepteurs hypervéloces

Une surface d'attaque large et spécifique aux systèmes autonomes

- Attaques sur l'autopilote,
- Attaques sur les composants PNT (Positioning Navigation Timing)
- Attaques sur les micro transpondeurs (FFI Friend Or Foe identification)
- Attaques sur les stations sol
- Attaques sur les capteurs & boule optronique
- Attaque sur le guidage
- Ataque sur les caméras en zones brouillées

PARTIE IV

**La plus impactante des révolutions robotiques :
La robotique humanoïde**

New world record (full-size humanoid)
Max speed=3.3m/s



Real filmed video

Unitree H2

Destiny Awakening

Watch Video →



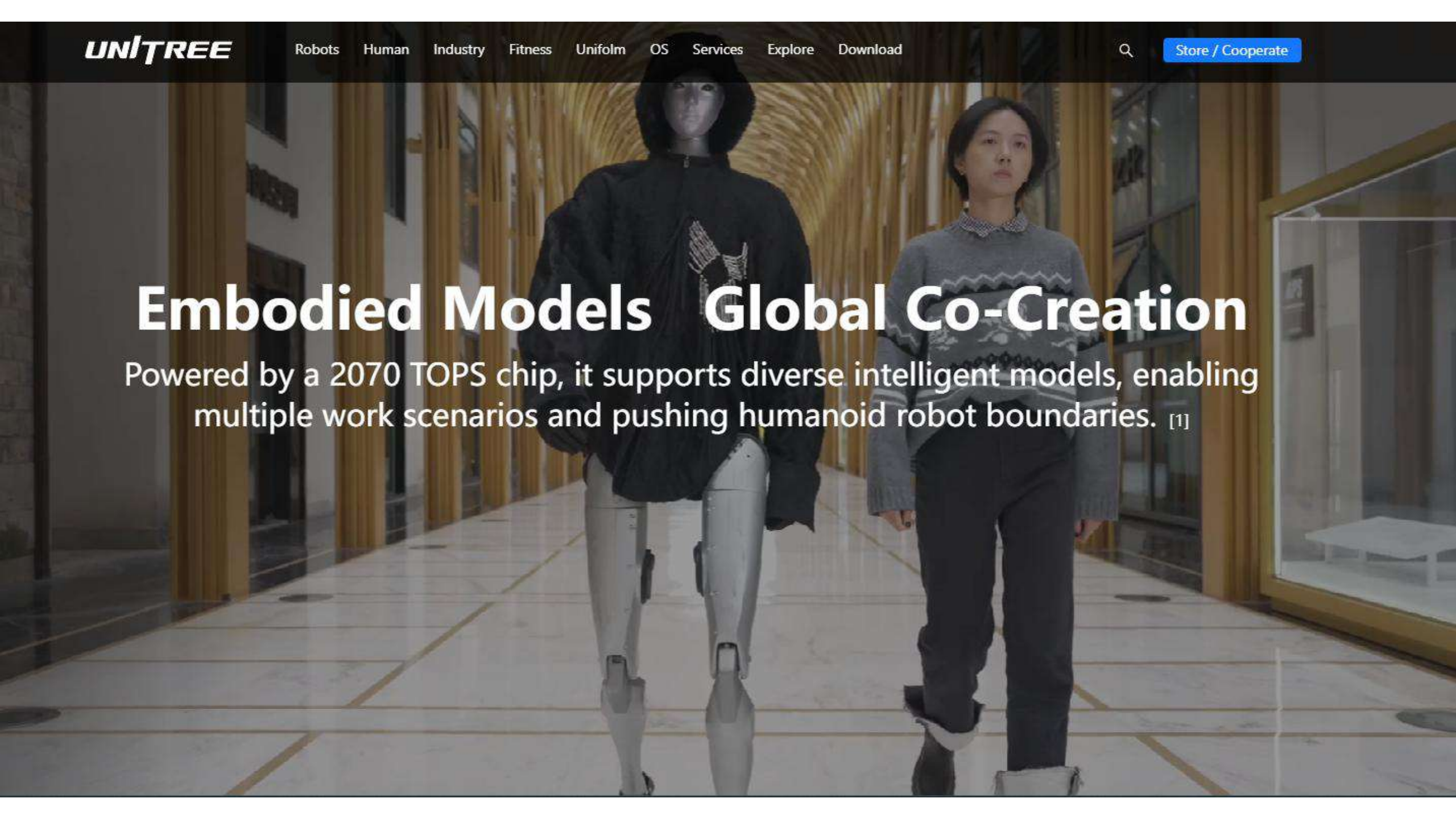
The background of the entire page is a large, dark image of a humanoid robot in a white and grey suit. The robot is in a dynamic pose, with its arms raised and one leg forward, as if it is walking or dancing. The setting appears to be an indoor arena or gymnasium with red seating in the background. The text "Elegant Form Graceful Rebirth" is overlaid on the image in a large, white, sans-serif font.

Elegant Form Graceful Rebirth

The 180 cm humanoid design redefines industrial aesthetics with its streamlined elegance.

Embodied Models Global Co-Creation

Powered by a 2070 TOPS chip, it supports diverse intelligent models, enabling multiple work scenarios and pushing humanoid robot boundaries. [1]



UBTech

Airbus commence à intégrer des robots humanoïdes UBTech directement dans ses usines.

L'action UBTech s'envole

Des commandes record en Chine

Une production industrielle de robots humanoïdes qui devient très concrète

On ne parle plus de labos ou de démos.

On parle de chaînes de production aéronautiques.





7 SUR 7

Humanoïdes sentinelles chinois sur sentiers d'altitude – frontière sino-indienne

Des défis de sécurité inédit

Il faut cartographier les risques cyber-physiques des robots humanoïdes cohabitant avec les humains au quotidien (lieu de travail, domicile, transports, sécurité, services, logistique, industrie, BTP,)

Il faut développer des SIEM - UEBA embarqués, évolutifs, basés sur des modèles de normalité statistique du système (hardware – software – capteurs et effecteurs);

Il faut anticiper la montée en puissance rapide des humanoïdes qui seront de plus en plus :

- Autonomes,
- Efficaces,
- Suscitant de plus en plus d'anthropomorphisme auprès des humains cohabitants avec les robots (Vallée de l'Etrange Uncanny Valley)
- Développer des Tests de Turing 2.0 spécifiques humanoïdes pour reconnaître un robot imitant un humain
- « Hardcoder » de nouvelles « Lois d'Azymov » adaptées aux humanoïdes.

MERCI

Thierry BERTHIER
thier.berthier@gmail.com