

Approche économétrique du facteur multiplicateur de puissance associé à l'intégration de systèmes autonomes au sein d'un groupe de combat terrestre

Thierry Berthier¹, Gérard de Boisboissel², Eric Hazane³, Olivier Kempf⁴, Nicolas Mazzucchi⁵, Pierre-Henri Marconnet⁶

¹ CREC Saint-Cyr & Université de Limoges - ² CREC Saint-Cyr - ³ Chaire Saint-Cyr -
⁴ FRS & Chaire Saint-Cyr, ⁵ FRS ⁶ Officier des Armes, Ecole Saint-Cyr Coëtquidan

Résumé - *Après avoir passé en revue les métriques utilisées dans les interactions Homme-Robot, nous proposons une série d'indicateurs et de nouvelles métriques de performances appliquées aux systèmes terrestres militaires sans équipage (UGV). Nous analysons différents facteurs multiplicateurs de puissances associés à l'usage d'UGV au sein d'une unité terrestre à l'aide de nouveaux indicateurs et de métriques adaptées. Dans une approche économétrique, nous montrons que le niveau d'autonomie et la résilience des UGV conditionnent très directement l'efficacité opérationnelle des unités qui les utilisent.*

Mots-clés : UGV, métriques de performance, facteur de puissance, interaction homme-robot, autonomie, intelligence artificielle.

1 Introduction : Le marché des véhicules terrestres sans équipage UGV et le besoin de métriques de performances

La définition d'un UGV a été fixée en 2018 par le comité ASTM F45 « un UGV est un véhicule automatique, automatisé ou autonome fonctionnant en contact avec le sol sans opérateur humain à son bord » [10]. Le développement croissant des véhicules terrestres sans équipage (UGV: Unmanned Ground Vehicle) ouvre un large champ d'expérimentations aux forces armées, conscientes des enjeux de puissances sous-jacents et des défis de rationalisation des équipements. Les programmes de développement de plateformes multi-mission modulables ou non se multiplient chez les principaux acteurs industriels de l'armement. Les forces terrestres, potentiellement acheteuses de ces plateformes et qui pour certaines (Israël, Russie) les expérimentent déjà, devront s'appuyer sur des classes de métriques de performance suffisamment précises pour leur permettre d'effectuer un choix rationnel. Ces métriques les aideront à optimiser le facteur multiplicateur de puissance associé à l'intégration au sein de leurs unités de matériels robotisés disposant de différents niveaux d'autonomie. L'offre de telles plateformes accompagne la demande, selon une boucle R&D-mise en production de plus en plus rapide, dans un marché particulièrement dynamique.

Ce dernier devrait passer de 2,7 Milliards de dollars en 2018 à plus de 7 Milliards en 2025 avec une augmentation moyenne annuelle régulière de 14,81 % [1]. L'Amérique du Nord domine le marché en 2019 avec 35,23 % des parts. La zone Asie Pacifique occupe la seconde place avec la plus forte croissance (portée par la Chine) prévue sur la période 2019-2025. La zone Europe représente quant à elle moins de 20 % de l'activité mondiale UGV et devrait conserver cette position durant les cinq prochaines années.

La segmentation du marché des UGV traduit toute la complexité de ce type de matériel associant des composantes « matériel » de haut niveau technologique et des composantes « logiciel » embarquant de plus en plus souvent des solutions d'apprentissage automatique (composantes ML pour Machine Learning) tout aussi complexes. Les compétences nécessaires au développement d'UGV se situent le plus souvent au niveau de l'état de l'art, c'est-à-dire très proche du niveau recherche et développement, même si des exemples récents d'utilisation sur le terrain (Israël au Proche Orient et Russie en Syrie) laissent entrevoir une intégration prochaine dans certaines forces. Les progrès en intelligence artificielle, terme qui mériterait d'être remplacé, conditionnent ainsi très directement les capacités de fonctionnement en semi-autonomie des UGV.

La segmentation du marché des UGV est décrite dans le tableau suivant (TAB1). Sa prise en compte initiale est utile avant d'évoquer les métriques de performance des UGV.

Critères de segmentation du marché UGV	Catégories correspondant au segment
<p>S1 – segmentation par domaine d’application et utilisateurs finaux de l’UGV.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Défense, applications militaires (75% en 2019) <i>Détection et neutralisation des mines et IED, Détection NRBC, renseignement, surveillance, patrouille frontalière, communication, appui feu.</i> - Commerce et services, applications civiles (25% en 2019) <i>Aéronautique et espace, énergie, opérations industrielles, transport, logistique, sûreté et surveillance.</i> <p>Un rééquilibrage de la répartition civil-militaire au profit du volet civil est attendu sur la période 2019 – 2025, avec un caractère fortement dual.</p>
<p>S2 – segmentation par poids de l’UGV</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Grand UGV (supérieur à 1000 kg) - Moyen UGV (50 kg à 1000 kg) - Petit UGV (10 à 50 kg) - Micro UGV (0 à 10 kg) <p>Ces quatre catégories d’UGV mobilisent des technologies souvent très différentes car adaptée à la taille et aux fonctionnalités.</p>
<p>S3 – segmentation par mode opératoire de l’UGV</p>	<ul style="list-style-type: none"> - UGV relié à sa base par un câble ou une liaison rigide - UGV téléopéré - UGV semi-autonome - UGV pleinement autonome
<p>S4 – segmentation par type de mobilité</p>	<ul style="list-style-type: none"> - UGV à roues - UGV à chenilles

	<ul style="list-style-type: none"> - UGV polypode (essentiellement quadripèdes) - UGV à mobilité hybride (saut, bascule, impulsion)
S5 – segmentation par composantes	<ul style="list-style-type: none"> - Composantes physiques de l'UGV (mécanismes et automatismes) - Composantes logiciel, composantes dédiées à la détection, composantes d'apprentissage automatique, composantes liées à l'orientation et à la reconfiguration.
S6 – segmentation par charge utile embarquée	<ul style="list-style-type: none"> - Capteurs, senseurs - Lasers - Radars, lidars - Caméras - Bras articulés - Armement embarqué - Armement non létal, fumigènes, guerre électronique
S7 – segmentation par type de source d'énergie	<ul style="list-style-type: none"> - Moteurs électriques - Moteurs thermiques - Mixtes, hybrides

TAB1 – Segmentation du marché mondial des UGV

Les acteurs industriels développant des gammes d'UGV sont confrontés à un ensemble de défis R&D particulièrement complexes : adaptabilité de l'UGV à des conditions environnementales variées, robustesse, sûreté et sécurité opérationnelle de l'UGV, communication entre l'UGV et sa base de commandement et contrôle, intégration de nouvelles technologies matériel & logicielle avant leur maturité, limitations fonctionnelles liées à la source d'énergie de l'UGV, coûts de R&D toujours élevés inhérents à des technologies proches de l'état de l'art. Les bénéfices opérationnels attendus liés au déploiement d'UGV, la réduction des risques pour le soldat engagé au combat (l'économie du sang), les économies de d'échelle, de personnels et de matériel dynamisent le marché des UGV militaires.

2 Généralités sur les métriques de performance

2-1 Classe EI des métriques d'efficacité d'interaction [1 Homme- 1 Robot]

Le contexte est celui où un opérateur humain (H) opère un seul robot (R) dans le cadre d'une mission. Le système [H-R] interagit avec le monde extérieur selon une double boucle d'activation (Fig.1) [2] [3] [9].

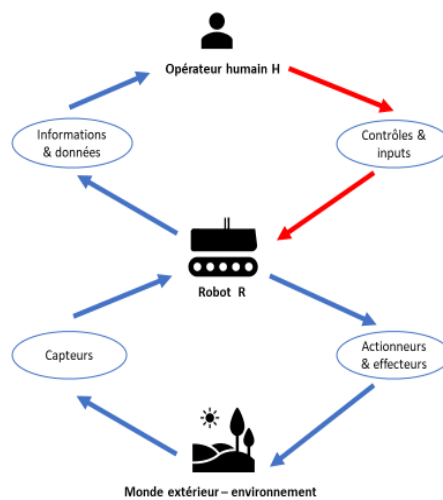


Fig.1 - Double boucle d'activation du système [Un opérateur - Un Robot]

La classe des métriques EI contient l'ensemble des métriques d'efficacité d'interaction [H-R]. Une métrique M de la classe EI évalue trois aptitudes du système [H-R] :

- 1) Avec quelle acuité l'opérateur H peut déterminer l'état et les besoins du robot R ?
- 2) Dans quelle mesure, les inputs de l'opérateur H agissent sur la performance du robot R ?
- 3) Quels niveaux d'efforts et de moyens sont requis pour maintenir les interactions durant la mission ?

Trois métriques de cette classe ont fait l'objet de nombreuses publications : la métrique de la Durée d'Interaction (DI), la métrique du Temps d'Attente durant l'Interaction (TAI) et la métrique d'Impact d'Interaction (II).

Métrique de la durée d'interaction (DI) : un indicateur potentiel permettant d'estimer l'efficacité d'interaction du système (H-R) est la durée attendue de cette interaction [4][5]. La métrique DI désigne, dans le contexte d'un unique robot opéré, le temps mis par l'opérateur humain H pour successivement : 1) prendre en compte la situation opérationnelle du robot R, 2) Déterminer les inputs à envoyer au robot R, 3) exprimer et envoyer ces inputs via une interface dédiée.

Métrique du temps d'attente durant l'interaction (TAI) : Cette métrique estime le temps d'attente durant les interactions pendant lesquels le robot se trouve dans un état de performance dégradé [9]. L'utilisation des métriques DI et TAI pour estimer l'efficacité d'interaction [H-R] suppose que les interactions courtes sont plus efficaces que les interactions longues. Au niveau opérationnel, ce postulat n'est pas toujours vérifié.

Métrique d'impact d'interaction (II) : Contrairement aux deux précédentes, la métrique II tient compte des bénéfices de performance acquis durant une interaction [H-R]. Pratiquement, les bénéfices sont évalués en observant l'évolution des performances du robot depuis le début de l'interaction. L'impact d'interaction (II) est considéré comme un processus aléatoire décrivant la performance du robot durant l'interaction [2]. L'impact d'interaction $\overline{II}(t)$ est fonction de plusieurs variables dont le temps t . La métrique associée \overline{II} s'exprime par la performance moyenne calculée sur la durée des interactions [H-R] :

$$\overline{II} = \frac{1}{DI} \int_0^{DI} E[II(t)] dt$$

Où $E[II(t)]$ désigne la performance instantanée attendue du robot à l'instant t .

2-2 Classe EN des métriques d'efficacité de négligence [1 Homme- 1 Robot]

La classe EN contient l'ensemble des métriques qui évaluent les capacités du robot (R) à agir quand l'attention de son opérateur humain H est mobilisée sur une autre tâche. On dit que l'opérateur néglige son robot durant une période de temps. La classe EN contient en particulier la métrique de Durée de Négligence (DN) définie comme suit [9].

Métrique de la durée de Négligence (DN) : La durée de négligence est la durée moyenne durant laquelle le robot peut être ignoré par son opérateur avant que sa performance attendue ne décroisse en dessous d'un certain seuil [6]. L'évaluation de ce seuil demeure complexe à réaliser [7]. Pour contourner cette difficulté, il faut introduire la métrique d'impact de négligence (IN).

Métrique d'impact de négligence (IN) : L'impact de négligence est considéré comme un processus aléatoire décrivant la performance d'un robot lorsqu'il est ignoré par son opérateur humain H. A partir du processus $IN(t)$, on détermine la performance moyenne de négligence du robot calculée sur la durée de négligence DN :

$$\overline{IN} = \frac{1}{DN} \int_0^{DN} E[IN(t)] dt$$

Où $E[IN(t)]$ désigne la performance instantanée attendue du robot ayant été négligé par son opérateur pendant un temps t

On notera que la métrique d'impact de négligence adresse les capacités d'autonomie du robot.

2-3 Métriques d'efficacité dans le contexte multirobots [1 Homme- n Robot]

Le contexte est celui d'un opérateur humain H interagissant avec un ensemble de n robots R1, ..., Rn. Le système [H – R1, ..., Rn] interagit avec le monde extérieur selon les boucles d'activation de la Fig.2 :

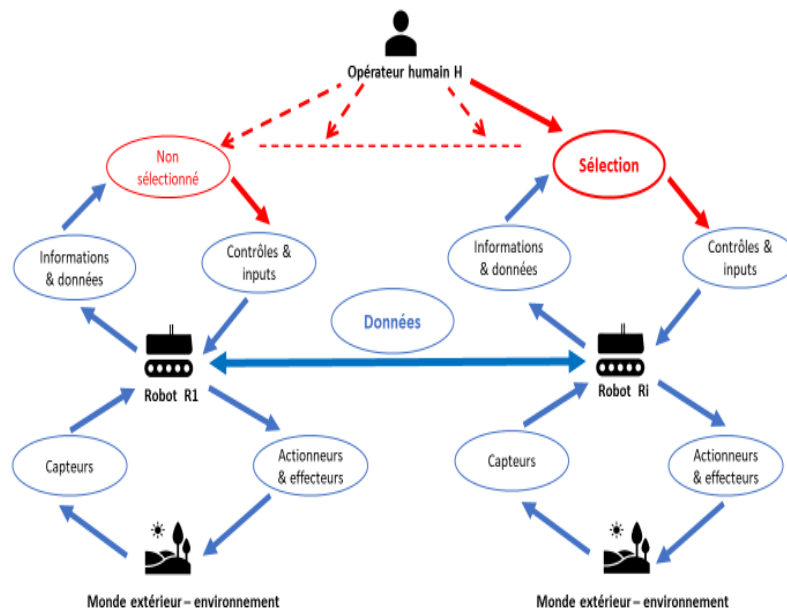


Fig.2 - Boucles d'activation du système [Un Opérateur - N Robots]

Dans ce type d'architecture, l'attention de l'opérateur humain est distribuée sur le groupe de robots R1,... Rn . La première métrique associée au contexte multirobots est le Fan Out [9].

Métrique Fan Out : Définie par Goodrich et Olsen [8], le Fan Out (FO) mesure le nombre de robots homogènes qu'un opérateur humain peut contrôler efficacement. Plusieurs estimations du FO ont été étudiées dans différents contextes. La plus simple de ces estimations est donnée dans [7] [8] par l'égalité : $FO = \frac{DN+DI}{DI}$

Une seconde métrique mesure l'efficacité d'allocation d'attention (EAA) [9].

Métrique d'efficacité d'allocation d'attention : L'EAA peut se mesurer d'une part en évaluant le temps nécessaire pour que l'opérateur décide quel robot il sélectionne après avoir terminé une précédente interaction avec un autre robot [4]. L'EAA peut aussi se mesurer en évaluant la qualité de cette décision de sélection. Idéalement, une métrique évaluant la qualité des sélections de robots par l'opérateur comparerait ces

décisions à l'ensemble des décisions optimales. Concrètement ces décisions optimales sont complexes à identifier. Sous cette forme, la métrique EAA reste difficilement exploitable notamment lorsque l'opérateur est amené à contrôler un groupe d'UGV inhomogène. Une métrique alternative consiste à mesurer les temps d'attente, c'est-à-dire le temps pendant lequel un robot se trouve dans un état de performance dégradée en raison de l'absence de l'opérateur. Cette métrique est notée TASO (temps d'attente sans opérateur). D'une manière générale, plus un système $[H, R_1, \dots, R_n]$ affiche un TASO élevé et plus son EAA est faible [9].

2-4 Niveaux d'autonomie d'un UGV et métriques associées

La définition du concept « d'autonomie » d'un système peut varier d'une étude à une autre. Le bureau des standards américains l'a fixée en 2012 pour le domaine de la robotique : *L'autonomie d'un système est associée à ses capacités à effectuer des tâches voulues en fonction de l'état actuel du système et de ses équipements de détection sans intervention humaine* [11]. Il existe également plusieurs approches dans la classification des niveaux d'autonomie d'un système [12] [13]. La classification ALFUS (Autonomy Levels for Unmanned Systems) est à la fois très exhaustive et évolutive [14] [15] [16] [17]. Le déploiement d'UGV dotés de niveaux d'autonomie est confronté à différents types de complexité, en particulier la potentielle complexité de la mission et la potentielle complexité environnementale. Les métriques associées à ces deux types de complexité sont :

Les métriques associées à la complexité de la mission

MM1 : métrique liée aux contraintes temporelles de la mission

MM2 : métriques de précision (en navigation, manipulation, détection, etc.)

MM3 : métriques de règles d'engagement (qui prend en compte également la présence de populations civiles donc l'environnement de déploiement).

MM4 : métriques des connaissances requises pour planifier la mission et s'adapter aux conditions changeantes.

MM5 : métrique sur le niveau de capacité de l'adversaire et ses impacts du type environnement électromagnétique fortement dénié. Ce contexte impose donc une plus grande autonomie de l'UGV ou le fait de ne se reposer que sur des systèmes filoguidés puisque les communications sans fil ne fonctionnent plus).

Les métriques associées à la complexité environnementale

ME1 : métriques associées au franchissement du terrain : support, sol plat dégagé ou terrain très accidenté présentant une surface non uniforme.

Les métriques associées à la visibilité

MV1 : métrique liée au dynamisme de l'environnement (objets en mouvement par rapport à des environnements statiques connus).

Les métriques et indicateurs d'indépendance du système face à une supervision humaine

MI1 : métrique de portée et étendue de la mission que le système peut planifier et exécuter indépendamment d'un opérateur humain.

MI2 : métrique associée à la capacité de générer des plans complexes de haut niveau. Par opposition aux capacités de simple dérivation de plans ou de signaux de niveaux inférieurs destinés aux actionneurs du système et issus d'un plan de niveau supérieur fixé par un opérateur humain.

MI3 : métrique associée aux capacités du système à communiquer les informations pertinentes à l'opérateur pertinent, notamment en distinguant les rôles humains dans un environnement complexe tels que les opérateurs, les passants, les adversaires.

Le niveau d'autonomie d'un système dépend toujours du contexte dans lequel il s'exécute. C'est dans ce cadre que la classification ALFUS a évolué pour proposer un modèle de capacité autonome contextuel pour les systèmes sans pilote [15] [16].

2-5 Modèle des métriques comparatives de performance : coût et performance de réalisation d'une tâche par une unité

On cherche à comparer les performances opérationnelles de deux unités U et U' engagées successivement sur une même mission dans un même contexte C . L'unité U est constituée de k personnels équipés de s matériels classiques (non UGV). $U = \{ H, M \}$ où $H = \{ H_1, \dots, H_k \}$ et $M = \{ M_1, \dots, M_s \}$. L'unité U' est composée de k' personnels, de s' matériels classiques (non UGV) et d'un ensemble de r' robots UGV interagissant avec le groupe (personnel + matériel). $U' = \{ H', M', R' \}$ où $H' = \{ H'_1, \dots, H'_{k'} \}$ et $M' = \{ M'_1, \dots, M'_{s'} \}$ et $R' = \{ R_1, \dots, R_{r'} \}$

La mission est une tâche T à réaliser par l'unité dans un contexte C ou une séquence de tâches à réaliser $T = [T_1, \dots, T_n]$ dans le contexte C .

A la réalisation d'une tâche T par l'unité U dans le contexte C sont associés un coût de réalisation et une performance de réalisation :

Le coût de réalisation – Le coût de réalisation de la tâche T dans le contexte C est noté $\text{Coût}_C(U, T) = (C_1, \dots, C_l)$. Les composantes de coût C_i concernent tous les efforts et moyens mis au service de la réalisation de la tâche T dans le contexte C : coût financier de développement et d'achat du matériel et des UGV, coût R&D, coût de maintenance, coût énergétique, coût munition, coût logistique, coût en ressources humaines des opérateurs, coût humain (le prix du sang), coût temporel, ... La réalisation de T dans le contexte C par l'unité U' engendre un coût de réalisation noté $\text{Coût}_C(U', T) = (C'_1, \dots, C'_l)$.

La performance de réalisation – La performance de réalisation de la tâche T dans le contexte C s'écrit $\text{Perf}_C(U,T) = (P_1, \dots, P_n)$. Les composantes de performance P_i adressent toutes les métriques de performance associées à la réalisation de la tâche T dans le contexte C par l'unité U.

Lorsque l'unité U' équipée d'UGV semi-autonomes, réalise la tâche T dans le contexte C, sa performance $\text{Perf}_C(U',T) = (P'_1, \dots, P'_n)$ reprend en particulier les métriques d'interaction « homme-robot » décrites en partie 2 : DI, TAI, II, DN, IN, \bar{II} , \bar{IN} , FO dans la liste des composantes P'_i .

D'autres métriques dérivent de scores capacitaires :

Structure et segment fonctionnel	Qualités et scores associés
Architecture	<ul style="list-style-type: none"> - Niveau de modularité, - Niveau de standardisation, - Niveau d'ouverture, Score S1
Mission et déplacements	<ul style="list-style-type: none"> - Capacités multi missions, - Capacités d'intégration à un dispositif conventionnel, - Niveau d'autonomie (système de navigation embarqué, capacités de calcul et de traitement de la donnée en temps réel, capacité d'apprentissage statistique, puissance de calcul embarquée), - Temps de reconfiguration, - Niveau d'interopérabilité (Command and Control), - Capacités à agir en essaim, - Signature faible ou nulle, - Charge utile embarquée, - Niveau de stabilité - Vitesse de déplacement - Nombre d'actions possibles par unité de temps, - Capacités de réduction des charges physique et cognitives des troupes, Score S2

Sûreté, Sécurité et Résilience	<ul style="list-style-type: none"> - Robustesse face à une attaque cyber, - Robustesse face à une attaque électromagnétique, - Robustesse et fiabilité face aux attaques cinétiques, - Données internes chiffrées - SIEM interne <p>Score S3</p>
Communications	<ul style="list-style-type: none"> - Capacités de communication de véhicule à véhicule, - Capacités de communication avec la base opérationnelle, - Capacités de communication en mode dégradé, <p>Score S4</p>
Capteurs, détecteurs	<ul style="list-style-type: none"> - Diversité des capteurs embarqués, - Largeur du spectre couvert, - Lidar - Capacités de perception et d'orientation à grande vitesse <p>Score S5</p>
Energie	<ul style="list-style-type: none"> - Moteurs thermiques (diesel), - Moteurs électriques, - Système hybride Diesel-électrique, - Durée maximale de fonctionnement sans ravitaillement (en mode thermique, électrique, ou hybride), <p>Score S6</p>
Armement embarqué	<ul style="list-style-type: none"> - Calibre et diversité de l'armement, - Cadences de tir, - Portées maximales, <p>Score S7</p>

Dans la partie suivante, nous analysons quatre segments du combat terrestre pour lesquels un emploi d'UGV au sein d'une unité peut engendrer des « économies » d'effectifs et de moyens. La construction de métriques spécifiques permet d'évaluer le facteur multiplicateur de puissance associé.

3 Le combat terrestre et ses métriques

Le déport de systèmes militaires robotisés permet une extension de la zone d'action des unités, et un déport de leur action. L'autonomie rend possible le développement de pions tactiques en remplacement de l'humain, ce qui engendre potentiellement des économies substantielles sur différentes ressources mais peut néanmoins créer de nouveaux besoins ou coûts. Nous avons ainsi identifié 4 segments de potentielles économies de ressources : Q1) Efficacité dans l'exécution, Q2) Puissance, Q3) Economie des moyens humains, Q4) Extension zone couverture

Q1 – Efficacité dans l'exécution

Vitesse et précision : voici deux des caractéristiques principales qui déterminent l'efficacité d'une unité militaire dans son exécution. La machine est plus rapide que l'Homme dans le temps de traitement des données numériques, étant donné ses fortes capacités de calcul supérieures à celles de l'Homme, et par conséquent plus rapide que l'Homme dans le positionnement de ses effecteurs, donc dans sa réactivité. Elle est en outre plus précise que lui encore dans la précision de ses effets [18]. Les systèmes robotisés participent donc à l'accroissement de la vitesse d'exécution de la manœuvre et de la précision des effets, réduisant a priori les risques de dégâts collatéraux. L'IA peut ici apporter une rapidité supérieure à celle de l'Homme dans l'analyse des situations et une adaptation en fonction du contexte et donc une augmentation des chances de survie en cas d'attaques directes, ou saturantes (sous réserve de biais ou de leurrage). La vitesse de déplacement des unités est indiscutablement un facteur d'efficacité. Une certaine autonomie des systèmes robotisés, notamment avec de l'IA embarquée, permettra d'améliorer la vitesse de progression des unités et de déploiement. Surtout dans la 3^{ème} dimension avec la possibilité de déployer des systèmes robotisés depuis des hélicoptères ou des avions de transport, plus facilement que des systèmes pilotés comme des blindés d'accompagnement d'infanterie.

Prenons pour base certaines missions traditionnelles d'une unité de combat embarquée, que nous robotisons pour l'exemple. Nous allons tenter d'en déduire les facteurs multiplicateurs d'efficacité.

A - La mission RENSEIGNER

Voir l'ennemi avant d'être vu est une clef du succès des armes. Le déport des capteurs embarqués par une plateforme robotique (caméras haute-résolution, thermiques, infra-rouge, intensification de lumière etc.) permet aux unités de voir plus loin et donc d'organiser son dispositif avec réactivité, voire de gagner, au niveau du groupe de combat, des capacités de renseignement dans la profondeur actuellement disponibles à des échelons supérieurs.

Le facteur multiplicateur est ici à la fois la surface que peut connaître ou contrôler une unité comme indiqué ci-dessus, mais aussi la vitesse d'exécution de l'unité. Cette vitesse d'exécution va permettre de traiter la menace dès sa concrétisation et, par réaction

immédiate, d'éviter à l'ennemi de déployer son dispositif et ainsi contribuer significativement à la réduction de la boucle OODA.

B - Les missions RECONNAITRE et FREINER

Elle s'effectue très souvent sur un fuseau déterminé, dédié à l'unité. Or au sein de ce fuseau peuvent apparaître des zones obstacles qui entravent la progression en mode offensif, qualifiés de Slow Go, comme des bois par exemple. Porter un appui feu par des UGV armés (associés à des UAV) de l'unité permettra de sécuriser la progression au travers de ces zones. La reconnaissance des zones lacunaires pourrait être déléguée à ces systèmes robotiques, ce qui permet une économie de temps et de moyens. En mode défensif, les systèmes robotiques permettront de réagir face à ces masques en comblant certains espaces plus exposés.

C - La mission JALONNER

L'utilisation de drones armés dans la troisième dimension permettra de porter et d'appliquer des feux plus loin et obliger l'ennemi à se dévoiler en se réorganisant. Il sera ainsi possible de déterminer les axes d'effort de l'ennemi, repérer sa formation de combat et en observant sa réaction, de déterminer la position de son 2^{ème} échelon, souvent crucial à connaître pour adapter notre dispositif en conduite. Le facteur multiplicateur est ici la vitesse de réaction de l'unité.

D - Les missions COUVERTURE, FLANC-GARDE

Ces missions indispensables à la sécurisation d'une manœuvre plus générale sont très gourmandes en ressources humaines et en matériel [19]. Le fait de dédier ces tâches à des systèmes robotiques permettra d'optimiser l'utilisation des ressources humaines en fonction des besoins. Ces ressources humaines pourront être versées dans une unité en réserve, à la disposition du dispositif, et activables selon les alertes que leur fourniront ces systèmes à qui seront déléguées les fonctions de couverture, de flanc-garde ou d'arrière-garde. De même ces systèmes pourront ponctuellement remplacer l'être humain lors de phases de relève et de recueil pour assurer la sécurisation de la bascule. Enfin la mutualisation des informations numériques échangées entre les plateformes robotisées et les plateformes habitées devra assurer la déconfliction, action qui consiste à coordonner les chaînes de commandement entre elles (artillerie, infanterie, aviation etc.), pour éviter tout risque de dégâts fratricides. Le facteur d'optimisation à considérer ici est celui de l'économie des moyens humains.

E - L'optimisation des missions des unités d'appui :

L'IA peut apporter une optimisation dans la répartition des moyens d'une unité sur zone. A partir de l'étude terrain, elle peut proposer un placement qui prend en compte les potentialités maximales de ses équipements, tout en évitant les recouvrements de couverture de feu etc. Elle permettra également de combler les espaces lacunaires détectés entre unités par des systèmes robotiques, et une meilleure optimisation de la

répartition des secteurs de tir et d'observation. Le facteur d'optimisation à considérer ici est celui de l'organisation des moyens à disposition de l'unité, capteurs et effecteurs dont ses feux, et donc de son efficacité et de sa sécurité.

Q2 – Puissance

La puissance d'une unité est donnée par ses moyens, mais aussi par sa vitesse d'exécution, laquelle a été traitée ci-dessus. La multiplication des moyens et la saturation de l'espace physique et temporel par une capacité de feu offre un avantage considérable à celui qui maîtrise cet espace. Identiquement, le déploiement de capacités non cinétiques comme des systèmes de guerre électronique ou de déminage (EOD ou NEDEX selon les cas) augmente significativement la capacité d'action d'un groupe de combat, soit en élargissant son spectre de missions, soit en permettant une domination de l'espace. C'est ainsi que les systèmes robotisés en essaim permettent une saturation de l'espace ayant des effets psychologiques certains, entraînant une baisse du moral chez celui qui subit une telle omniprésence menaçante sur sa zone. La transformation numérique est, en principe, un amplificateur d'efficacité pour les unités militaires déployées sur le terrain.

Les technologies numériques vont permettre d'activer la fonction « combat collaboratif » par l'infovalorisation des données remontant de différents capteurs (Blue Force Tracking, répartition des objectifs ou des appuis entre différents effecteurs selon les secteurs, mutualisation des moyens, etc.).

Les systèmes robotiques y participent pleinement, au côté des équipements traditionnels numérisés (système Scorpion), car ils sont par construction des équipements numériques reliés entre eux et au service des unités. Ainsi ces robots peuvent servir de relais de transmission, de coordination entre les plateformes et combattants débarqués, peuvent observer, surveiller, appliquer des feux et aller au résultat.

L'ensemble de ces fonctionnalités dédiées à ces systèmes va permettre d'augmenter le rapport de force d'une unité sous plusieurs aspects :

- Augmentation de la surprise par la diversion jouée par les robots (déception) et par l'adaptation de la manœuvre amie après renseignement robot (dissimulation);
- Perturber l'adversaire ou dénier ses communications (impulsions électromagnétiques, saturation de l'espace, etc.) ;
- Porter la destruction en tout point de l'espace (UGV-UAV armés) ;
- Effet psychologique sur l'adversaire.

Q3 – Economie des moyens humains

L'économie des moyens humains peut être abordée sous deux angles : La réduction des effectifs pour une même mission et la réduction de la dangerosité au combat. Il est

également intéressant d'indiquer que ces deux angles sont la hausse de l'efficacité opérationnelle.

La réduction des effectifs (Δ) se calcule tout simplement par la fonction :

$$\Delta = \text{« gain en effectifs réduits »} - \text{« extra effectifs opérateurs robots »}.$$

Où les extra effectifs sont l'ajout d'opérateurs dans l'unité pour piloter et contrôler les robots.

Unité	Détail	Extra effectifs opérateurs robots	Gain en effectifs réduits	Gain en efficacité (0 à 10)	Gain en protection (0 à 10)
Groupe de combat robotisé d'une Cie d'INF	Ajout d'un groupe robots à une Cie d'INF	0/1/3 (extra opérateurs)	Aucun	Déport observation et appui (7)	Robot Evasan Robot de combat zone urbaine (5)
Train de Combat n°1 (logistique)	3 UGV pour soutien Log.	0/1/3 (extra)	Aucun	Meilleure couverture de l'espace (3)	Déport danger (8)
Observateurs d'artillerie	Certains observateurs d'artillerie deviennent opérateur robot 3D	0/1/3 (Personnels des équipes d'observation et de Coordination deviennent opérateurs)	Equipes d'observation et de Coordination passe de 0/4/4 à 0/2/2	Meilleure observation (6)	Augmentation protection (4)
Groupe mortiers en appui d'une Cie INF	Remplacement du groupe mortier par un groupe UAV armés	0/1/3 (extra opérateurs)	0/2/14 (dissolution du groupe mortier)	Meilleure précision + meilleure couverture sur zone (8)	Absence de tirs de contre-batterie (9)

UGCS (blindé du futur)	<i>Le char du futur est multi-plate-formes robotisées</i>	0/1/1 (chef + adjoint formés opérateurs)	0/1/3 remplacé par 0/1/1 pour un blindé habité et 2 blindés unmanned	Mutualisation des effets feux : 3 canons au lieu de 1 (8)	Déport contact (7)
Peloton UGCS (blindé du futur)	<i>Peloton de UGCS (nouvelle organisation optimisée)</i>	0/1/1 (chef + adjoint formés opérateurs)	1/3/12 (4 blindés) + 0/4/12 (4 VBL) remplacés par 1/1/0 X 1 pour un blindé habité et 3 blindés unmanned.	Même effet Feu qu'un peloton actuel (2)	Déport contact (9)

Légende $x/y/z$: x =officier, y =sous-officier, z =soldat

Les exemples pris dans le tableau ci-dessus montrent que les robots peuvent dans certains cas apporter une réduction d'effectifs, mais uniquement dans des cas de modification significative de l'organisation des unités de combat. Par exemple en remplaçant le groupe de servants mortier par un groupe d'UGV-UAVs armés réduit la dotation en hommes de 0/2/14 à 0/1/3 pour une efficacité qui pourrait être envisagée comme similaire.

De même des études sur le char du futur MGCS (Main Ground Combat Systems) présente un concept de trois véhicules blindés dont un seul habité, ce qui réduit les effectifs en personnel en remplaçant l'équipage de deux blindés par un pilotage à distance. Et dans le dernier cas remplaçant même le peloton. Mais ce calcul doit être mis en correspondance avec le gain en efficacité et le gain en protection des combattants qu'apporte l'utilisation des systèmes robotisés pour une même mission. Ces gains sont symbolisés par une valeur de 0 (aucun avantage) à 10 (avantage exceptionnel) dans ce tableau, avec des valeurs prospectives pour l'instant. Nous ne reviendrons pas sur le gain en efficacité traité plus haut.

Pour ce qui est de la protection du combattant, celle-ci passe par un déport du danger ailleurs que sur lui-même et de son unité. Or c'est bien ce qu'offre la perspective d'utiliser des systèmes robotiques en lieu et place du combattant, lesquelles permettent le déport du danger et donc un gain en protection. Ce sont par exemple eux qui prendront la menace (ex : IED) en lieu et place du démineur. Ce gain est facteur de supériorité opérationnel car il évite la diminution de la capacité opérationnelle d'une unité dans le temps, l'homme étant épaulé par des systèmes sur lesquels il s'appuie, systèmes probablement composé de 2 ou 3 vecteurs qui se relèvent le temps de se recharger en énergie.

Un dernier grand avantage de la robotisation d'une unité est la capacité de cette dernière de conserver les ressources humaines « économisées » par l'utilisation de robots, et ainsi de constituer une réserve en potentiel de combattants prête à intervenir en fonction de la friction du moment, ce qui contribue aux trois principes de la guerre du maréchal Foch qui sont

- 1) la liberté d'action,
- 2) l'économie des moyens et
- 3) la concentration des efforts.

Ainsi le chef tactique disposera d'une réserve supérieure à la doctrine actuelle pour pallier l'ensemble des menaces. Cela dit, il appartient également de prendre en compte en amont l'évolution de la question RH pour disposer d'opérateurs de niveau sous-officier ou militaire du rang qui soient suffisamment forcés à l'opération, à la compréhension, voire à la maintenance de ce type de technologies. Le gain humain est donc dans ce sens quantitatif, mais il impose une refonte qualitative.

Q4 – Extension de la zone de couverture

La révolution qu'apporte la robotique militaire est celle du déport, voire de la massification, des capteurs et des effecteurs et de la mutualisation de ces derniers. La collaboration entre unités militaires traditionnelles et ces nouveaux pions tactiques permet une extension de la zone couverte et contrôlée par une unité et une optimisation de la gestion de ses moyens.

L'efficacité d'une unité militaire peut se mesurer par la surface terrain qu'elle peut contrôler, c'est à dire sa capacité à renseigner la zone et à appliquer des feux si nécessaire. Dès lors, la capacité d'action de l'unité devient celle de la portée effective de ses capteurs, et de ses armes.

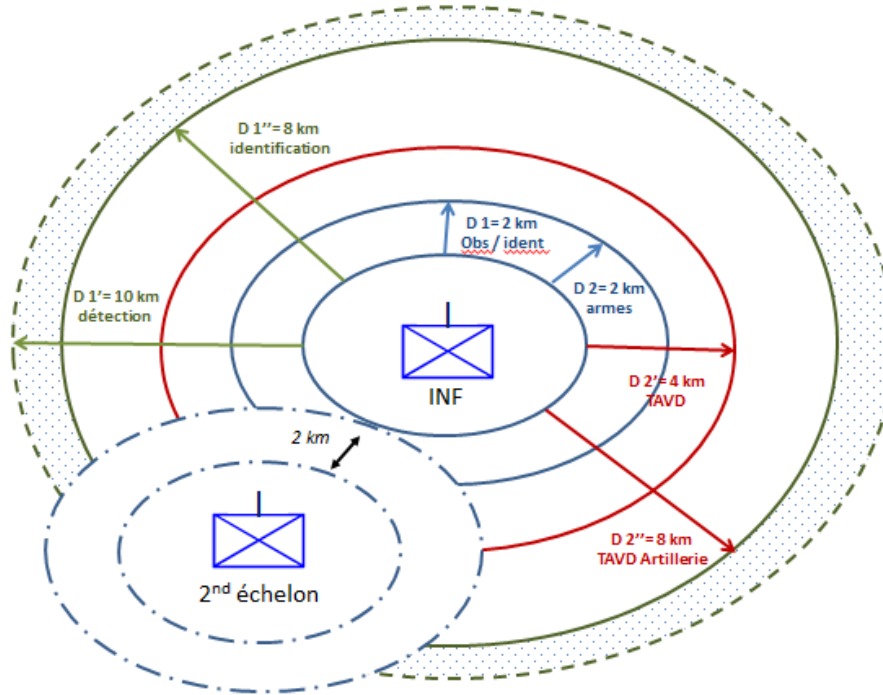
Il fallait une section d'infanterie en 14-18 pour tenir 100m de terrain en ligne, aujourd'hui on est autour de 500m à 600m de terrain linéaire. Avec Scorpion, la dimension collaborative fait passer ce chiffre à 1000m en estimation grâce au soutien des plateformes et la mutualisation des effecteurs. La raison est à trouver dans les facteurs suivants :

1. Abandon de la liaison à vue, remplacée par une liaison numérique entre les plateformes et les combattants (en une suprématie sur l'espace électromagnétique).
2. Un retour visuel plus rapide sur les destructions effectuées, ce qui permet une meilleure réactivité dans le suivi du renseignement et la connaissance des effets de neutralisation.

3. La mutualisation des moyens, notamment des moyens-feu, autrement appelé combat collaboratif, consistant à optimiser la mise à disposition des effecteurs de chaque plateforme en fonction du contexte.

Ces éléments sont à mettre au crédit de la numérisation de la transmission des données. L'utilisation de plateformes robotiques apporte un facteur multiplicateur à ces éléments. En effet, par le déport des capteurs et des effecteurs, la portée de l'action militaire va se trouver augmentée d'autant que le déport sera possible.

L'image suivante permet de schématiser l'extension possible d'une zone contrôlable par une compagnie d'infanterie.



Légende : bleu = existant en 2020, rouge = déport des feux par des robots, vert = déport des capteurs par des robots

Sur ce schéma, est représentée en ovale une zone théorique de couverture d'une compagnie d'infanterie. La portée de ces armes est aujourd'hui autour de 2 Km (distance D2), et celle de ses moyens d'observation d'autant (distance D1). Un second échelon suit à 2km en arrière.

La possibilité de déporter des moyens d'observation par des UGV, associés à des UAV œuvrant dans la 3^{ème} dimension, permettrait d'augmenter considérablement les distances de détection. Dans le cas optimal, c'est à dire un terrain de type désert où aucun obstacle naturel ne peut entraver la vue, une élongation jusqu'à 10km (D 1') au plus loin pour la détection de possibles menaces est souhaitée pour un temps d'adaptation au danger (cette distance correspond à un temps de réactivité d'une heure par rapport à l'arrivée de l'ennemi dans la mesure où une unité d'infanterie mécanisée se déplace à 5 km/heure en reconnaissance offensive. Les unités amies progressent au même rythme également) et si la technologie le permet, jusqu'à 8 km pour l'identification des cibles (D 1''). C'est la distance aujourd'hui confortable pour réorganiser le dispositif de l'unité en fonction de sa connaissance de l'ennemi. Au-delà de cette distance, nous sortons du cadre possible d'intervention d'une compagnie d'infanterie. Un calcul simpliste indique que le facteur multiplicateur théorique pour la surface d'une zone où l'identification de la menace est assurée par une compagnie d'infanterie est donc : $D1''^2/D1^2$ soit 16 fois !

Pour les feux, le Tir Au-delà de la Vue Directe (ou TAVD), qui correspond au feu indirect en termes tactique, permet de déporter les capacités de tir de l'unité au-delà de ses vues en ligne directe, un opérateur identifiant et localisant la cible à l'aide d'un robot ou d'un drone déporté, puis transmettant ses coordonnées aux moyens feux en dotation dans l'unité. On pourrait ainsi déporter en TAVD le tir des mortiers de 81 mm jusqu'à une portée accessible de 4 km (D2 '). Le facteur multiplicateur pour la surface d'une zone où les feux d'une compagnie d'infanterie peuvent s'exercer est donc : $D2'^2/D2^2$ soit 4 fois.

Néanmoins, idéalement, la portée du TAVD pour une compagnie d'infanterie correspondrait à une portée des mortiers de 120mm, soit 8 Km (D2''), ancienne dotation dans ces unités encore nostalgiques de leur puissance de feu et leur portée. On rejoindrait ainsi les valeurs ci-dessus pour l'identification des menaces. Il est bien évident que dans un environnement terrain avec couverts naturels (arbres, bosquets, mouvements de terrain), ce sont les compartiments de terrain qui définissent le besoin en élongation. Au mieux, une unité souhaite pouvoir contrôler un mouvement de terrain plus celui qui lui est adjacent, avec la possibilité de détecter toute présence ennemie dans le compartiment encore suivant en utilisant des robots déportés. Il est ainsi difficile de donner un chiffre du facteur multiplicateur de présence sur une zone de façon générale, car il est lié à sa configuration. On peut néanmoins introduire ici une autre donnée permettant un gain en vitesse d'exécution de la manœuvre et par-dessus tout la prise de l'ascendant sur l'adversaire car le rythme qui lui sera imposé sera bien supérieur au sien.

Des systèmes robotiques UGVs peuvent en effet assurer un repérage de la praticabilité des axes de progression de l'unité, la détection de menaces type IED, et ainsi augmenter le rythme de la manœuvre. Un autre effet positif de l'utilisation de systèmes robotiques UGV ou UAV, se déduit de la prise en compte de la fonction d'observation par ces machines. Les engins habités n'ont ainsi plus besoin d'effectuer des défilements d'observation avant de progresser d'un mouvement de terrain à un autre. La vitesse de déplacement s'en trouve ainsi augmentée, les véhicules effectuant des franchissements directs et n'ayant plus besoin de faire des rocade sur chaque mouvement de terrain (la rocade consiste à franchir le mouvement de terrain à une distance supérieure à 200

mètres de la position du défilement d'observation. C'est ce qui est appelé un franchissement indirect). Notons que cette remarque ne s'applique pas au défilement de tir qu'il convient de conserver pour les véhicules ayant un moyen feu si l'unité est en phase d'approche de l'ennemi.

Indicateur de mesure de performance des unités robotisées ou non robotisées

Nous proposons ici un indicateur de mesure de la performance d'une unité pour la réalisation d'une mission dans un milieu et dans une durée définie. Cet indicateur s'appuie sur les différents facteurs de performance développés précédemment, et se veut les intégrer dans une formule simple permettant de comparer la performance d'une unité dans la réalisation de cette mission en fonction de son organisation, robotisée ou non. Cette performance dépend donc du nombre de robots utilisés par l'unité, et du delta en ressources humaines pour l'emploi de ces robots (qui peut être un gain ou bien à l'inverse un surcroît de combattants pour opérer les robots).

Les paramètres de cet indicateur sont les suivants :

R = le nombre de robots engagés dans l'unité

Δ combattants (R) = le delta en effectifs humains pour l'utilisation de R robots = *gain en effectifs – extra effectifs opérateurs robots*. A noter que Δ combattants (R=0) = 0 ;

SC = Surface couverte par l'unité en m² ;

L'agressivité A de l'unité = le ratio entre le nombre d'effecteurs de l'unité (nombre de canons par exemple) et la distance de précision en mètres résultante du traitement de l'objectif par des feux : A = Agressivité = $\frac{\text{nombre d'effecteurs de l'unité}}{\text{distance de précision des feux}}$

DE = la Durée d'Exécution = temps en minutes pour l'exécution de la mission ;

DV = Distance de Vulnérabilité = distance en mètres entre l'ennemi et les combattants les plus proches.

L'indicateur de performance de mission est donné par :

$$\text{Performance (R, } \Delta \text{ combattants (R))} = \frac{SC \times A}{DE \times DV}$$

Plus la valeur de cette performance sera élevée, plus l'intérêt d'utiliser des systèmes robotiques au sein de l'unité sera grand ! Elle s'exprime au final par le ratio : *nombre d'effecteurs de l'unité* / « minutes ». L'idée est de pouvoir mesurer le gain en performance par des tests sur le terrain, en effectuant une première mission avec les moyens en dotation d'une unité classique (ex : 174 personnels dans une compagnie d'infanterie), puis rejouer le même scénario avec une unité intégrant des systèmes robotisés. La valeur de performance permettra de mesurer la plus-value de l'organisation de l'unité et de son efficacité opérationnelle lorsqu'elle met en œuvre des robots.

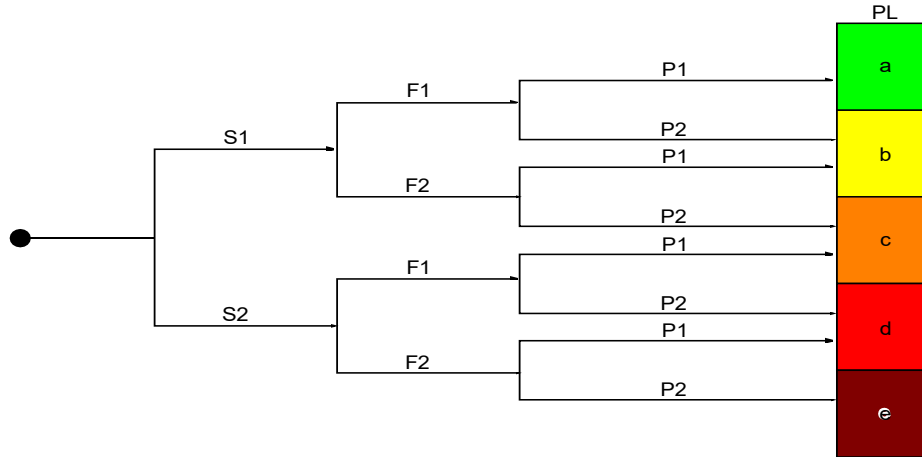
Mesure de risques

Il serait possible d'étudier les risques relatifs à l'exécution d'une mission par une unité au travers des tableaux AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs effets et de leur criticité, qui désigne une méthode élaborée par l'armée américaine dans les années 1940) qui analysent les risques et leur dangerosité, ainsi que leur niveau de probabilité d'occurrence. Si les robots sont sensés diminuer le « brouillard de la guerre », la friction elle est susceptible d'être augmentée par le degré de technologie déployé ainsi que la contraction temporelle du cycle OODA. Il faut en cela appliquer les matrices de risques traditionnelles (probabilités/occurrence/capacité d'évitement) afin d'estimer les endroits où se situent les principaux enjeux liés au déploiement des UGV dans les groupes de combat terrestres.

Le développement de la robotique au sein des unités de combat va modifier considérablement les capacités d'une unité opérationnelle à manœuvrer et à conserver une empreinte sur le terrain. L'extension de la zone couverte va augmenter les normes d'engagement de la doctrine, c'est-à-dire déceler en profondeur les menaces, identifier sans être à la portée de l'ennemi, détruire l'adversaire au plus loin. De plus, avec un renseignement obtenu plus en amont, la conduite de l'opération sera facilitée et accélérée par notre nouvelle faculté d'anticipation. Possédant davantage d'effecteurs, et avec une précision supérieure aux armes existantes, l'agressivité des unités sera décuplée. Le bouleversement majeur de l'emploi des robots se caractérise de fait par une meilleure répartition des combattants sur le champ de bataille, certains desquels pourront être versés en réserve de l'unité, ce qui constitue un progrès tactique notable en considération des trois principes de la guerre du maréchal Foch. L'indicateur de performance d'une unité proposé dans ce chapitre est une proposition de mesure de quantification de ce bouleversement inéluctable et à venir.

Un futur art de la guerre se dessine, mais il nous faut analyser plus en détail les risques encourus par l'augmentation de la « friction technologique » et les impacts organisationnels qu'elle induit, ce qui devra faire l'objet d'une prochaine étude et publication sur le sujet.

Il serait ainsi possible d'appliquer, moyennant adaptation, le système d'évaluation de risque de la norme ISO 13849-1 relative à la sécurité des machines, fondée sur une arborescence des effets et enjeux.



Légende : S désigne ici la gravité de la défaillance (S1 : mineure, S2 : critique), F la fréquence ou la durée d'exposition (F1 : rare à assez fréquente, F2 : fréquente à continue) et P la possibilité d'éviter le phénomène ou de limiter le dommage (P1 : possible, P2 : rarement possible). Le niveau final de risque est noté de a à e selon l'importance de celui-ci

4 Cybersécurité et sûreté des UGV

La question du niveau de protection d'un système UGV face à des agressions physiques et logiques et son niveau de résilience associé conditionne l'ensemble des autres métriques. Autrement dit, un UGV qui viendrait à être mis hors de combat temporairement ou définitivement, par une action de type cyberélectronique, aurait un impact potentiel sur les performances de l'unité qui l'utilise.

Une cyberattaque réussie sur UGV élèverait le niveau de risques encourus par le groupe de combat, engendrerait une perte de puissance (Q2), et abaisserait le niveau d'efficacité de l'unité (Q1). Les effets indirects ou retardés viendraient affaiblir la capacité de résilience du groupe de combat, le niveau effectif de coopération homme-machine et l'économie RH qui ne pourrait se réaliser.

Il faut donc rechercher un niveau de protection optimal assuré par la sûreté / sécurité native du dispositif.

La conception d'un UGV doit tenir compte du spectre des menaces apparaissant aux différents stades de son cycle de vie.

Le tableau suivant fournit une liste de bonnes pratiques à mettre en œuvre pour une sécurité « by design » de l'UGV.

Cycle de vie de l'UGV	Mesures et bonnes pratiques de sécurité
En phase de conception	<ul style="list-style-type: none"> - Etudes amont classifiées et protection de l'information adaptée, - Environnement de travail et échanges protégés adaptés, - Analyse des risques itératives (type EBIOS Risk Manager ou ISO 27005, - - Organisation Sureté/Sécurité + PSSI opérationnel, - Intégration pleine et entière des risques de malveillances et de défaillances aux études, - Sélection des partenaires (sous-traitants – co-traitants) : Clauses contractuelles + définition des mesures de sécurité obligatoires associées,
En phase de développement	<ul style="list-style-type: none"> - Partenaires (sous-traitants – co-traitants) : Evaluation des mesures obligatoires devant être mises en œuvre. Pénalités voire dénonciation contractuelle en cas de manquement(s) grave(s), - Processus d'homologation de sûreté/sécurité (dossier, revues, tests et audits, commission d'homologation)
En phase de production	<ul style="list-style-type: none"> - Partenaires (sous-traitants / co-traitants) : évaluation continue des mesures obligatoires devant être mises en œuvre. Pénalités voire dénonciation contractuelle en cas de manquement(s) grave(s).

Vers une résilience efficiente

L'UGV aura été conçu en tenant compte des principales agressions cyberélectroniques (*spoofing* GPS/Galiléo), saturation (DoS, DdoS), tentative de prise de contrôle à distance, etc.).

Au-delà d'un niveau de sûreté / sécurité très élevé, l'UGV pourrait intégrer deux innovations fonctionnelles :

- Un système de combat opérant même à l'arrêt :
 - avec communication : système de communication secondaire optique voire ultrasonique),
 - sans communication : mode conduite de tir prudente (tir si identification > 80% par exemple),
- L'intégration d'un *kill switch phygital* pouvant être auto-activé ou activé à distance par un opérateur.

Métrique du niveau d'assurance sûreté / sécurité

La résilience d'un UGV peut être étudiée en le décomposant en sous-systèmes (calculateurs, liaison de données, bus, etc.) afin d'établir le niveau de disponibilité et de sécurité attendu pour chaque composante selon plusieurs scénarii qui mêlent défaillance et agressions cyber.

Il reste ensuite à déterminer des objectifs d'assurance / sécurité que l'on réalise par l'application de niveaux d'assurance à l'aide d'une matrice risques-impacts [20],[21]

Niveau de risque		Impact				
		V	IV	III	II	I
Vraisemblance de la menace						
		Pas d'effet	Effet mineur	Effet majeur	Effet imprévisible	Effet catastrophique

PV	Fréquent	BAS	MOYEN	MOYEN	HAUT	HAUT
PIV	Probable	BAS	BAS	MOYEN	MOYEN	HAUT
PIII	Lointain	BAS	BAS	BAS	MOYEN	MOYEN
PII	Extrêmement lointain	BAS	BAS	BAS	BAS	MOYEN
PI	Extrêmement improbable	BAS	BAS	BAS	BAS	MOYEN

Matrice risques - impacts

5 Discussions et perspectives

Cet article s'interroge sur l'économétrie associée à l'emploi des drones terrestres (UGV). Un drone terrestre peut s'articuler en plusieurs segments (domaine d'application, poids, mode opératoire, type de mobilité, composantes, charge utile embarquée, source d'énergie). Mais ces caractéristiques techniques doivent ensuite être analysées dans le cadre de l'emploi et notamment de l'emploi tactique. Dans cette perspective, nous avons identifié deux cadres simplifiés d'emploi d'UGV : celui combinant un opérateur humain et un robot ; celui entre un opérateur humain et plusieurs robots. Dans le premier cadre (un et un), plusieurs métriques bien connues ont été rappelées : elles portent sur l'interaction Homme-Robot (durée d'interaction (DI), temps d'attente durant l'interaction (TAI), impact d'interaction (II) ; et sur l'efficacité de négligence : durée (DN), impact (IN). Dans le second cadre (un et plusieurs), nous avons évoqué les métriques Fan out et l'efficacité de l'allocation d'attention, très étudiées en robotique.

Enfin, nous avons identifié une classe supplémentaire de métriques, liées à la complexité de la mission, à la complexité environnementale, à la perception des dynamiques, à l'indépendance du système face à une supervision humaine et une dernière classe, comparant le coût et la performance associée à la réalisation d'une tâche par une unité

Pour évaluer cette performance, l'article s'intéresse notamment aux gains permis par un drone terrestre. Si beaucoup pensent intuitivement à des économies, l'article montre que quatre types de gains sont possiblement attendus : l'efficacité dans l'exécution de la mission, la puissance, l'économie des moyens humains et l'extension de la zone de couverture. C'est pourquoi l'article définit deux métriques nouvelles, l'une mesurant la performance tactique de l'UGV, l'autre mesurant les risques associés. C'est d'ailleurs ici que se situe l'une des principales complexités de la modélisation de l'emploi des drones terrestres. En effet, selon une approche clausewitzienne, la friction et le brouillard de la guerre sont par nature non modélisables, du moins dans leur entièreté [22].

Il appartient également de considérer que l'UGV demeure un objet cyber qui est, par nature, vulnérable aux agressions logiques comme tout système informatique. De fait l'UGV est face à une double vulnérabilité, à la fois physique – comme les soldats qu'il remplace ou qui l'accompagnent – mais aussi cybernétique. Cette logique impose ainsi de penser une double protection de celui-ci par blindage et par logiciel. De fait cette double vulnérabilité renforce également le niveau de précaution nécessaire lors de l'introduction de telles unités robotiques au sein des forces militaires : si leurs capacités renforcent les groupes de combat, leur mise hors service brutale risque également de sensiblement les affaiblir.

Dans un futur proche, il conviendrait de tester ces différentes métriques, notamment auprès d'unités réelles (niveau du groupe de combat) comme le font les forces armées américaine, israélienne et russe (et probablement chinoise). En effet, la plupart des expérimentations réactives testent l'efficacité du robot ou sa facilité de prise en main. Rares sont celles qui cherchent à tester des indicateurs communs qui permettraient de comparer des robots entre eux ou entre générations de robot, y compris dans de multiples situations d'environnements permissifs ou non.

Au-delà, il convient de réfléchir sur la question des nombres. Le modèle simplifié d'une configuration « un homme et un robot » ou d'une configuration « un homme et plusieurs robots » peut s'avérer insuffisant face à la complexité opérationnelle. Le premier cas est aujourd'hui le plus couramment employé dans l'armée de Terre, notamment pour ce qui concerne les nano- et les micro-drones volants. S'agissant d'ailleurs de drones plus volumineux, on observe des configurations plus complexes : plusieurs opérateurs peuvent contribuer à l'utilisation du drones (mise en œuvre, analyse des informations, déclenchement des actions) avec d'ailleurs des unités (et donc des localisations et des contextes d'emploi) différentes. Mais il s'agit de drones volants dont la stabilité dépend du milieu aérien. Dans le cas d'un UGV, celui-ci peut tout simplement se mettre à l'arrêt sans se mettre en danger ou gêner autrui. Ceci motive qu'on puisse

envisager plusieurs drones dépendant d'un opérateur, voire un essaim de drones disposant de capteurs-effecteurs différents pour une plus grande polyvalence. Se pose ainsi la question fondamentale de la masse telle que définie par l'Armée de Terre française dans ses facteurs de supériorité opérationnels. Non seulement les UGV pourraient permettre de disposer d'un volume plus grand de capacités déployées, mais également renforcer la polyvalence du groupe de combat, permettant non seulement à celui-ci de couvrir plus de territoire, mais également un spectre de missions plus vaste.

La réalité tactique force à considérer que le « un opérateur » peut se démultiplier. En effet, à part dans les films, on ne combat jamais seul. Une unité est toujours engagée « en groupe » (que ce soit selon le volume d'un groupe de combat, d'une section, d'une compagnie ou d'un régiment). Sans aller aux niveaux supérieurs et rien qu'en restant au niveau du groupe de combat (dix hommes), on peut imaginer qu'un groupe manœuvre collectivement plusieurs drones. Il faut alors réfléchir à des métriques « plusieurs et plusieurs ». L'automatisation ne signifie d'ailleurs pas qu'un drone serait forcément attaché à chaque membre du groupe : certains pourraient avoir plusieurs UGV en essaim, quand d'autres membres du groupe n'auraient aucun UGV à opérer, leur mission étant spécialisée ailleurs. Il faudrait alors allier une intelligence collective avec une (ou plusieurs) intelligences artificielles.

De la même manière, cette réflexion ouvre également des questions plus profondes sur la réforme ou l'adaptation de l'ensemble des appareils militaires, au sein même (formation, entraînement, recrutement, maintenance, etc.) et hors (chaînes de production, capacités industrielles) des Armées. Si la robotique terrestre s'annonce comme une évolution majeure de l'action sur le champ de bataille, il importe d'en saisir tous les tenants et aboutissants afin de ne pas se trouver dépassé – y compris par une certaine technophilie dont les effets négatifs ont marqué les conflits des années 2000 – par une volonté d'intégration à tout prix sans réflexion *a priori*. Nous n'en sommes bien entendu pas là, mais ces quelques réflexions prospectives veulent illustrer les complexités ouvertes par le milieu terrestre et par la montée en puissance de l'intelligence artificielle.

Bibliographie

1. Markets And Markets Report – Unmanned Ground Vehicles (UGV) Market 2019 – 2025
2. J. W. Crandall, M. A. Goodrich, D. R. O. Jr., and C. W. Nielsen. Validating human-robot systems in multi-tasking environments. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, 35(4):438–449, 2005.
3. T. B. Sheridan. *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. The MIT Press, 1992.
4. P. J. Mitchell, M. L. Cummings, and T. B. Sheridan. Mitigation of human supervisory control wait times through automation strategies. Technical report, Humans and Automation Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, June 2003.
5. D. R. Olsen and M. A. Goodrich. Metrics for evaluating human-robot interactions. In *NIST's Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop*, Gaithersburg, MA, 2003.

6. Goodrich, M., and Olsen, D., Seven principles of efficient human robot interaction. In Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, (2003), 3943-3948. Washington, DC, 2003.
7. D. R. Olsen and S. B. Wood. Fan-out: Measuring human control of multiple robots. In Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI), 2004.
8. D. R. Olsen and M. A. Goodrich. Metrics for evaluating human-robot interactions. In NIST's Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop, Gaithersburg, MA, 2003.
9. Crandall Jacob W. and Cummings M.L. Developing Performance Metrics for the Supervisory Control of Multiple Robots, MIT, HRI 2007
10. ASTM Committee F45, Driverless Automatic Guided Industrial Vehicles, January 26, 2018
11. International Organization of Standards (ISO) 8373-2012 – Robots and robotics devices – vocabulary, 2012
12. Bostelman R. and Messina E. A-UGV Capabilities, Recommended Guide to Autonomy Levels, NIST, 2019
13. Berthier T. Systèmes armés semi-autonomes : que peut apporter l'autonomie ? Revue de Défense Nationale n°820 – RDN - Mai 2019
14. Hui-Min Huang and Elena Messina, "Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework Volume II: Framework Models Initial Version," National Institute of Standards and Technology Special Publication 1011-II-1.0, December 2007.
15. Hui-Min Huang, Kerry Pavek, Mark Ragon, Jeffrey Jones, Elena Messina, James Albus, "Characterizing Unmanned System Autonomy: Contextual Autonomous Capability and Level of Autonomy Analysis," Proceedings of the 2007 SPIE Defense and Security Symposium Unmanned Systems Technology IX, Orlando, FL, April 2007.
16. Hui-Min Huang, H., Elena Messina, Adam Jacoff, Robert Wade, Michael McNail, "Performance Measures Framework for Unmanned Systems (PerMFUS): Models for Contextual Metrics," Proceedings of the 2010 Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop (PerMIS'10), NIST Special Publication 1113, September 2010.
17. Ryan W. Proud, Jeremy J. Hart, and Richard B. Mrozinski, "Methods for Determining the Level of Autonomy to Design into a Human Spaceflight Vehicle: A Function Specific Approach, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100017272.pdf>, accessed November 2, 2017.
18. Gérard de Boisboissel, Autonomie et létalité en robotique militaire, Cahiers de la RDN, 2019, P. 45
19. Gérard de Boisboissel, the use of robots on the battlefield: benefits, constraints and limitations for soldiers, Combat Studies Institute Press, US Army combined Arms Center, 2013, P 203.
20. J.P. Blanquart, P. Biber, G. Descargues, E. Hazane, M. Julien, L. Leonardon, - Similarities and dissimilarities between safety levels and security levels, ERTS 2012
21. P. Biber, J.P. Blanquart, G. Descargues, M. Dulucq, Y. Fourastier, E. Hazane, M. Julien, L. Leonardon, G Sarouille, - Security and Safety Assurance for Aerospace Embedded Systems, ERTS 2012
22. Azar Gat, *A History of Military Thought: From the Enlightenment to the Cold War*, Oxford University Press, 2001.