

THEATRUM-BELLI.COM /RDN

2012

EUROSATORY

DEFENSE & SECURITE  
TERRESTRES

La réponse la plus complète

Une opportunité pour rencontrer tous les  
acteurs du continuum Sécurité-Défense

GENDARMERIE

S.W.A.T

Les robots de combat

L'allègement de l'empreinte logistique

Le blindage du futur

*Les Cahiers de la*

Revue Défense Nationale





# Eurosatory 2012

Préparation et mise en page  
Jérôme Dollé

# Sommaire

Eurosatory 2012 - juin 2012

## *Les robots de combat*

### **9 La robotisation du champ de bataille (1/3) : vers un nouvel écosystème du combat**

YAKOVLEFF MICHEL

Faire la guerre avec des robots n'est plus une fiction mais une perspective. Partant de l'axiome selon lequel la réflexion précède l'action, la thèse soutenue est que la réflexion sur les algorithmes déterminant le comportement individuel et collectif des robots doit précéder et alimenter la conception des engins en eux-mêmes. Corollaire de cette idée : la réflexion éthique doit être imbriquée dans la réflexion conceptuelle au sens large.

### **15 La robotisation du champ de bataille (2/3) : les caractéristiques majeures des robots**

YAKOVLEFF MICHEL

C'est par le rôle à jouer, la dimension, l'apparence, la mobilité et la furtivité requises que peuvent se définir les caractéristiques morphologiques des robots de combat sur le champ de bataille. L'auteur nous en livre une analyse saisissante.

### **23 La robotisation du champ de bataille (3/3) : conséquences tactiques, psychologiques et éthiques**

YAKOVLEFF MICHEL

De même que la réflexion doit précéder l'action, les algorithmes déterminant le comportement individuel et collectif des robots doivent précéder et alimenter la conception des engins eux-mêmes. Cette troisième livraison porte sur les conséquences tactiques, psychologiques et éthiques de leur introduction dans le combat.

### **31 Robotisation terrestre : entre réalité et fantasme**

RIBNIKAR DARKO

La robotisation militaire est en marche, le processus est irréversible. Cependant, le terme de « robotisation » est impropre ; et pour cause, les machines existantes sont dépourvues d'autonomie et d'intelligence artificielle de sorte que l'intervention humaine (décision et manœuvre) demeure indispensable. De plus, leur déléguer des missions suscite des réticences tenant à des considérations éthiques.

## *L'allègement de l'empreinte logistique*

### **43 Partenariats « Industrie-Défense » dans la logistique et le MCO**

LAFITTE JEAN-PAUL

Pour se concentrer sur sa mission principale, la défense peut solliciter le secteur privé et nouer des partenariats pour assurer une partie de son soutien. Si elle se doit de conserver une partie de ses expertises en interne, notamment pour les besoins des opérations, la défense peut bénéficier de nombreux atouts apportés par le secteur privé.

## 51 **L’empreinte logistique, la maîtrise par la visibilité**

VEISEMBURGER THIERRY

Le changement du contexte des engagements des armées en vigueur depuis plusieurs années est à l’origine d’une nécessaire mutualisation des soutiens qui incite à la maîtrise des capacités logistiques, érigées en véritable enjeu politique et stratégique. La maîtrise de l’empreinte logistique est ainsi conditionnée par la maîtrise des ressources dont la visibilité, permise par la maîtrise de l’information, est la seule garante de l’efficacité des soutiens.

### *Les blindages du futur*

## 61 **Orientations de la DGA dans ses activités de recherche en matériaux pour la protection**

MORTAIGNE BRUNO

Le terrorisme et les conflits asymétriques sont porteurs de nouvelles menaces qu’il convient d’endiguer au moyen d’approches innovantes. Pour ce faire, l’auteur préconise un raisonnement fondé sur un « concept de protection » ; puis dégage les recherches prioritaires afin d’assurer tant l’intégrité des combattants que la protection des infrastructures.

## 77 **Les blindages futurs**

PETITPAS ÉRIC, VALLÉE DANIEL, BETTENCOURT BENOÎT

Selon le volume à protéger, le coût alloué à la protection mais surtout le type de menace, les technologies de protection revêtent différentes formes. Tandis que la famille des menaces à effet global exige un travail de conception sur l’architecture mécanique de l’ensemble à protéger, la famille des menaces à effet local requiert un effort de modélisation. La maîtrise de la simulation apparaît, quant à elle, comme une priorité à l’heure où le nombre de paramètres à considérer se multiplie. À l’inverse des systèmes de protection active, délaissés du fait de la complexité de leur mise au point, les solutions « matériaux de protection » apparaissent de plus en plus attractives.



# Préface

Ce numéro spécial paraît sur le *blog Theatrum Belli* en coopération avec la *Revue Défense Nationale*. Les moyens de communication modernes paraissent les mieux placés pour évoquer les idées de nos chercheurs et les réalisations de nos industriels dans ces domaines, certes un peu techniques, mais qui participent à la vie quotidienne de nos armées en opérations.

C'est d'ailleurs dans ce but qu'ils ont été sélectionnés.

On ne saurait évoquer la technologie militaire des années 2010-2020 sans se référer aux robots de combat armés. Le général Yakovleff avait déjà posé les principes de leur conception et de leur utilisation dans des articles précédemment parus. Il nous a paru important de les rappeler pour situer la problématique. M. Ribnikar de la société Cassidian amène le point de vue d'un chercheur au sein de l'entreprise et décrit les bases de ce que pourrait être une machine autonome ou semi-autonome sur le champ de bataille et les implications technologiques mais aussi sociologiques de son insertion.

Les blindages futurs sont eux aussi dans le champ des préoccupations du combattant et on les comprend bien. La multiplication des engins explosifs improvisés, les EEI, dans les dernières opérations, la migration de nos combats vers la contre-insurrection, font de ce sujet un point d'attention se généralisant dans toutes les sociétés occidentales. Ce débat a commencé dès 2002-2003 chez les Américains en Irak et s'est répandu depuis. Il ne s'agit pas là de promouvoir les recettes du savant Cosinus sur la détection des EEI mais bien d'assurer à nos combattants les moyens de survivre à ces agressions. Le travail imposant de M. Mortaigne, chercheur de la Direction générale de l'armement, expose l'état de l'art dans cette spécialité. Il est heureusement illustré par le texte de MM. E. Petitpas, D. Vallée, B. Bettencourt de la société Nexter qui nous en montrent une traduction technique et illustrent les voies de réalisation évoquées par l'article précédent.

Enfin, voici un sujet d'actualité particulièrement brûlant, à l'heure où les forces françaises doivent quitter l'Afghanistan, c'est la réduction de l'empreinte logistique. En publiant un article récent de M. Lafitte, il nous a paru utile de resituer cette question vitale dans le contexte général actuel. M. Veisemburger de la société Cassidian décrit avec précision et réalisme les principes qui doivent présider à la conception de la logistique militaire moderne en la fondant bien évidemment sur l'information et les systèmes qui l'assistent.

C'est donc un numéro qui porte aussi bien sur l'attaque, que la défense et le soutien, suivant en cela les principes classiques de l'art militaire. Il y manque le paragraphe renseignement. Ce n'est pas par dédain mais ce sujet a été amplement traité par ailleurs.

Pour la *RDN*, le général François Chevant



■ **Les robots de combats**

RDN



# La robotisation du champ de bataille <sup>(1/3)</sup> : vers un nouvel écosystème du combat

Michel Yakovleff

Général, représentant du *Saceur* (commandant suprême des forces alliées en Europe) au Comité militaire de l'Otan.

Toute évolution technologique à un impact sur le champ de bataille, c'est là un fait historique aussi constant que la guerre. Ainsi, le fer a supplanté le bronze, puis l'acier a remplacé le fer. Le développement de la chimie a donné le feu grégeois puis les explosifs et, allié au développement de la métallurgie, il a conduit à l'invention des armes à feu. La mécanisation a éliminé le cheval du champ de bataille et ouvert le domaine aérien. On pourrait multiplier de tels exemples.

Aujourd'hui, la miniaturisation, l'informatisation et d'autres avancées technologiques permettent l'émergence de robots dont le nombre et les capacités semblent appelés à croître de façon exponentielle. Il ne s'agit donc pas de se demander si l'introduction des robots dans la bataille est souhaitable ou non, mais d'imaginer les délais et les circonstances de cette entrée en lice. Sans quoi nous risquerions une réédition de la querelle stérile des cavaliers et des tenants de la motorisation à l'issue de la Première Guerre mondiale. Nonobstant, reconnaître l'inévitable ne le rend pas forcément agréable. Le danger est évidemment d'écarter l'homme du champ de bataille. On pourrait imaginer qu'à terme, des robots totalement autonomes se feraient la guerre entre eux, pour le compte des humains mais hors de leur présence. Si c'est là l'avenir rêvé de la guerre, ce n'est pas celui de l'humanité. Toute réflexion sur la robotisation du champ de bataille doit conserver toujours présente, en filigrane, cette réserve conceptuelle et morale majeure.

## Comment définir le robot ?

Le robot tel que nous l'entendons dans le cadre de cette réflexion \* présente trois caractéristiques majeures.

Il se déplace par ses propres moyens, au moins pour l'essentiel de ses missions. Un robot est un appareil mobile autonome, tant mécaniquement (il n'a pas besoin d'être poussé, tiré, attelé, porté, lancé, jeté, au moins pour l'essentiel des tâches susceptibles de lui être confiées) que surtout, décisionnellement.

## La robotisation du champ de bataille <sup>(1/3)</sup> : vers un nouvel écosystème du combat

### \* Terminologie du robot (selon EMAT 2011)

Plateforme mobile terrestre réutilisable, équipée de capteurs et d'effecteurs, destinée à réaliser, avec un certain degré d'autonomie, des actes élémentaires dans le cadre de la manœuvre terrestre. Finalité de la robotique militaire terrestre : permettre au soldat de se concentrer sur ce qu'il est seul capable de réaliser, le robot accomplissant, en appui du combattant ou à sa place, certaines tâches bien ciblées.

Il agit, au sens où il a une fonction autre que le seul déplacement (il observe, porte, tire, etc.). Cette précision est importante car, dans le cadre actuel du développement de la robotique, nombre de robots n'ont d'autre fonction que se déplacer. Nous parlerons de robots autrement plus opérationnels.

Surtout, le robot dispose d'une autonomie décisionnelle, c'est-à-dire qu'il adapte son comportement à son environnement, d'une façon plus ou moins prédéterminée par les algorithmes intégrés par le concepteur.

Il y a des engins qui se déplacent mais restent pilotés, comme les drones ou les robots utilisés par les démineurs. En ce cas, et dans le sens de notre réflexion, le terme de « robot » est abusif. Un engin téléopéré, quel que soit son degré de sophistication, n'est pas un robot. À l'inverse, il y a des engins entièrement autonomes mais qui ne se déplacent pas. La mine est l'exemple le plus basique. Elle a donné naissance à la famille des capteurs abandonnés, dont la seule différence avec les mines réside dans le fait qu'ils envoient de l'information au lieu d'exploser. En ce cas, l'autonomie fonctionnelle dépourvue de toute capacité de mouvement les exclut de la famille des robots.

### **Comment définir l'autonomie fonctionnelle du robot ?**

Par définition, le robot a une perception autonome de son environnement ainsi qu'une capacité de raisonnement et de décision en interaction avec celui-ci. Les décisions qu'il prend découlent d'algorithmes prédéterminés mais limitent au maximum l'intervention humaine ; sans quoi nous en sommes revenus à l'engin téléopéré.

Par principe, les robots seront d'autant plus utiles qu'ils seront plus autonomes, précisément parce que leur autonomie allège le travail de l'homme. Pour la même raison que plus un chien sait faire de choses, plus il est utile.

Avec les technologies dites « d'intelligence artificielle », on sait concevoir des objets en simulation capables d'exécuter une mission tactique de façon autonome. Ils appliquent une doctrine, mettent en œuvre les savoir-faire nécessaires à la mission, perçoivent leur environnement et leurs homologues et savent emmagasiner de l'expérience tirée de leurs opérations grâce à des boucles de rétroaction. Par exemple, en simulation, on sait fabriquer une unité interarmes dont les chars et les équipages reconnaissent un axe, tombent en garde devant un obstacle, cherchent

La robotisation du champ de bataille <sup>(1/3)</sup> :  
vers un nouvel écosystème du combat

un itinéraire de contournement – tout en assurant la couverture de l'unité pendant sa recherche – équipent une brèche, franchissent et reviennent sur l'axe indiqué pour poursuivre la mission. En cas de rencontre avec l'ennemi, ils ouvrent le feu, appellent des appuis, se masquent, manœuvrent, etc.

On sait faire cela depuis une dizaine d'années, dans un ordinateur, de façon très crédible, à tel point que ces programmes permettent de remplacer les opérateurs humains en tant que « Anibas » (animation bas) dans un exercice d'état-major, faisant ainsi l'économie de nombreux figurants tactiques nécessaires pour abreuver l'échelon joueur des événements et comptes rendus résultant du combat. Il n'y a pas d'étape conceptuelle à franchir pour appliquer ces algorithmes à des objets réels, opérant dans le monde physique. Le robot que nous verrons bientôt sur le champ de bataille – s'il n'y est pas déjà – est donc capable de recevoir une mission et de l'exécuter, sans plus d'interaction avec son maître humain que l'homme qu'il est censé remplacer ; ce serait là le premier critère d'efficacité justifiant le choix du robot à la place de l'homme. Au minimum, il doit pouvoir faire aussi bien, pour l'essentiel de la mission.

La limite à l'autonomie est très claire si le robot en question a une capacité d'agression : il ne devrait pas pouvoir tirer sans ordre positif. Là encore, la comparaison avec le chien de combat est éclairante : le chien bien dressé, lorsqu'il perçoit une menace, émet un signal à destination de son maître (il grogne, baisse les oreilles, tombe en garde...) mais il lui faut un ordre explicite pour attaquer. En revanche, le robot doit pouvoir se protéger sans demander son avis au maître, par exemple en effectuant une manœuvre évasive. Selon la plasticité des robots, on pourrait envisager un bond en arrière, une esquivé, voire une déformation défensive similaire au coucher de l'homme sous le feu : par exemple, le robot étalerait chacun de ses organes pour limiter son profil vertical ou au contraire il les empilerait pour se masquer derrière un poteau. À cet égard, une conception modulaire articulée inspirée du *Rubik's cube* paraît une voie à explorer.

### **Le contexte d'engagement à privilégier**

Pour justifier l'investissement qu'elle requiert, la robotisation du champ de bataille doit apporter une réelle plus-value, soit en permettant de faire mieux ce que les hommes savent faire, soit en le faisant différemment, soit en faisant autre chose – qui reste à inventer mais qui apparaîtra forcément – selon la logique suivie par les technologies de l'information qui ont vu émerger des besoins et des fonctions non imaginées à l'origine.

Pour des raisons qui seront détaillées dans les livraisons à suivre, nous considérons que les robots de combat apporteront la meilleure plus-value dans les opérations urbaines, à courte portée, accompagnant une troupe débarquée. Cela n'exclut pas l'utilité de robots dans d'autres fonctions, avec un rayon d'action très supérieur à celui de l'infanterie débarquée. Mais pour les armées occidentales, qui

seront toujours confrontées à des problèmes d'effectifs et soucieuses de préserver leurs combattants, la priorité sera forcément accordée aux contextes les plus déséquilibrés et risqués.

Les robots peuvent ainsi se voir confier trois rôles différenciés : capteur, effecteur-agresseur, serviteur (logistique). À l'issue d'un raisonnement qui sera présenté plus tard, nous postulons que ces robots de proximité seront essentiellement orientés vers le rôle de capteur, laissant une partie conséquente au rôle de serviteur. Le robot agresseur serait plus marginal. Cette idée n'est pas immédiate, surtout parce que les efforts actuels portent plutôt sur les robots agresseurs. Nous pensons qu'il s'agit là d'une priorité erronée.

Le problème central est, en effet, celui de la détection et de la discrimination. Aucun robot ne saura détecter et identifier l'intention hostile. En revanche, il saura détecter la présence et le mouvement, récent ou actuel. Pour discriminer, le recoupement entre différents capteurs sera donc déterminant. Ainsi, quand on pense à la robotisation du champ de bataille, on pense à une pluralité de robots, voire à une multitude. Ces robots nombreux auront pour premier objet d'étendre et d'approfondir la zone de captage de l'information : en avant, mais aussi sur les flancs et en arrière, sur les hauts et dans les sous-sols.

La première conclusion conceptuelle est que le concept même de robotisation du champ de bataille nécessite une multitude de robots, dont nous pensons qu'ils seraient généralement mono-capteurs et de dimension réduite. On ne peut envisager de consommer l'effectif humain à contrôler cette multitude de robots, une expérience tactique récente ayant montré les limites de ce concept. Il faut donc que ces robots soient autonomes individuellement, dès lors qu'ils ont reçu une mission, mais aussi, et c'est encore plus important, qu'ils soient autonomes collectivement. Dans le domaine de l'intelligence artificielle, ce comportement est dénommé l'essaim. Chacun de ses composants dispose d'une autonomie étendue d'action, notamment pour assurer sa survie mais chacun conçoit en permanence son action dans le contexte élargi de l'ensemble. Il y a de ce fait intégration d'une multitude de volontés individuelles dans une volonté collective.

La deuxième conclusion d'ordre conceptuel est que les robots opéreront en essaim. En conséquence, le développement des robots du champ de bataille ne peut se concevoir sans le développement des algorithmes individuels et collectifs gouvernant la mission. Il importe de commencer par là, avant même de développer les appareils, plutôt que de suivre la logique inverse, qui est de développer les robots puis de les mettre en synergie.

## **L'impact des robots de combat sur le combat futur**

Pour faire mieux, on conçoit aisément qu'une troupe en reconnaissance ou en surveillance d'un secteur agira plus vite, avec une meilleure sûreté pour ses

La robotisation du champ de bataille <sup>(1/3)</sup> :  
vers un nouvel écosystème du combat

hommes, si elle est environnée d'un essaim de capteurs. Sans jamais être éliminé, le risque de surprise tactique sera fortement réduit. En outre, un essaim de surveillance permet à la troupe – à son élément humain – de focaliser son attention sur le secteur le plus dangereux, faisant l'économie de l'arrière-garde ou de la flanc-garde, par exemple. Le *ratio* de soldats utiles au combat principal sera amélioré. Sachant qu'une section en progression conserve 30 % de son effectif en deuxième échelon pour se couvrir vers l'arrière et fournir une réserve de manœuvre, la suppression ou la diminution de ce besoin permet un *ratio* offensif plus favorable.

La logistique est consommatrice en hommes et c'est d'autant plus vrai qu'on approche de la frange des contacts. À l'arrière, les grandes bases logistiques sont peu consommatrices en hommes grâce à la mécanisation (avec des trieurs-conditionneurs et des tracto-chargeurs, notamment). La robotisation massive de cette fonction est envisageable. Elle libérera peu d'hommes mais le gain reste significatif. En revanche, le transfert du chargement de camions-citernes en *jerrycans* et le port de ces *jerrycans* vers l'avant est épouvantablement consommateur. Ce qui est vrai du carburant l'est aussi des munitions, des vivres, etc. \*.

\* Bataille et logistique

Lors de la première bataille de Grozny (hiver 1994-1995), le tiers de l'effectif des forces russes en ville fut consommé par la logistique de l'avant et notamment par le transvasement du ravitaillement. Une conséquence lourde fut que les soldats, même retirés du combat, ne pouvaient se reposer parce qu'ils étaient employés à ces opérations logistiques. L'usure de la troupe, usure physique mais surtout psychologique, pesa fortement sur la bataille.

La mise à l'abri d'un blessé consomme une dizaine d'hommes pendant une à deux heures. Si le geste médical devrait rester l'apanage de l'homme, toute la mécanique du transport vers l'arrière pourrait être confiée à des robots. C'est en ce sens que la robotisation permettra de faire mieux.

Pour faire différemment, il reste à explorer toutes les possibilités apportées par ce nouvel écosystème combattant. Puisque nous avons établi que l'intelligence artificielle en sera le déterminant, cette exploration peut commencer dès aujourd'hui, en simulation, avant même d'avoir conçu les engins. La recherche opérationnelle doit anticiper le développement des appareils. Cette recherche est peu onéreuse et elle s'avérera sans aucun doute cruciale pour explorer les voies les plus exotiques, lever des doutes, confirmer des options. Le résultat le plus probable est que la diminution du facteur d'incertitude et d'inconnue tactique pesant sur toute troupe tâtonnant à la recherche de l'ennemi en modifiera profondément l'agressivité et notamment, sa vitesse de progression tactique hors de la zone contestée. Aujourd'hui, la vitesse de progression sous la menace d'une présence ennemie probable est réduite par la nécessité de conserver un appui prêt à agir dès le dévoilement de l'ennemi. Dès lors que l'unité considérée saura, avec plus de certitude, qu'elle n'est pas sous menace et découvrira l'ennemi, plus tôt et avec plus de précision qu'avant, elle acquerra une

vitesse de manœuvre supérieure. Son articulation sera sans doute modifiée, par l'amélioration du *ratio* entre les parts réservées à l'offensive et celles préservées pour réagir à l'inopiné. À terme, ces changements devraient aussi porter sur les parts respectives des armes. Dans le même ordre d'idée, pendant une phase de repos ou de pause opérationnelle, la totalité de la troupe pourra dormir tranquille, sans besoin de conserver des sentinelles, dès lors qu'elle ferait suffisamment confiance à son escorte robotique. Sachant que la fonction de sûreté mobilise généralement 10 % de l'effectif, voici encore une situation où une part significative de potentiel est préservée et peut donc être réinvestie.

Viendra certainement un moment où des idées nouvelles surgiront, que nous n'imaginons pas encore aujourd'hui. Lorsque les premiers ordinateurs ont été conçus, ils répondaient au besoin de gérer une masse de données. Personne n'imaginait les applications bureautiques, voire les jeux d'aujourd'hui. Cette logique s'appliquera fatalement. Le plus imaginaire prendra un avantage conséquent ; ce qui mettra le plus réticent en sérieux déséquilibre. Là encore, la recherche opérationnelle s'avérera fertile.

Une voie qui sera sûrement explorée est celle de la guerre entre robots. Le précédent historique de l'aviation est éclairant à cet égard. Au début, l'aviation servait à observer et les pilotes se saluaient en accomplissant leur mission. Puis l'un d'entre eux s'est mis en tête d'éloigner un importun et donc, a dégainé son pistolet et lui a tiré dessus, déclenchant une escalade et une spécialisation qui se poursuit près d'un siècle plus tard. Aujourd'hui, les chasseurs sont la part la plus symbolique de l'aviation moderne. On peut donc parier que deux troupes « robotisées » confieront une partie de la mission d'élimination des robots adverses à leurs propres robots. Viendra un moment où le combattant humain pourrait être tenté de laisser le champ de bataille des robots aux seuls robots. Nous arriverions ainsi aux limites éthiques de l'exercice, qu'il conviendra d'explorer avec scepticisme.

\*  
\*\*

En conclusion, la robotisation du champ de bataille devrait voir émerger un écosystème à base de robots opérant en essaim. Le développement de l'intelligence artificielle sera crucial pour exploiter tout le potentiel de ces appareils. La recherche opérationnelle peut, d'ores et déjà, contribuer à en déterminer les caractéristiques souhaitables, tant des engins pris individuellement, que de leur action collective au service et à proximité des humains. Cette recherche opérationnelle doit précéder le développement des appareils proprement dits. Nous étudierons dans la prochaine livraison les caractéristiques physiques les plus probables de ces appareils, ainsi que leur mode de contrôle. Une troisième livraison explorera les conséquences tactiques, psychologiques et éthiques de leur introduction dans l'environnement du combat.

# La robotisation du champ de bataille <sup>(2/3)</sup> : les caractéristiques majeures des robots

Michel Yakovleff

**L**es caractéristiques majeures des robots sur lesquelles nous nous proposons de réfléchir sont la fonction, la dimension, l'apparence, le rayon d'action et la vitesse, qui laissent entrevoir que la furtivité s'imposera comme un problème crucial posé aux concepteurs.

## La fonction : « agresseur », « capteur », « serviteur »

Commençons par établir que, au vu de la technologie actuelle et de son évolution prévisible, le problème posé aux développeurs de système n'est pas la capacité d'agression. On sait très bien tuer et neutraliser, à toutes distances raisonnables, avec une précision qui devrait atteindre bientôt ses limites fonctionnelles. En effet, dès lors qu'on sait limiter et presque annuler le dommage collatéral, sous réserve d'employer la munition idoine au moment requis, il n'y a plus d'impératif à améliorer la précision intrinsèque d'un système d'armes. On a la précision suffisante. Aujourd'hui, c'est le cas ou presque le cas. Au moins dans une phase initiale de la robotisation du champ de bataille, on peut supposer que les robots à venir rempliront l'une des trois fonctions suivantes : agresseur (robot armé), capteur/senseur, serviteur (robot de servitude).

D'emblée, la prééminence du robot « agresseur », celui qui est armé, paraît discutable. Sans l'exclure tout à fait, deux raisons se rejoignent pour en limiter l'intérêt. La première raison – et de loin la plus déterminante – est celle évoquée dans un article précédent, à savoir, la nécessité d'inclure l'homme dans la boucle décisionnelle. Puisqu'il faut que le robot consulte son maître avant de tirer, autant placer d'emblée le maître dans la situation de décider et de tirer, ce sera toujours plus rapide. Et souvent plus sûr, au plan de la discrimination et de la proportionnalité.

La seconde raison est d'ordre mécanique. Même en admettant que la discrimination incombe toujours à l'homme et qu'il suffit au robot d'émettre une image suffisamment discriminante des objectifs éventuels, la complexité d'une plate-forme de tir, sa performance en visée, pour encaisser le recul, pour recharger, etc., supposent une percée technologique conséquente si l'on veut supplanter les systèmes actuels : soit l'homme lui-même, pour le petit calibre, soit l'engin piloté

ou télépiloté pour les armements plus puissants. Dans l'état actuel et prévisible à moyen terme, la loi des rendements décroissants s'applique et la meilleure plateforme de tir reste l'homme ou l'engin piloté/télépiloté. On peut imaginer des robots agresseurs dont l'armement ne serait pas forcément très létal, tel que le robot bélier (pour enfoncer une porte) ou le robot fumigène. Cela ne change pas grand-chose à la typologie envisagée.

En revanche, il y a des environnements où l'homme ne peut combattre durablement, par exemple, les zones contaminées ou sous-marines. Dans ces deux contextes spécifiques où la discrimination est rendue plus aisée par le fait que l'innocent est exclu d'emblée du décor, on pourrait admettre, conceptuellement, l'intérêt de robots « agresseurs ». Ils pourraient contester l'espace à l'adversaire sans risquer la vie ou la santé des humains. Un emploi possible, par exemple, serait la défense sous-marine de plates-formes pétrolières, avec des « robots-requins » destinés à écarter des plongeurs. Ceci étant, l'intérêt réel d'un tel robot, par rapport à un lance-torpilles miniature ancré sur un pied de la plate-forme et commandé de la passerelle, ou à distance, paraît discutable. Cette illustration mène à la conclusion que des situations complexes ou nouvelles ne justifient pas forcément d'inventer des robots et qu'il est préférable d'explorer d'abord les solutions éprouvées. On ne robotise pas pour le plaisir, mais pour répondre à une absence de solution.

Le robot « capteur » semble être la voie prédominante, au moins à moyen terme. À nouveau, dans le cadre de cette réflexion, relevons qu'un drone ou un capteur abandonné ne sont pas des robots, même s'ils sont des capteurs déjà existants et très performants.

En élargissant la zone de captage du renseignement au profit de la troupe, en le rendant possible dans des espaces où le combattant ne pénètre pas, ou très difficilement, ou au prix de risques conséquents, le robot apporterait une plus-value incontestable, déjà perceptible avec les technologies actuelles. On sait aujourd'hui réaliser des capteurs optiques, sonores, sismiques, radio, radar, d'une définition largement supérieure à la capacité humaine. Par exemple, l'observation optique peut couvrir des gammes invisibles à l'œil humain. À court terme, en développant la technologie du spectrographe de masse, on devrait produire des robots « renifleurs » capables d'identifier des composés chimiques dans l'air, au sol ou sous le sol, repérant ainsi un explosif enterré ou une contamination chimique. Dans le même ordre d'idées, la technologie sismique ou tactile peut déceler des modifications à la texture du sol, dénonçant des travaux tels que l'enfouissement d'une mine ou la présence d'un fil électrique. Il semble que les technologies existent déjà et que leur miniaturisation, à des coûts raisonnables, devrait déboucher dans un avenir proche.

Quant au robot « serviteur », il en existe déjà sous la forme de mules porte-charge, capables de suivre l'homme sur un sentier montagneux. Le robot démineur d'aujourd'hui n'est pas encore un robot au sens de cet article, mais un engin

La robotisation du champ de bataille (2/3) :  
les caractéristiques majeures des robots

téléopéré sophistiqué. Il y a peut-être un intérêt à le rendre autonome, capable de reconnaître un itinéraire ou une zone et de désamorcer ou neutraliser tout engin rencontré, le cas échéant sans intervention humaine (encore qu'on pourrait insérer un ordre d'exécution entre la découverte et la neutralisation d'un engin).

Nombre d'opérations logistiques de l'avant se prêtent à la robotisation, pour la même raison que la robotique a envahi la logistique civile, dans les grands centres de répartition notamment. Que ce soit pour trier et allotir des munitions, des pièces détachées, du ravitaillement, pour conditionner et stocker, pour compter et vérifier, il existe déjà des robots qui s'avèrent plus rapides, plus endurants et plus fiables que l'homme. Porter une logistique individualisée au plus près du combattant est aussi une possibilité proche, déjà existante à l'état de prototype.

Une variante du robot serviteur pourrait être le robot relais-radio, implanté dans la profondeur du dispositif ennemi. Pour autant, une discussion sur le besoin réel de robotiser cette fonction montre les limites de l'exercice. En effet, un réémetteur peut être projeté à distance comme sous-munition d'une roquette \* ou largué depuis un aéronef. Auquel cas le robot ne consomme aucune énergie de sa propre réserve pour se mettre en place, ce qui ne serait pas le cas d'un robot véhicule conduisant en autonome une infiltration de longue portée. Outre le fait qu'il pourrait être repéré pendant son trajet, pisté, voire « retourné » (au sens que les espions donnent au mot), le facteur le plus déterminant serait le *ratio* énergétique proprement inacceptable. Pour anecdotique qu'elle soit, cette discussion a surtout l'intérêt de démontrer que nombre de solutions existantes ou aisées à développer sont intrinsèquement plus rentables que la robotisation.

On tire de ce qui précède une première conclusion typologique. Dans une famille tactique en expansion exponentielle, le robot capteur devrait fournir la grande majorité des produits déployés. Le robot agresseur existera sans doute à brève échéance, mais devrait pendant longtemps rester marginal car confiné à des cas particuliers. Le robot serviteur devrait se multiplier, tant l'état de l'art paraît proche de satisfaire le besoin opérationnel. Pour risquer une prédiction : à l'horizon des dix ans (2020-2025), les robots présents sur le champ de bataille terrestre seront à 70-80 % des capteurs, à 20-10 % des serveurs et à 5-10% des agresseurs.

\* Lance-roquettes unitaire

Avec le LRU, qui existe déjà, la France disposera à bref délai d'une munition pouvant porter à 100 km avec une précision quasiment métrique. Ce genre de vecteur pourrait être adapté pour projeter un réémetteur, à moindre coût qu'il n'en faudrait pour développer un robot spécifique. Il se pourrait bien que la détection soit plus difficile que pour un engin terrestre, fatalement amené à faire des rencontres. Quant à l'interception, elle serait beaucoup plus difficile face à une roquette dont le largage de charge pourrait survenir à tout moment d'une trajectoire qui se poursuivrait encore quelques dizaines de kilomètres.

## Quelles dimensions pour ces robots ?

La dimension de chaque robot sera évidemment conditionnée par sa fonction.

Ainsi, un robot « agresseur » sera dimensionné par son armement. Sauf percée technologique, de tels robots ne devraient pas être très significativement plus petits que les plates-formes téléopérées actuelles, puisqu'ils devraient embarquer une embase stabilisée sur les trois axes, pouvant encaisser le recul, portant les organes de visée, le tout sur la partie mobile qui fait que nous parlons d'un robot et non d'un traîneau. Au vu de ce qui se fait aujourd'hui, par exemple pour porter une mitrailleuse de moyen calibre ou un lance-missiles antichar, le ratio semble être de moitié. Nous entendons par là qu'un engin téléopéré pouvant porter et tirer une mitrailleuse mesure jusqu'à un mètre et pèse une cinquantaine de kilos, un grand frère embarquant de l'armement antichars représente la moitié du volume de l'engin blindé correspondant, tout simplement parce qu'il se dispense du volume interne nécessaire à l'équipage. Entre l'engin téléopéré et le robot, la différence volumique paraît minime, voire négligeable, la seule différence résidant dans la présence, ou non, d'algorithmes embarqués rendant l'engin autonome. En l'occurrence, le volume du boîtier assurant la liaison avec le pilote d'un engin téléopéré ne diffère guère de celui embarquant une intelligence artificielle. Tout le reste – mobilité, protection, énergie, armement, transmissions – ne découle pas de la robotisation en soi mais de la miniaturisation de chaque composante.

Une comparaison avec les drones est éclairante : les grands drones, opérant à haute altitude et pour de longues durées, ont une taille comparable à celle des avions de ligne. Le télépilotage n'a pas conduit à une réduction significative en volume et en masse mais en durée utile sur zone puisqu'il a débarqué le pilote, supprimant ainsi la limite physique d'endurance humaine et accroissant la charge utile en carburant.

Les robots « capteurs » sont dimensionnés évidemment par le capteur et, dans ce secteur, on constate que la miniaturisation progresse à grande vitesse. Certaines caméras pèsent quelques grammes et peuvent voler sur des engins de la taille d'un gros insecte. Les autres capteurs envisagés (radar, radio, sonores, sismiques, chimiques) devraient suivre le même chemin, sans forcément atteindre les extrêmes de miniaturisation de la gamme optique.

En première approche de néophyte non scientifique, il semble qu'une première génération de robots capteurs deviendra opérationnelle pour des charges utiles de quelques centaines de grammes à quelques kilos. Cela autoriserait des robots portables, partant du format poche au format sac à dos. Il n'y a guère de raison, dès aujourd'hui, de concevoir un engin de cent kilos pour porter une optique à fort grossissement, captant dans l'infrarouge, avec une définition et une portée utiles à l'homme.

La robotisation du champ de bataille (2/3) :  
les caractéristiques majeures des robots

Ainsi, le robot capteur sera, sauf exception, monocapteur, essentiellement pour des raisons de simplicité et de fiabilité de fonctionnement. La tentation sera grande, au début, d'accoler plusieurs capteurs sur la même plate-forme mobile (par exemple, un ou des capteurs optiques associés à un spectrographe de masse). En première analyse, cela paraît une voie erronée car la complexité première du robot ne sera pas le capteur mais la plate-forme qui le rend mobile et « survivable ». Les interférences potentielles entre capteurs très différenciés compliqueront démesurément l'intégration de l'ensemble. La synergie sera à rechercher ailleurs, par l'effet d'essaim ; nous y reviendrons. À quelques exceptions près, la tendance finira par s'établir de robots monocapteurs, de taille modeste, généralement légers, au minimum transportables par un homme.

La première génération vraiment fonctionnelle de robots capteurs devrait comporter des appareils dont la taille irait de la souris au gros chien, avec un point médian que serait le chat. Cette idée a de lourdes conséquences tactiques sur lesquelles nous allons revenir.

Quant aux robots serveurs, ils pourraient être plus volumineux, puisque leur seraient essentiellement confiées des fonctions de porte-charge ou de manipulation (les démineurs, par exemple). Dans un dépôt de zone arrière, par exemple, ces robots pourraient être très gros, de l'ordre de la tonne voire de la dizaine de tonnes, pour manipuler des charges lourdes. En zone de combats, l'endurance, la discrétion et la gamme de charges requises militent pour un volume plus réduit. La gamme de taille devrait commencer au gros chien et s'étendre jusqu'à la mule. Au-delà, le gabarit est comparable à celui d'un véhicule piloté et on ne voit plus guère les conditions qui rendraient le robot plus efficace qu'un véhicule, piloté, télépiloté ou enchaîné à un véhicule piloté (en convoi automatisé).

D'où cette deuxième conclusion typologique : les robots de loin les plus nombreux devraient être les plus petits, mais pas forcément les miniatures, les « gros » étant plutôt cantonnés dans des rôles d'agression ou de servitude. Cette conclusion n'est pas neutre car si le robot le plus répandu tend à être le moins onéreux, quasiment par principe, le développement et le déploiement de cette capacité en seront facilités.

### Quelle apparence ?

Quant à la forme des robots, et notamment des plus petits, elle s'inspirera principalement de la nature car le plus expédient est de commencer par là. Un article du magazine *The Economist* du 7 juillet 2011, « *Robots: Zobotics* », argumente de façon très convaincante cette logique de suivre les voies de l'évolution des espèces. L'illustration du poulpe lui est empruntée. En effet, les formes rencontrées dans la nature découlent de millions d'années de sélection, une expérience qu'il paraît vain de négliger. Certains engins volants, capables de vol stationnaire prolongé, s'inspirent déjà des insectes. Un appareil sous-marin utilisé pour des travaux pourrait s'inspirer

du poulpe, dont la plasticité lui permet de s'introduire partout tout en disposant d'une force mécanique remarquable en rapport à sa masse. Un prototype est déjà en cours de développement, en vue de fabriquer un robot capable, par exemple, de fermer une vanne sous-marine. Un appareil censé s'infiltrer partout, mais sans obligation de vitesse, ressemblerait à un serpent ou un mille-pattes. Pour les robots terrestres de petite dimension, les formes d'araignée correspondent à un bon compromis entre l'aptitude à progresser partout, et, le cas échéant, à accomplir des bonds, les pattes pouvant agir comme plans pour la phase aérienne, l'impulsion initiale pouvant être obtenue par détente des pattes ou émission d'un jet de gaz ou d'air comprimé.

Avec cette troisième conclusion typologique : l'emprunt conceptuel au bestiaire est la voie à privilégier. En dehors des robots se déplaçant sur des roues ou des chenilles – sans doute les plus gros, d'ailleurs – la grande majorité des formes sera déduite de la nature. Du coup, elles susciteront des réactions humaines très marquées par la culture ou l'expérience personnelle ; un point sur lequel nous reviendrons plus tard, car il relève de l'acceptabilité de cette nouvelle famille de soldats.

### **Rayon d'action, vitesse**

En théorie, on devrait pouvoir concevoir des robots capteurs terrestres de grandes portée et endurance, capables de parcourir des centaines de kilomètres, suivant la même logique que celle qui a présidé au développement du drone. On imagine ainsi un robot de reconnaissance d'itinéraire partant le matin d'Orléans et arrivant le soir à Maubeuge, sans intervention humaine. L'expérience a été faite aux États-Unis, dans le cadre d'un concours organisé à trois reprises par la *DARPA* (*Defense Advanced Research Projects Agency*), et les progrès d'une édition à l'autre sont époustouffants.

Moyennant quoi, en dehors d'une reconnaissance cantonnée aux aspects les plus techniques (état de la route), excluant tout danger d'une rencontre hostile, rien ne remplacera l'interaction immédiate et continue de l'homme. On sait faire aujourd'hui la reconnaissance de combat avec des hommes. Remplacer l'homme de tête par un robot pourrait s'avérer tellement consommateur en hommes pour suivre, comprendre et décider qu'en définitive, remplacer l'homme de tête en devient vide de sens ou dépourvu de gain tactique réel.

En revanche, une reconnaissance radiologique, dans une zone contaminée, très accidentée mais sans opposition interactive (sans ennemi, en clair) peut s'envisager dès aujourd'hui. Par exemple, au Japon après le tsunami et sous le risque de contamination nucléaire, établir au plus vite la carte des itinéraires possibles ou le débit de dose radiologique sur une zone sont des tâches qui auraient pu être confiées à des robots. Pour autant, on sait faire cela à distance avec des drones, l'imagerie aérienne ou spatiale et des relevés radiologiques effectués en hélicoptère. On sait le faire aujourd'hui (d'ailleurs on le fait), avec des technologies éprouvées, à un coût d'autant plus tolérable qu'il s'agit d'exploiter des appareils qui existent et

La robotisation du champ de bataille (2/3) :  
les caractéristiques majeures des robots

qui peuvent aussi remplir d'autres missions, ce qui ne sera pas le cas des robots. Bref, le calcul économique et fonctionnel de cette évolution n'est pas concluant. Cela est une autre illustration démontrant que le possible, même à coût raisonnable, n'est pas forcément le meilleur.

C'est la base de la quatrième conclusion typologique : le robot terrestre de longue portée et de grande endurance semble un non-sens conceptuel, à tout le moins dépourvu de plus-value opérationnelle manifeste. En dehors de cas très particuliers, il semble raisonnable de ne pas consacrer trop de ressources à cette recherche.

Quant à la vitesse de progression des robots, elle se comprend en deux composantes : la vitesse de pointe et la vitesse tactique. La vitesse de pointe est nécessaire pour le dernier bond ou pour échapper à une menace. En l'occurrence, le terme de bond est approprié car, dans la plupart des cas, le déplacement du robot s'apparenterait à un bond (phase aérienne résultant d'une impulsion, à distinguer d'un vol où la phase aérienne est entretenue). Le bilan énergétique d'un engin dont on veut qu'il atteigne une vitesse instantanée élevée, mais sans devoir la prolonger, est très différent de celui s'appliquant à un appareil capable d'évoluer à la même vitesse élevée, longtemps. La vitesse tactique est la vitesse dans la durée de la mission, et là, paradoxalement, le besoin est réduit. Une troupe d'infanterie manœuvre à trois kilomètres/heure et combat à 1 kilomètre/heure (au sens où la progression par éléments dissociés, s'arrêtant pour appuyer, fouiller, observer, fait que l'ensemble progresse à cette vitesse faible). Donc, un robot censé accompagner des hommes à pied n'a pas besoin de faire 60 km/h. Il est utile qu'il atteigne cette vitesse pour un bond mais superflu qu'il en soit capable pendant plus de quelques minutes, sans quoi il se dissocierait de son accompagnement humain. Si l'unité se déplace à 60 km/h, ses robots voyageront en véhicule et en descendront pour passer au combat débarqué. En pratique, un robot accompagnant un homme et disposant d'une vitesse de pointe comparable à celle du chien suffirait largement.

L'endurance tactique de ces appareils n'a pas besoin d'excéder trop largement celle de l'unité humaine qu'ils accompagnent, nous parlons donc d'autonomies énergétiques de l'ordre de quelques heures généralement, une journée au maximum, car la mise au repos de la troupe devrait permettre de recharger les batteries ou les réservoirs des engins.

Ce qui est la base de cette cinquième conclusion typologique. En matière de conception, viser la vitesse soutenue est généralement inutile. En revanche, pouvoir progresser pendant plusieurs heures à 8-10 km/h (pour conserver une marge par rapport à l'homme à pied) tout en sachant faire des bonds à répétition est une base exploitable pour un cahier des charges et reste dans le raisonnable technologique d'aujourd'hui.

## **Le problème de la furtivité**

Des robots de dimension réduite, progressant au sol, en effectuant parfois des bonds, peuvent être silencieux en améliorant un peu les technologies actuelles. Ils pourraient donc être assez discrets, au moins dans un environnement urbain normalement bruyant. En revanche, dans un contexte de ville morte, ou de quartier périphérique, la nuit, il faudra des progrès significatifs pour rendre un essaim indécélable à courte distance. C'est pourtant une condition importante pour un système focalisé sur l'acquisition du renseignement.

L'affaire sera certainement beaucoup plus compliquée pour les engins volants. Les lois de la physique s'appliquent brutalement. Par exemple, le dispositif nécessaire pour assourdir un son est volumineux, il dégrade le rendement énergétique et alourdit l'appareil, nécessitant un surcroît de puissance lui-même générateur de bruit. Après tout, au terme d'un siècle d'aéronautique de masse, il n'existe pas encore d'aéronef commercial ou militaire silencieux. Les améliorations sont constantes et réelles mais l'avion silencieux n'est pas pour demain. C'est un pari sur l'avenir que d'affirmer qu'un effort déterminé et de longue durée devrait parvenir à produire des robots volants silencieux ou quasi-silencieux. Il n'est pas exclu qu'à partir d'un certain seuil de silence, la loi des rendements décroissants s'applique et que le robot volant suffisamment discret pour ne pas attirer l'attention soit irréalisable, tout simplement. Nonobstant, une percée technologique n'est pas exclue. Il demeure que le travail sur la trace acoustique des robots de tous types représentera certainement une composante majeure de l'effort de conception, tout comme c'est le cas pour les sous-marins.

Cela n'est pas un point de détail. Il s'agit d'intégrer le critère acoustique comme une composante majeure de la définition de l'engin, et non comme une conséquence de choix technologiques focalisés sur le rayon d'action, la vitesse, la protection ou autres éléments essentiels. En matière d'acoustique, il est très difficile de remédier à un défaut majeur, inhérent à la conception même de l'engin. Il n'est pas exclu que la signature acoustique des robots s'avère l'obstacle technologique le plus significatif, retardant l'entrée en ligne de cette nouvelle famille d'engins.

\*

\*\*

Pour en affiner les caractéristiques, il convient de les imaginer en situation tactique, ce qui sera l'objet de la troisième partie de ce dossier.

# La robotisation du champ de bataille <sup>(3/3)</sup> : conséquences tactiques, psychologiques et éthiques

Michel Yakovleff

**I**l est généralement admis que le combat terrestre du futur sera majoritairement urbain, au milieu des populations, face à un ennemi asymétrique, se confondant à la population au moins jusqu'à l'acte de combat et souvent, pendant et après.

## À quoi pourraient servir les robots dans ce contexte ?

Dans la livraison précédente, nous avons postulé que le robot le plus répandu serait le robot capteur, généralement mono-capteur, agissant en essaim, complétant la troupe débarquée. La troupe serait précédée de plusieurs robots, dont les angles d'observation se recouvriraient, tout en multipliant les domaines captés (visuel, sismique, électromagnétique, voire olfactif...). Sur les côtés, d'autres appareils assureraient la sûreté à une distance prédéterminée en fonction de la menace et de l'environnement humains, pas nécessairement hostile. Il en serait de même sur les arrières. Étant en ville, il serait utile que la bulle ainsi déployée observe les hauts, d'où l'intérêt d'une capacité d'escalade et de translation sur une paroi verticale mais aussi de saut d'un mur à l'autre. Enfin, la surveillance pourrait porter dans les fonds, les robots empruntant les circuits souterrains grâce à leurs dimensions réduites et à leur capacité à opérer dans l'eau.

## Quelle relation entre le robot et son maître ?

Comme il a déjà été souligné, il est illusoire de prétendre contrôler chacun de ces éléments individuellement, d'où l'impératif absolu de l'intelligence artificielle. Pour limiter la charge en attention humaine, le dialogue entre les composants individuels devrait lui aussi être autonome. Par exemple, en progression, un robot pourrait changer de côté de la rue, sans intervention humaine, pour mieux couvrir l'angle mort d'un de ses congénères. C'est à l'intelligence artificielle de répartir, constamment, les capteurs.

Dans le même ordre d'idées, et même si cela paraît contre-intuitif, les robots ne devraient pas transmettre l'information en temps réel aux hommes. Ce ne serait qu'en cas d'alerte, et selon un filtrage à définir, que le flux d'information serait transmis. En d'autres termes, la troupe en progression n'observerait pas majoritairement par les yeux de ses robots éclaireurs mais par ses propres yeux. Évidemment, à la demande, elle ferait appel à l'image transmise.

Le comportement de chaque robot individuel et de l'essaim serait défini par une combinaison d'actes réflexes et d'ordres. Ainsi, un opérateur unique donnerait la mission générale à l'essaim, la direction de marche, l'objectif, les consignes, tout comme on le fait pour les hommes. L'essaim, et chacun de ses individus, agirait d'initiative en fonction de ce qu'il sait faire (l'intelligence artificielle) et des signaux reçus de l'environnement (dont, au premier chef, le comportement de la troupe qu'il accompagne). De temps en temps, il recevrait un ordre directif précis, généralement un recalage ou un changement de consigne, ce qui induirait un nouveau comportement. Dans ce contexte, un opérateur unique pourrait contrôler l'essaim dans son ensemble. En revanche, si une menace se dévoile, une partie des robots devrait être prise en compte individuellement, un opérateur unique ne suffisant plus à adapter la manœuvre.

Il y a une limitation majeure au déploiement d'un essaim : c'est la bande passante nécessaire pour les flux d'information montante et descendante. Bande passante qui doit être protégée car elle sera attaquée, quasiment par principe. Cette limitation est rédhibitoire aujourd'hui mais elle sera forcément levée un jour. Au demeurant, le concept proposé ci-après a justement pour effet de limiter le besoin en bande passante, au moins en dehors des phases actives du combat.

### **D'où un concept de dialogue homme-robot en trois temps**

- Routine, pas de danger avéré. Dans le mode routine, l'idéal est un opérateur unique. À quelques coups d'œil près, la troupe laisse l'essaim opérer à sa guise. L'essaim cale sa progression sur celle de la troupe, en fonction des critères définis dans la mission, dont la distance de garde par quadrant (avant, flancs, arrière, hauts et fonds).

- Mise en alerte, suite à la détection d'un indice. L'essaim tombe en garde, de la même façon qu'un chien marque l'arrêt. À son imitation, la troupe jette un dispositif et sollicite les capteurs ayant signalé quelque chose. Ainsi, si chaque soldat a « son » robot attiré, il prend l'image ou l'écran radar sur son propre moniteur et interprète ce qu'il observe. Le chef, en contact avec l'intelligence artificielle collective, interprète les données recoupées.

- Manœuvre, selon l'interprétation de l'information. Au besoin, le chef tactique modifie la manœuvre des capteurs, par exemple, pour densifier le dispositif sur un secteur donné. À noter que l'intelligence artificielle, ainsi sollicitée, accroit

La robotisation du champ de bataille (3/3) :  
conséquences tactiques, psychologiques et éthiques

son expérience opérationnelle et s'améliore, à tel point qu'une situation similaire, survenant plus tard, induit le changement de dispositif sans intervention humaine. On sait faire cela avec un ordinateur, rien ne s'oppose à étendre cette capacité dans le domaine physique. Dans cette situation, certains capteurs sont pilotés en direct, les informations qui en remontent sont épiluchées en temps réel.

Comme il a déjà été dit, nous n'envisageons guère le robot de combat, participant au feu en cas d'engagement. Dans le cas préférentiel, c'est la troupe – humaine – bien renseignée qui évalue la menace et, le cas échéant, conduit le feu. Pendant ce temps, l'essaim contribue à renseigner sur son résultat (*Battle Damage Assessment* ou *BDA* en direct et en continu), tout en maintenant la surveillance sur les secteurs non battus.

Cette conclusion paraît contre-intuitive mais est cruciale : le dialogue du robot avec son maître devrait être limité au maximum. Ce n'est pas un paradoxe mais le résultat de la nécessité de laisser le maximum de liberté à l'homme (et, accessoirement, de consommer moins de bande passante). Concrètement, la voie à privilégier est celle d'un dialogue à trois niveaux, adaptés aux circonstances.

### Quelques idées sur la structure tactique

Jusqu'à présent, nous avons imaginé le combat de l'avant, en ville, à pied (au moins pour les humains). En première approche, le pion de base serait la section (une trentaine d'hommes) accompagnée de son écosystème robotique, fournissant pour l'essentiel du renseignement, avec éventuellement une composante logistique. Laissons de côté, pour l'instant, le fait que ce que trente hommes font aujourd'hui sera sans doute accompli par moins dans ce contexte. Le même effet tactique pourrait être obtenu, dans le contexte d'une section « robotisée », par dix ou quinze hommes de moins. Si l'on cherche à tout prix à économiser l'homme, il reste que la réduction de l'effectif humain sera limitée par le nombre des robots à mettre en œuvre, ce qui devrait amener à un *ratio* un homme-un robot, même dans le contexte d'une intelligence artificielle super-performante. En fin de compte, au contact, il faudra un homme par robot pour observer avec ses yeux et, le cas échéant, le manœuvrer. Après tout, aujourd'hui, un maître-chien ne contrôle qu'un chien.

Au cas où notre hypothèse de prééminence du robot capteur est confirmée, il semble plus pertinent de retourner la proposition et de préserver l'effectif, puisque la capacité de combat proprement dite restera l'apanage de l'homme. À effectif constant, la robotisation au niveau tactique amplifiera considérablement l'efficacité d'une unité, ce qui est une autre façon de compenser l'infériorité numérique qui est déjà un facteur-clé de l'engagement des armées occidentales dans les conflits modernes, asymétriques ou non.

La section serait dotée de son propre lot de robots, en tout cas tant que l'endurance des hommes et des robots sera alignée. Les pauses opérationnelles

bénéficieront aux deux. Si l'essaim de robots dispose d'une endurance très supérieure, alors le même lot pourrait être confié à des sections successives. Mais il sera plus expédient de limiter l'endurance des robots à une mission-type, avec une marge évidemment.

La compagnie disposant de trois ou quatre de ces sections devrait disposer d'une capacité d'anticipation au profit de l'ensemble. Par exemple, si une section opère dans un espace de manœuvre de l'ordre du demi kilomètre carré, son unité parente devrait observer dans le compartiment suivant, voire élargir un peu. Pour autant, cette capacité d'observation existe déjà aujourd'hui, avec des engins pilotés à distance (les drones). Certains pourraient être robotisés (au sens de rendus autonomes), mais la plus-value tactique n'est pas probante. On devrait pouvoir se contenter d'une capacité d'observation depuis les airs et dans l'éther, à une portée d'une dizaine de kilomètres, pendant une longue période – capacité qui existe aujourd'hui.

Finalement, la robotisation du champ de bataille apporte la plus-value maximale dans le combat de détail, au contact, bien plus que dans un contexte d'extension ou de grande portée. Robotiser un combat de longue portée, de longue durée, ne paraît pas un objectif rentable aujourd'hui.

Pour conclure sur l'emploi tactique des robots : il devrait surtout porter au bas échelon, sans doute le niveau actuel de la section, qui serait « robotisée » avec un essaim qui lui serait affecté ; trois ou quatre sections constitueraient une compagnie disposant en propre d'une capacité d'observation et d'anticipation sur les compartiments suivants (plutôt par engins téléopérés que par robots) ; aux échelons supérieurs, la manœuvre interarmes ne serait pas significativement affectée ; en revanche, la fonction logistique, surtout vers l'avant, bénéficierait massivement de robots serveurs.

Reste à envisager cette unité au combat, en ville, en présence de la population. Ce qui amène à explorer les aspects psychologiques et éthiques de cette nouvelle capacité.

### **Les aspects psychologiques du combat assisté par robots**

Ils sont liés au problème de l'acceptabilité du robot. Nous avons évoqué l'image de la troupe progressant en ville, environnée de son essaim de robots. Les formes évoquées ne sont pas forcément bien perçues, ainsi du robot araignée. Même un robot en forme de chat ou de chien ne sera pas nécessairement accueilli amicalement. Quant au serpent ou au poulpe terrestre... N'oublions pas non plus que ces engins seront sans doute bruyants, au moins dans leurs débuts.

Le combattant d'aujourd'hui, caparaçonné, casqué, portant des lunettes sombres lui donnant le regard de la guêpe, bardé d'appareils comme autant d'excrois-

La robotisation du champ de bataille (3/3) :  
conséquences tactiques, psychologiques et éthiques

sances rendant méconnaissables son profil humain, est déjà très mal accepté par la population. C'est un non-sens de croire que ce rejet est culturel, au sens où les populations afghanes ou irakiennes s'accommodent mal de cette intrusion de soldats occidentaux. Les mêmes soldats occidentaux, déployés avec le même harnachement et la même attitude, dans la capitale de leur propre pays, ne seraient guère mieux perçus ou acceptés. Visuellement, l'écart croissant entre l'homme et le combattant est déjà, aujourd'hui, un problème psychologique majeur. Qu'en sera-t-il quand notre combattant extra-terrestre sera environné d'un essaim bourdonnant, bondissant, rampant, miaulant, sifflant, devant lui, au-dessus de lui, derrière lui ?

Il y a fort à parier que notre section robotisée éprouvera beaucoup de difficultés à entrer en contact, d'une façon sereine et amicale, avec une population sceptique ou indécise, sans même parler de la population hostile. En ce cas, la robotisation pourrait être un désavantage, ou au minimum, une contrainte forte nécessitant des adaptations tactiques lourdes pour pallier l'effet psychologique contraire à la mission.

### Les aspects éthiques

Jusqu'à présent, nous en sommes restés à une perspective purement technique. Mais le combat reste une affaire humaine et doit le demeurer. Nous avons établi plus haut que le robot de longue portée, capable de missions totalement autonomes dans la profondeur (par exemple pour surveiller un intervalle, harceler sur les arrières ennemis, etc.) semble être un non-sens conceptuel. C'est heureux au plan éthique.

En effet, si nous imaginons un escadron de robots harceleurs, attaquant les arrières ennemis, sans intervention humaine ou quasiment sans intervention, on peut penser que l'ennemi concevrait des robots de défense des arrières, traquant l'infiltré, humain ou robot. Auquel cas nous en arrivons à la guerre des robots entre eux, menée pour le compte des humains mais en leur absence. Ce sera là un visage totalement nouveau de la guerre, en réalité, une horreur absolue.

L'avantage du robot accompagnant le fantassin, au rythme du fantassin, c'est qu'il ne dissocie pas le combattant de sa responsabilité ultime. L'essaim est sans doute une forme épouvantable du développement du combat mais il ne le dénature pas au même degré que les bandes de robots assoiffés de sang évoqués ci-dessus.

Un des plus grands auteurs de science-fiction, Isaac Asimov, a exploré l'éthique des robots et posé les trois grandes lois de la robotique, que voici :

- Un robot ne peut porter atteinte à un être humain, ni, restant passif, permettre qu'un être humain soit exposé au danger.
- Un robot doit obéir aux ordres que lui donne un être humain, sauf si de tels ordres entrent en conflit avec la première loi.

- Un robot doit protéger son existence tant que cette protection n'entre pas en conflit avec la première ou la deuxième loi.

Il est clair que les robots de combat tels que nous les envisageons dérogent à ces lois, par construction. Pour autant, la recherche éthique pourrait partir de cette fondation.

Notons d'abord que les robots dont nous avons discuté ne sont pas de simples machines. Il s'agit d'appareils dotés d'une large autonomie décisionnelle, c'est même leur avantage premier. Qui dit « décision » dit « responsabilité ». Là encore, la comparaison avec l'emploi des animaux est éclairante. Un maître-chien reste responsable de son chien. Comment concilier l'autonomie décisionnelle des machines avec la nécessaire responsabilité de leurs maîtres ?

Quelle que soit la complexité des algorithmes qui détermineront le comportement des robots, la responsabilité humaine restera pleinement engagée, au moins à trois niveaux : le concepteur et notamment celui qui a orienté l'intelligence artificielle ; le chef tactique, qui a décidé de la mission de l'unité engagée et fixé les limites (dont les règles d'engagement qui s'enrichiront forcément d'alinéas dédiés aux robots) ; le maître du robot proprement dit, celui qui lui est relié et qui le commande directement. La formation d'une unité « robotisée » ne pourra faire l'abstraction d'un vaste volet de formation éthique, explorant les limites morales d'emploi de ces appareils.

En dehors du robot agresseur, clairement en contravention avec les idées d'Asimov, même les robots capteurs ou serviteurs agiront en limite de ces lois, dès lors qu'ils auront eux-mêmes à se protéger.

En règle générale, on peut penser que l'autoprotection du robot devrait le préserver du geste innocent ou de la malveillance fortuite, ainsi, celle d'un enfant curieux ou d'un passant excédé, à distinguer de l'adversaire qui sait à qui il a affaire.

La protection la plus simple et, *a priori*, la moins dangereuse pour l'innocent est l'esquive (et l'esquive n'est pas la fuite – en l'occurrence, le robot pare le coup mais reste sur zone). L'esquive peut consister à adopter une forme moins vulnérable, jouant sur la plasticité, déjà évoquée plus haut. Là encore, le bestiaire peut inspirer des robots-tatous ou hérissons, qui se recroquevillent ou rentrent dans une carapace mais aussi des robots bondissants qui parent le coup en sautant et finissent par lasser l'importun. Une gradation supplémentaire dans la défense pourrait consister en une capacité de réaction non létale, comme les épines du hérisson, la décharge électrique de certains poissons ou l'émission de gaz malodorants (effet moufette). Face à l'acte hostile caractérisé, la plupart des robots resteront très vulnérables, en raison de leur *ratio* poids-charge utile. Le robot blindé, capable d'encaisser une rafale, sera dépourvu de toute agilité. C'est plutôt dans l'effet de masse que réside la protection du système : l'essaim peut se permettre de perdre

La robotisation du champ de bataille (3/3) :  
conséquences tactiques, psychologiques et éthiques

une ou deux abeilles et l'agression caractérisée sur un robot est un signal de combat comme un autre, qui suppose l'engagement des hommes.

Mais revenons au cas de la population. Celle-ci pourrait s'en prendre aux robots tout en évitant toute provocation directe aux hommes. Admettons qu'un épicier excédé donne un grand coup de pied à un robot araignée stationnant sur son pas-de-porte. Faudra-t-il l'appréhender ? Selon quel argument juridique ? Si des manifestants cagoulés et armés de battes de *baseball* s'en prennent aux robots qui les surveillent, en avant d'un *check point*, quelles seront les options acceptables pour la troupe ? Éthiquement, peut-on tirer sur une foule pour protéger un robot ?

En première approche, voici donc le genre de considérants qu'il faudra aborder avant de déployer les unités robotisées que nous avons imaginées. Il est hautement souhaitable que cette réflexion ait lieu en étroite coordination avec le développement des algorithmes présidant au comportement des robots, tant ils auront un impact sur le comportement de la troupe, et, *in fine*, sur sa tactique.

\*

\*\*

Pour récapituler les conclusions :

- La robotisation du combat est en marche.
- *A priori*, elle s'appliquera surtout au combat de détail, en zone urbaine, bien plus qu'à des missions de longue portée (quelques heures, quelques kilomètres).
- Le robot capteur devrait être dominant, suivi par le serviteur et, dans certains cas, par l'agresseur.
- Les robots emprunteront la plupart de leurs formes au monde zoologique. Cette conclusion a des conséquences matérielles et fonctionnelles mais, plus grave encore, psychologiques, tant le bagage atavique pèsera sur l'acceptabilité de ces nouveaux organismes.
- La plupart des robots devrait être de taille réduite, de portée et d'endurance limitées, avec une capacité élevée de franchissement d'obstacle, généralement à base de bonds.
- Les robots agiront en essaim ; développer l'algorithme de l'essaim devrait précéder la définition de chaque robot pris individuellement.
- L'intrusion des robots dans le champ de la guerre doit être précédée d'une réflexion éthique, affectant en retour la réflexion technologique et cybernétique.



# Robotisation terrestre : entre réalité et fantasme

Darko Ribnikar

Du département d'études amont de Cassidian (EADS).  
Titulaire d'un doctorat en sciences politiques, diplômé de la  
*Columbia University* et de Paris II Panthéon-Assas. Réserviste  
au Régiment d'infanterie-chars de Marine (RICM).

Il semblerait que la robotisation des champs de bataille soit en route. Cette robotisation est visible à travers de nombreux drones, principalement aériens. À ces systèmes volants, s'ajoutent des centaines d'engins terrestres qui apportent une aide non négligeable aux combattants sur le terrain. Du point de vue des Américains, qui en sont les principaux utilisateurs, cette évolution est en marche et impossible à stopper. La conséquence immédiate en est de provoquer un grand nombre d'interrogations sur la façon dont nous devons mener les conflits armés actuels mais aussi ceux de demain. Habituellement la première image qui vient à l'esprit est celle du *Terminator*.

Et pourtant, la robotisation du champ de bataille terrestre est aujourd'hui un mythe, une illusion, elle n'existe pas ! Les machines que les combattants utilisent ne sont pas des robots mais des systèmes télé-opérés n'ayant pas la capacité de prendre une décision ou d'agir seuls. Certes, la majorité des drones est capable de se déplacer en pilotage automatique, comme la plupart des avions. Mais la décision qui compte, celle de l'orientation des capteurs et de l'utilisation des effecteurs (pour ceux qui en sont dotés) est de la responsabilité exclusive de l'homme. Dans le domaine terrestre, la situation est encore plus simple : les systèmes qui sont utilisés par le *Nedex*, n'ont aucune autonomie <sup>(1)</sup>. Ils sont pilotés par l'homme. L'homme décide et agit à travers ces machines.

En réalité, il n'y a pas de robot terrestre sur le champ de bataille mais des systèmes télé-guidés et télé-opérés par l'homme. Toutefois, certaines tendances, comme le fait de couvrir toujours plus de terrain pour les unités terrestres avec des effectifs toujours plus faibles, risquent de changer la donne. Si à cela nous ajoutons notre aversion pour les pertes militaires, les solutions autonomes terrestres prennent tout leur sens. Mais dans combien de temps ce sera le cas et de quelle façon ? Le *Terminator* est-il déjà en préparation dans un laboratoire secret ?

---

(1) *Nedex* : Neutralisation enlèvement détection engins explosifs.

## Qu'est-ce qu'un robot ?

Avant de tenter de donner une réponse à cette question, il est d'abord nécessaire de définir notre sujet. Qu'est-ce qu'un robot ?

Nous pouvons commencer par faire la différence entre les systèmes télé-opérés et les systèmes autonomes ou semi-autonomes. Dans un système télé-opéré, l'homme reste en permanence au contrôle, les exemples sont le *VAB Top*<sup>(2)</sup> et le *PackBot*<sup>(3)</sup>. L'utilisateur ne lâche jamais la manette de contrôle, car, sans l'homme dans la boucle, le système s'arrête tout simplement. Par opposition, le robot est un système autonome ou semi-autonome. L'aspirateur *Roomba*, par exemple, entre dans cette catégorie, car il est capable de gérer de façon autonome le niveau de poussière dans votre habitation. Bien entendu, il n'est pas pertinent de comparer des systèmes militaires avec des systèmes de travaux « ménagers », le cahier des charges et les missions n'étant pas les mêmes. Le but de cette comparaison est juste de souligner, encore une fois, le fait que nous n'avons pas de vrais robots dans l'Armée de terre. Cela dit, il n'est pas facile de définir clairement la notion de robot.

Une définition acceptable pourrait être la suivante : un robot est un système autonome ou semi-autonome capable d'agir dans le monde réel. Il récupère des informations par ses capteurs, il est capable d'analyser de façon autonome et, à travers ses effecteurs, d'agir sur le monde qui l'entoure. Comme le rappelle le *Petit Robert*, être autonome, c'est s'administrer soi-même, être souverain et libre. Il va de soi que cette définition de l'autonomie a été pensée pour les êtres humains, les robots devront se contenter d'une définition plus restrictive. Avant de se pencher sur les questions d'autonomie sur le champ de bataille, il est important d'intégrer dans notre réflexion que la vraie révolution robotique n'a pas lieu en Afghanistan mais dans nos usines et maisons.

## Le moteur civil

Dans le domaine de la robotique, le militaire doit s'inspirer du civil et la révolution civile en robotique est en plein essor. Le marché civil de la robotique est motivé par plusieurs tendances, principalement celle du coût de la main-d'œuvre. Nos industries n'ont cessé de délocaliser afin de pouvoir employer une main-d'œuvre peu qualifiée pour un prix toujours plus faible. Ce phénomène a profité aux consommateurs, aux actionnaires de ces sociétés et dans une certaine mesure aux pays où ces sociétés se sont installées, tout cela bien entendu au détriment des ouvriers nationaux. Sauf qu'aujourd'hui, les sociétés qui se sont « expatriées » afin de réduire leur coût, ont de plus en plus de mal à tirer les prix vers le bas à travers la main-d'œuvre. Même dans les pays en développement, on commence à parler

---

(2) Le *VAB Top* est un véhicule de l'avant blindé équipé d'un tourelleau télé-opéré armé d'une mitrailleuse de 12,7mm.

(3) Système terrestre télé-opéré de 18 kg aux multiples applications développé par la société américaine iRobot.

des droits des ouvriers et à réclamer une rémunération décente. À cela vient s'ajouter la hausse des coûts du transport qui encourage certaines sociétés à un autre modèle : automatisation totale de la production. Mais qui empêcherait une usine robotisée de s'installer quelque part en France ? Certains grinceront des dents à l'idée que les chaussures de sport ou les soutiens-gorge soient fabriqués par des robots et non par des ouvriers mais les taxes récoltées par l'État calmeraient la majorité de nos décideurs. Ces robots capables de travailler sans relâche sans jamais rien demander, sont une tendance déjà parue au Japon et nous les verrons bientôt apparaître près de chez nous. Dans la décennie à venir, nous utiliserons bientôt des produits exclusivement fabriqués par des machines. L'homme restera le maître de la conception du produit, pour quelques temps encore...

Certains robots sont déjà visibles, comme ceux conçus pour le marché des services. L'estimation de ce marché pour 2020 est de 100 milliards de dollars. Aujourd'hui, ce marché est représenté par l'aspirateur *Roomba* mais ce n'est que le début. Le vieillissement de la population va créer une demande pour des robots spécialisés, c'est par ailleurs déjà une tendance lourde au Japon. L'isolement est en effet une source de *stress*. En Corée du Sud et au Japon, pour pallier ce problème, il existe une volonté de placer un robot de service dans chaque maison. Le robot surveillera la personne âgée à la maison, grâce à de nombreux capteurs. Il pourra passer l'aspirateur, aider à la préparation de la nourriture et, pourquoi pas, dispenser certains soins ! Évidemment, si le robot se retrouve dans une situation inconnue, l'homme pourra toujours reprendre la main. Car les robots qui se trouvent dans nos usines ne sont que des bras articulés, sans aucun aspect humain. Les robots à qui nous confierons nos parents, grands-parents et à qui nous serons nous-mêmes confiés un jour, devront avoir une dose d'humanité et même ressembler à un humain. Ces robots pourraient même un jour devenir nos compagnons et nos amis. Leur présence dans nos maisons pourrait nous donner un sentiment de sécurité et pourquoi pas une certaine chaleur « humaine ».

Cela nous amène à un autre grand moteur du marché des robots, certains diront le plus grand moteur du marché, le sexe. Il est impossible d'occulter les possibilités liées à la robotique et au sexe. En Corée du sud, des poupées très réalistes peuvent être louées dans des hôtels spécialisés. Il existe une volonté de rendre ces poupées autonomes plus réactives. Aujourd'hui, ce ne sont que des poupées très réalistes, mais demain, dans 20 à 30 ans, nous pouvons imaginer des robots dont la finalité principale sera de fournir du plaisir sexuel <sup>(4)</sup>.

Toutes ces tendances technologiques issues du marché civil auront des implications dans le domaine militaire. Sans oublier que dans 20 à 30 ans, la population sera habituée aux robots.

---

(4) Patrick Lin, Keith Abney et George A. Bekey : *Robot Ethics: The Ethical and Social Implications of Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents series)* ; The MIT Press, décembre 2011 ; 400 pages.

## Délégation

Contrairement au marché civil, toujours avide de nouveautés, le monde militaire reste plus prudent, voire sceptique, par rapport aux robots terrestres. Aujourd'hui la délégation de la décision humaine à une machine est un tabou dans les armées. La guerre reste l'apanage exclusif des êtres humains car il est redouté que toute robotisation ne déshumanise la guerre encore plus qu'elle ne l'est déjà. Le robot terrestre, tel que le *Terminator*, sillonnera les champs de bataille assassinant les êtres humains sans défense. Cette idée nous tourmente car il n'y a qu'un pas entre les robots qui ôtent la vie à nos ennemis et ceux qui se retournent contre nous. La peur du *Terminator* semble bien installée dans notre subconscient occidental. Étrangement, cela n'est pas le cas au Japon par exemple.

Et pourtant, il existe déjà des systèmes semi-autonomes capables d'ôter la vie. Le plus connu est le système américain d'autoprotection pour les navires, le *Phalanx* <sup>(5)</sup>. Dans le domaine aérien, un grand nombre de missiles se comportent de façon autonome une fois tirés. Dans le domaine terrestre, nous pouvons aussi considérer que la munition *BONUS* <sup>(6)</sup> tirée par nos obusiers de 155 mm est un système autonome. Elle est capable de détecter la trace thermique et de détruire un véhicule habité. Certes, c'est l'homme qui tire l'obus de 155 mm mais en phase terminale, nous avons déjà délégué la décision de donner la mort à une machine. La boîte de Pandore est déjà ouverte depuis quelque temps et il n'est plus question de tenter de la refermer. Oui, nous avons déjà donné une délégation à des machines et, oui, nous allons continuer dans cette voie. Les machines télé-opérées d'aujourd'hui seront progressivement autonomisées. Il existe un besoin réel pour cela. Prenons par exemple un *PackBot* qui est télé-opéré par son utilisateur. Il localise un EEI (Engin explosif improvisé ou *IED*) et commence à le neutraliser. À ce moment précis, l'adversaire prend à partie l'équipe du *PackBot*. Il faut se replier mais le temps nécessaire pour mettre le robot en sécurité expose l'équipe aux tirs d'adversaires. Idéalement, l'opérateur devrait appuyer sur un bouton et donner au *PackBot* la capacité de rentrer de façon autonome vers un point de ralliement prédéterminé. Les machines télé-opérées d'aujourd'hui ne seront vraiment efficaces que le jour où elles auront une autonomie. Le robot porteur de demain sera capable de décider lui-même par quel côté il devra contourner l'obstacle.

## Missions

Si l'on conclut que la délégation de certaines missions à des machines est déjà une réalité dans certains domaines militaires spécialisés, que pourrions-nous faire au niveau terrestre ?

---

(5) *Phalanx* est un système de défense antimissile antinavire à forte cadence (3 000 à 4 500 obus de 20 mm par minute). Le système a déjà tué des humains par erreur.

(6) *BONUS* (*Bofors Nutating Shell*) aussi connu comme *Aced* (Anti-char à effet dirigé).

Afin de simplifier le débat, focalisons-nous d'abord sur les actes réflexes du combattant <sup>(7)</sup>. Ces actes sont assimilés par les grenadiers voltigeurs à travers leurs entraînements répétés, les menant quasiment à une programmation de leurs actes de manière réflexive et instinctive <sup>(8)</sup>. Ces actes, au nombre de 11, seront très difficiles voire impossibles à accomplir pour un robot dans les décennies à venir. Seul un robot avec une mobilité supérieure et avec une intelligence artificielle, un vrai *Terminator*, pourrait remplacer l'homme. Cela reste encore du domaine de la science-fiction. S'il ne pourra pas remplacer l'homme au sein d'une section ou d'un groupe, il pourra lui faciliter certaines missions. Un robot intégré au sein d'un groupe de combat débarqué pourrait par exemple surveiller un périmètre ou éclairer un axe de progression <sup>(9)</sup>. Les Américains en sont déjà à ce stade et ont utilisé certains de leurs systèmes télé-opérés pour des missions de reconnaissance. Ils ont utilisé le *MARCBot* <sup>(10)</sup> conçu pour des inspections de véhicules et de pièces de façon plus offensive. Ils avaient eu l'idée d'attacher sur l'un des *Bot*, une mine anti-personnelle de type *Claymore* <sup>(11)</sup>. Une fois que les insurgés avaient été trouvés, l'opérateur activait la mine qui détruisait la cible et le *MARCBot* avec <sup>(12)</sup>.

Le *MARCBot* est télé-opéré, peut-on faire la même chose de façon autonome ? Comment peut-on donner des ordres élémentaires de type DPIF (ordre de déplacement pour un trinôme : Direction, Point à atteindre, Itinéraire, Formation) ou ZMSPCP (arrêt prolongé pour trinôme : Zone d'installation, Mission, Secteur de surveillance, Points particuliers, Conduite à tenir et Place du chef et des amis) à une machine ? Un soldat va comprendre instinctivement ces ordres mais pour le moment pas une machine. Le chef de groupe doit-il maîtriser deux types de procédures, l'une pour les hommes et l'autre pour les machines ?

## Les limites technologiques d'aujourd'hui

Les robots ont un rôle à jouer sur le champ de bataille. La question est la suivante : en seront-ils capables ? Sur le papier, les robots sont supérieurs aux hommes : ils peuvent être plus forts et plus rapides, ils ne se fatiguent pas, ils ont une vision multi-spectrale et n'ont pas d'émotion. En réalité, ces machines sont très limitées et vont le demeurer encore pendant un certain temps. Pour comprendre leurs limites, il est nécessaire d'analyser le système par les blocs fonctionnels de

---

(7) Les actes réflexes du combattant sont : se protéger, progresser, garder la liaison au sein du trinôme, apprécier d'une distance, rendre compte, désigner un objectif, se camoufler, s'orienter, communiquer, observer et tirer, lancer une grenade.

(8) Lieutenant-colonel (américain) Grossman : *On Combat: The Psychology and Physiology of Deadly Conflict in War and in Peace* (3<sup>e</sup> édition) ; Warrior Science Publications, octobre 2008 ; 403 pages.

(9) Pour rappel, les missions du groupe de combat sont : défendre un point, éclairer, couvrir, Reconnaître un point, appuyer-soutenir, surveiller, s'emparer, rompre le contact.

(10) Le *Multi-function Agile Remote Control Robot* est spécialisé dans la lutte contre les IED.

(11) La *Claymore M18A1* est une mine anti-personnelle orientable capable de projeter 700 billes en acier sur 50 mètres.

(12) P.W. Singer : *Wired for War: The Robotics Revolution and Conflict in the 21st Century* ; Penguin, décembre 2009 ; 512 pages.

base : milieu porteur, énergie, capteurs, système de supervision (calculateur) et effecteurs <sup>(13)</sup>.

Le milieu porteur concerne le contact physique entre le système et son environnement, par exemple les roues et chenilles avec le terrain. Nous avons déjà remarqué que les robots civils vont bientôt envahir nos maisons. Cependant, il y a une différence fondamentale entre l'environnement des robots civils et militaires. Tandis que les robots civils vont opérer sur un terrain connu : usine, maison, rue, ... le robot militaire devra en permanence s'adapter au terrain. L'expression si chère à l'Armée de terre : « le terrain commande » est un vrai casse-tête pour tout ingénieur. Contrairement à un drone qui opère dans un couloir aérien alloué par avance et sans obstacle, un système terrestre est constamment confronté à des obstacles très variés.

L'énergie est le deuxième problème. L'énergie produite ne doit pas seulement propulser le robot mais aussi alimenter ses capteurs, ordinateurs et effecteurs. Afin de pouvoir s'intégrer dans un groupe de combat débarqué, le robot doit être silencieux. Cela exclut tout moteur à combustion interne. Les solutions électriques sont plus silencieuses mais ont une autonomie limitée.

Nous avons tort de penser que la machine sera supérieure dans la perception de son environnement à travers ses capteurs par rapport à l'homme. L'homme n'est pas capable de voir en infrarouge mais il est en mesure d'analyser ce qu'il voit par rapport à son passé personnel, tandis que la machine doit analyser l'image pixel par pixel. De nombreuses sociétés travaillent sur ce problème car l'industrie de la sécurité a un besoin d'analyse automatique de ses nombreuses caméras de surveillance. Pour le moment l'homme reste imbattable.

La difficulté principale reste le calculateur ou le cerveau de ce robot. C'est d'ailleurs le talon d'Achille du système. Pour l'instant, leur capacité d'apprendre est limitée et toute notion d'intelligence artificielle ne verra le jour que dans les décennies à venir. Le cerveau du robot doit constamment fusionner les sorties des capteurs et s'adapter à son milieu. Ce n'est que lorsque tout cela sera parfaitement maîtrisé que le robot pourra faire usage de ses effecteurs de façon autonome.

À tous ces problèmes s'ajoute encore une difficulté connexe : nous avons pour prétention de créer un système infaillible, le robot, par des êtres faillibles, les humains. Car l'algorithme qui fait fonctionner la machine infaillible est conçu par l'homme. Plus un programme est complexe, plus il existe une chance qu'une erreur se soit glissée quelque part.

Les difficultés techniques sont nombreuses mais nous pouvons faire confiance aux chercheurs et ingénieurs pour trouver les solutions. Un jour, dans un avenir pas si lointain, les robots seront vraiment autonomes, ils auront la capacité de s'auto-administrer. Ils seront plus forts et plus intelligents que nous. Mèneront-ils

---

(13) Un bloc fonctionnel est un sous-ensemble d'un système permettant de satisfaire une ou plusieurs fonctions.

nos guerres pour nous ? Ou nous empêcheront-ils de les mener ? Pour les décennies à venir, l'intelligence artificielle qui permettra à un robot d'accéder à la raison restera du domaine de la science-fiction. Le robot de demain n'aura pas une autonomie totale car cela sera techniquement impossible. L'homme restera dans la boucle (*in the Loop*) ou sur la boucle (*on the Loop*), en surveillance et *monitoring*. Les robots avec l'homme hors de la boucle (*out of the Loop*), donc totalement autonomes ne seront pas techniquement possibles. Cependant, il n'est pas trop tôt pour se poser la question de leur légalité d'après le *jus in bello* (droit dans la guerre).

## Les problèmes éthiques et de responsabilité

Cela nous amène aux aspects éthiques. Ce qui nous tracasse principalement, nous les humains, au sujet des robots, c'est l'aspect moral. Peut-on faire confiance à une machine pour prendre une décision morale et juste ? Nous pouvons poser cette question d'une autre façon. Peut-on faire confiance à un être humain pour prendre une décision morale et juste en temps de guerre et sous pression ?

Prenons comme exemple le cas du tireur d'élite américain, le sergent-chef James Gilliland, qui prit la décision de tuer un enfant d'environ huit ans car celui-ci était en train de signaler la position des soldats américains aux insurgés irakiens <sup>(14)</sup>. Sa décision était en accord avec les règles d'engagement du moment mais était-elle morale et juste ? La réponse n'est pas simple et dépend du point de vue où nous nous plaçons. Maintenant, imaginons que ce soit une machine autonome qui ait appuyé sur la gâchette. Cela change tout. Car le sergent-chef en question doit vivre avec la responsabilité qu'il a ôtée la vie à un enfant dans des circonstances difficiles. En revanche, la machine ne pourra pas être considérée comme responsable, elle ne pourra pas se sentir responsable de ses actes et ne pourra pas être punie <sup>(15)</sup>. Le responsable reste l'homme qui lui a délégué cette mission, l'homme qui lui a programmé les règles d'engagement.

Le robot, même sophistiqué reste une machine et pourtant il y a de multiples exemples où les soldats se sont attachés émotionnellement à leurs systèmes télé-opérés. En Irak, ils leur ont donné des noms et se sont photographiés avec. Certains ont passé leur temps libre à pêcher avec eux au bord du Tigre <sup>(16)</sup>. Ils sont même allés jusqu'à leur décerner le brevet *Nedex* et les élever à la distinction de soldat de première classe. Les humains ont une tendance à l'anthropomorphisme. Ce sera aussi vrai pour les robots de demain. Preuve en est, le cas extrême

---

(14) Hans Halberstadt : *Trigger Men: Shadow Team, Spider-Man, the Magnificent Bastards, and the American Combat Sniper* ; St. Martin's Press, mars 2008 ; p. 101.

(15) Patrick Lin, Keith Abney et George A. Bekey : *Robot Ethics* ; *op. cit.*

(16) Joel Garreau : « *Bots in the Ground* » in *Washington Post* ; 6 mai 2007 (<http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2007/05/05/AR2007050501009.html>).

d'attachement entre une équipe et leur système *Nedex* télé-opéré : un des soldats a couru 50 mètres sous le feu de l'ennemi pour « sauver » le système « blessé » <sup>(17)</sup>.

L'anthropomorphisme va très loin. Un robot de déminage était en train d'être testé : sa spécificité était de faire détoner les mines en leur marchant dessus. À chaque explosion, le robot perdait une de ses pattes mais continuait malgré tout à avancer jusqu'à être sur sa dernière patte. Le colonel qui supervisait a fait arrêter les tests, ne pouvant plus supporter la « souffrance » de la machine <sup>(18)</sup>. Le colonel en question ne faisait qu'attribuer des valeurs humaines à une machine.

Le domaine de l'éthique est très large. Il couvre le domaine de l'utilisation des robots en temps de guerre et leur impact sur notre réticence à faire ou ne pas faire la guerre. Mais plus important encore, il prend en compte notre interaction avec ces machines.

### À la place d'une conclusion

Les robots peuvent être vus comme de simples remplacements des humains pour les tâches 3D (*Dirty, Dangerous & Dull*). Mais ils peuvent aussi remplacer les hommes dans des tâches à haute valeur ajoutée comme la chirurgie. De plus, les robots peuvent aller là où l'homme est incapable d'aller, ils peuvent être plus forts, plus rapides et plus intelligents (capacité de calcul). Mais peuvent-ils être autonomes ? La réponse est la suivante : ils seront très autonomes dans un environnement stable, c'est-à-dire exclusivement dans le domaine civil, cela exclut le champ de bataille et le domaine militaire.

Cela ne signifie pas que le robot n'ait pas sa place dans l'Armée de terre française. Au contraire ! Il pourra jouer bien des rôles et évoluer à la vitesse de la technologie. Les premières utilisations pourraient être dans le domaine logistique et la surveillance des périmètres (permettant de libérer les hommes pour d'autres tâches). Une fois cette première phase d'accoutumance réalisée, les robots semi-autonomes pourraient être intégrés dans des unités de combat. Les tests effectués aux États-Unis montrent qu'un robot autonome est plus utile qu'un système télé-opéré. Un robot autonome sera plus facilement accepté, car il n'apporte pas une surcharge cognitive en plus à l'unité <sup>(19)</sup>. Ces robots ne pourront pas faire la différence entre un combattant et un non-combattant mais auront la capacité d'éclairer des zones pour des êtres humains. Dans un futur plus lointain, il sera concevable d'utiliser des robots armés dans les *killbox*, tout ce qui se trouve dans cette boîte délimitée par son utilisateur était considéré comme hostile. Cette tactique est utilisée par l'aviation. C'est une approche qui peut faire peur mais nous devons y

---

(17) P.W. Singer : *Wired for War* ; *Op. cit.* p. 339.

(18) P.W. Singer : *Wired for War* ; *Ibid.*, p. 340.

(19) Ronald Arkin : *Governing Lethal Behavior in Autonomous Robots* ; Chapman and Hall/CRC, mai 2009 ; 256 pages.

songer car d'autres pays y pensent déjà. Combien de temps encore avant que d'autres pays commencent à utiliser des robots autonomes de guerre ?

La technologie change l'homme, certaines amènent des transformations complètes de nos sociétés : le train, la voiture, l'ordinateur. En revanche, nul ne peut prédire avec certitude de quelle façon une technologie est capable de transformer une société. Une chose est claire, les robots vont nous transformer, ce ne sera pas une révolution mais une lente évolution qui se déroulera dans nos maisons et sur les champs de bataille. La France ne peut pas se permettre de tourner le dos à cette évolution.





■ **L'allègement de l'empreinte  
logistique**

RDN



# Partenariats « Industrie-Défense » dans la logistique et le MCO

Jean-Paul Lafitte

| Directeur général du Groupe Daher, président du pôle  
Industries et Défense de Daher.

**F**ace aux nouvelles contraintes qui s'imposent à une défense nationale qui ne peut, par ailleurs, se décharger de ses missions régaliennes, le recours à l'établissement de partenariats avec des industriels du secteur privé est devenu indispensable.

Ces partenariats revêtent un caractère stratégique qui impose de conclure des alliances avec des groupes industriels garantissant pérennité, fiabilité et solidité dans tous les domaines, qu'ils soient techniques ou financiers.

Des actions de soutien courant ont déjà fait l'objet de nombreux contrats d'externalisation par le passé, mais beaucoup reste à faire en matière de logistique en général et de Maintien en condition opérationnelle (MCO) des équipements en particulier.

Une première réflexion s'impose sur le type de partenaires recherchés. Bien évidemment les grands industriels fournisseurs des équipements sont les mieux placés pour autant qu'ils s'impliquent dans les opérations de MCO de ces équipements et qu'ils en assurent la logistique en direct ou avec l'intervention de partenaires qualifiés.

Une inconnue subsiste sur la répartition des tâches lorsque l'on touche au domaine des opérations extérieures (Opex), le niveau d'intervention directe des industriels privés sur le terrain n'étant pas clairement défini en regard des tâches impérativement dévolues aux maintenanciers militaires.

Trois domaines, propices au développement de ces partenariats, sont directement concernés par cette démarche et méritent une approche particulière : la logistique des acheminements incluant le transport et le transit ; la logistique des approvisionnements ; la logistique des équipements (le MCO).

## **La logistique des acheminements : transport et transit**

Qu'il s'agisse de transport sur le territoire national, d'approvisionnement des forces stationnées outre-mer ou de projection d'unités en opérations, les armées

peuvent s'appuyer sur un réseau de spécialistes du transport et du transit qui sont à même de délivrer l'ensemble des prestations nécessaires. Seuls les transports jusqu'au niveau des échelons de combat dans les théâtres d'opérations semblent devoir échapper à cette règle.

### ***Moyens pour y parvenir***

Les moyens de transport détenus en propre par les armées doivent correspondre aux besoins des opérations. Bien entendu, lorsqu'ils ne sont pas utilisés, ces moyens peuvent contribuer à la satisfaction des besoins logistiques du temps de paix dans le respect de la préservation des potentiels. Leur utilisation pour la vie courante ne contribue que partiellement à la formation opérationnelle du personnel chargé de leur mise en œuvre ; personnel qui doit par ailleurs participer aux activités de préparation opérationnelle avec les équipements correspondants.

Il existe donc une place importante disponible pour un partenariat avec les professionnels du transport en complément des moyens offerts par les accords de coopération militaire multinationaux.

Ce partenariat, qui s'inscrit le plus souvent dans des contrats cadres, peut prendre diverses formes : contrats pour un affrètement ponctuel de tout type (navire, avion, train, véhicule routier) ; contrats pour l'ensemble des opérations de transport d'un théâtre d'opérations ; contrats pluriannuels de prestations permanentes de transport ; contrats de mise à disposition de moyens de transport pour une longue durée, si nécessaire dans le cadre d'un partenariat « Public-Privé ».

### ***Plus-value des opérateurs privés du transport***

L'approche financière montre qu'un recours à des partenaires privés permet de réaliser des économies substantielles qui résultent d'un double avantage : une diminution des immobilisations financières lourdes et non directement productives par l'utilisation de moyens mis à disposition par le marché privé ; une prise en compte uniquement de frais variables limités dans le temps, en lieu et place de frais fixes annuels générés par des moyens non utilisés à plein temps, et surtout par l'emploi de personnel mobilisé pour des tâches non strictement opérationnelles.

Ainsi, la Défense bénéficie des moyens existants sur le marché civil, moyens souvent très modernes et performants, et maintenus en conformité avec l'ensemble des réglementations internationales.

Ces solutions mises en œuvre par des professionnels du transport apportent aux armées des expertises métier parfaitement rodées, notamment en matière de transports sensibles, exceptionnels ou pondéreux.

Ces opérations de transport international s'accompagnent des opérations de transit, incluant les formalités douanières et réglementaires qui requièrent des savoir-faire très particuliers, allant du simple franchissement de frontière jusqu'aux procédures complexes d'autorisation d'exportation de matériel de guerre (AEMG).

De plus, grâce à leurs outils de simulation, de modélisation et d'optimisation des flux, les partenaires privés du transport sont capables de proposer des solutions innovantes et réactives pour faire face à des situations d'urgence, y compris sur des terrains difficiles qu'ils ont la plupart du temps déjà expérimentés.

Ce type de contractualisation fait bénéficier les armées de la souplesse opérationnelle dont disposent les entreprises privées, tout en respectant les règles du code des marchés publics.

Ces contrats globaux, établis en regard d'objectifs capacitaires exprimés tant en termes de performance que de délais, garantissent une forte réactivité assortie d'une rapidité d'exécution, gages de la satisfaction du besoin opérationnel. Ils sont donc tout à fait adaptés à la projection des forces, qu'il s'agisse de mise en place initiale, de flux d'entretien, de relève ou de redéploiement.

Depuis bientôt vingt ans, la plupart des transports des opérations extérieures ont été réalisées grâce à une forte contribution des opérateurs privés. Tout récemment, pour l'engagement, puis le désengagement de l'*EUFor* au Tchad, la route libyenne a été réactivée avec succès et sans délai, suite à l'évolution de la situation diplomatique dans cette région.

## **La logistique des approvisionnements**

Toute implantation des forces armées, permanente ou temporaire, en métropole, dans les Dom-Com ou en Opex, nécessite une organisation pour garantir l'ensemble de ses flux d'approvisionnement. L'obligation de concentrer leurs moyens sur la préparation et l'exécution des missions opérationnelles incite les forces armées à externaliser cette fonction.

Cette logistique concerne l'ensemble des approvisionnements nécessaires au fonctionnement courant des armées et au ravitaillement des théâtres d'opérations, qu'il s'agisse de ressources consommables ou de rechanges de toutes natures.

### ***Moyens pour y parvenir***

La Défense doit s'assurer le concours de partenaires capables de se substituer aux forces armées dans les missions de soutien logistique d'approvisionnement en leur apportant des expertises déjà éprouvées, que ce soit dans le milieu militaire ou dans d'autres secteurs de référence (aéronautique, automobile, grande distribution...).

Les partenaires doivent être des experts reconnus sur les différents métiers que les armées souhaitent déléguer. Ils doivent leur permettre de conserver un niveau de professionnalisme équivalent, voire supérieur, dans l'exercice de fonctions qui demeurent fondamentales même si elles ne relèvent pas du cœur de métier des forces.

Pour une efficacité maximale, la Défense doit pouvoir étendre le périmètre des missions confiées à des fonctions aussi complètes que : la définition des niveaux de stocks par rapport à des historiques et des définitions de besoins ; l'achat des produits auprès des fournisseurs ; le suivi des commandes jusqu'à la mise à disposition des produits ; le contrôle technique lors de leur réception ; le stockage sur des plates-formes de regroupement ; la préparation des expéditions en fonction des besoins ; la mise à disposition sur les sites d'utilisation.

La Défense peut moduler son niveau de sous-traitance en fonction des besoins et de la nature des prestations souhaitées.

Pour certains types d'externalisation de logistique d'approvisionnement, la Défense a tout à gagner pour réaliser des économies substantielles en profitant de la capacité du secteur privé à utiliser des moyens et des investissements existants sur le marché, notamment en matière de plates-formes logistiques. Par ce biais, elle peut bénéficier de coûts variables calculés en fonction des prestations effectuées et du niveau de performance. Cette démarche permet d'optimiser des dépenses qui deviendraient prohibitives si elles étaient réalisées en régie avec des taux d'activité faibles ou irréguliers.

Par ailleurs, la Défense se doit de trouver des partenaires de confiance apportant de véritables garanties sur la réalisation des missions, et disposant d'une taille financière suffisante pour pouvoir répondre aux différentes contraintes imposées par le code des marchés publics.

### ***Plus-value des partenaires logistiques privés***

Les partenaires spécialisés dans les fonctions logistiques, qui constituent leur cœur de métier, disposent en propre de structures d'ingénierie à même de mettre en œuvre des systèmes d'information spécifiques et de les adapter aux besoins particuliers de la Défense.

Ces outils doivent permettre aux gestionnaires militaires d'obtenir les informations qui leur sont nécessaires et garantir la continuité du pilotage et du suivi des flux jusqu'aux théâtres d'opérations.

Une autre plus-value réside dans la maîtrise de logiciels de modélisation des flux qui leur permet de mettre en place des solutions innovantes pour optimiser les coûts globaux de la fonction logistique, que ce soit pour des mises en place de nouvelles organisations, ou pour s'adapter à leurs évolutions.

De même, la Défense peut aussi directement bénéficier de nombreux avantages qui découlent de l'expertise et de moyens mis en œuvre par les sociétés privées, dont notamment : l'utilisation de moyens logistiques existants avec des effets d'échelle et l'utilisation de plates-formes partagées ; la consolidation des flux d'approvisionnements regroupés au sein d'un système logistique unique et centralisé ; l'optimisation des niveaux de stocks par une meilleure connaissance des historiques de consommation, des prévisions de besoin et des délais d'acheminement.

Ce type de prestations est déjà largement expérimenté par des opérateurs logistiques, en France comme à l'étranger, pour le compte de nombreux industriels de divers secteurs de l'industrie européenne ou fournisseurs de la Défense. Ces industriels confient tout ou partie des flux de leur *supply chain* : pour la logistique des équipements avec tous les services d'approvisionnement des lignes de production ; pour la logistique opérationnelle avec la mise à disposition des équipements et des produits aux utilisateurs ; pour le support client, avec la gestion des pièces détachées et des flux de réparation.

Le contrat ORRMA, qui externalise l'approvisionnement en rechanges consommables de la Simmad, illustre bien ce type de prestation. Il a la volonté de regrouper sur une plate-forme unique l'ensemble des rechanges destinés au parc d'aéronefs des armées. Le double objectif attendu est l'accroissement du taux de disponibilité des appareils et la diminution de la valeur financière immobilisée en stock.

## **La logistique des équipements : le MCO**

Quel que soit le cadre d'emploi des équipements, tel qu'il est défini aujourd'hui dans le « Plan d'emploi et de gestion des parcs » (PEGP) de l'Armée de terre et dans les concepts de soutien des autres armées, l'objectif reste de garantir le meilleur taux de disponibilité possible des matériels engagés en opérations, tout en respectant le principe de l'efficacité du MCO en métropole.

Si le MCO en Opex reste principalement du ressort des armées, le recours au partenariat avec l'industrie devient le moyen le plus approprié pour répondre à ce principe d'efficacité.

Dans un cadre défini par une maîtrise d'ouvrage qui doit rester du ressort de la Défense, il existe un vaste champ de prestations accessibles aux industriels qui n'est pour l'instant que partiellement investigué.

### ***Moyens pour y parvenir***

La contractualisation du MCO passe par la réalisation de contrats globaux qui peuvent être pilotés : soit par matériel, sous la direction de l'industriel

constructeur ; soit par un équipementier majeur ayant pour vocation de fédérer les différents participants à la maintenance des matériels et des systèmes d'armes.

La première solution est adaptée pour un **engagement de disponibilité**. En effet, elle induit la responsabilité d'un maître d'œuvre unique et la centralisation des risques tout en déchargeant la maîtrise d'ouvrage de la gestion des risques associés aux marchés transverses. Elle entraîne *de facto* la réduction du nombre d'interlocuteurs contractuels. En revanche, ce traitement des risques par un seul maître d'œuvre industriel peut générer une hausse des coûts. Dans cette solution, il faut veiller à conserver la possibilité de mise en concurrence, réduire les effets d'échelle sur les technologies transverses et limiter la visibilité de la maîtrise d'ouvrage sur les prestataires sous-traitants.

La deuxième solution se prête mieux à un **engagement capacitaire**. Certes, le fait qu'elle suppose que certaines activités de gestion contractuelle remontent au niveau de la maîtrise d'ouvrage, réduit la lecture analytique des coûts du système et présente le risque de zones floues ou non couvertes compte tenu de l'organisation matricielle. En revanche, il semble que cette solution apporte un effet d'échelle propice à la rationalisation de l'organisation du soutien, limite les coûts liés à la sous-traitance, favorise le retour d'expérience et permette une meilleure politique industrielle reposant sur l'accroissement de la mise en concurrence tout en facilitant la maîtrise des sous-traitants.

Quelle que soit la solution retenue, le prestataire doté du contrat de MCO doit prendre en compte la dimension de la logistique à mettre en œuvre. Cela le conduit soit à développer cette fonction dans sa propre organisation, soit à recourir aux services d'un professionnel capable de lui garantir le pilotage global de la *supply chain*, la mise en œuvre et le suivi des flux d'approvisionnement, ainsi que la coordination, voire la réalisation, de certaines prestations de maintenance effectuées en propre ou confiées à des sous-traitants.

Cela suppose l'intervention du logisticien prestataire dès le stade de la constitution des groupements, lors de l'appel à candidature. Cette disposition évite que celui-ci voit le périmètre de sa prestation limité par les contraintes du code des marchés publics et surtout lui permet de faire valoir son expertise en orientant la définition de la solution qui sera proposée, gage de cohérence et d'optimisation des coûts.

Cette cohérence doit prendre en compte l'ensemble des relations entre les industriels et les structures étatiques de MCO qui resteront incontournables, notamment pour les Opex. D'autre part, elle doit couvrir aussi bien les flux physiques que les flux d'information, ce qui suppose que le logisticien soit à même de proposer les logiciels ou les modules spécialisés adéquats qui s'interfaçent avec les systèmes d'information de la Défense et des industriels.

Le logisticien participe à l'amélioration de la rentabilité du système de MCO en contribuant aux investissements, aux gains de productivité, à l'optimisation de la répartition des tâches, à la diversification des solutions et à l'analyse des coûts complets. Il apporte sa contribution à la Maîtrise d'ouvrage déléguée (MOAD) dans son rôle de gestion de la performance.

### ***Plus-value des prestataires privés de MCO***

Le principal avantage apporté par les prestataires privés en matière de MCO réside dans leur capacité à s'engager sur un niveau de disponibilité rémunéré en fonction de la performance réalisée. Cette obligation de résultat apporte la garantie d'un véritable bénéfice au profit des armées.

La continuité d'un soutien adapté repose sur une souplesse contractuelle en totale cohérence avec la nécessaire souplesse d'emploi inhérente à la maintenance opérationnelle. En effet, si le code des marchés publics s'impose dans toute sa rigueur lors de la contractualisation initiale, le prestataire bénéficie d'une grande liberté pour faire évoluer son dispositif de soutien, ce qui lui autorise toute la réactivité requise.

Les prestataires privés disposent d'une plus grande capacité à mobiliser des compétences techniques qui se révéleront de plus en plus difficiles à réunir en milieu militaire pour répondre à la fois aux besoins de la vie courante et à ceux des opérations, dans la limite de ce qui est autorisé pour garantir la sécurité de leur personnel.

Cette plus-value est particulièrement mesurable lorsque l'on reste dans le domaine de la vie courante ou de la formation comme le montre, après trois années d'existence, le retour d'expérience du contrat d'externalisation à l'heure de vol pour la mise à disposition des avions et des moyens nécessaires à la formation des élèves pilotes de l'Armée de l'air sur la base aérienne de Cognac.

### **Perspectives d'évolution**

Parvenue au terme de la professionnalisation et confrontée à des impératifs de réorganisation de ses soutiens, la Défense est aujourd'hui amenée à redéfinir le partage des tâches de soutien qu'elle entend assurer en partenariat avec le secteur privé.

Certains de nos partenaires européens ont déjà développé des politiques de soutien souvent très innovantes selon des modalités pourtant différentes, à l'image des solutions retenues respectivement par l'Allemagne et le Royaume-Uni.

Il convient de s'en inspirer pour trouver les solutions les plus adaptées aux spécificités françaises telles que le code des marchés publics, dans un référentiel marqué par un engagement intensif en opérations et des choix d'organisation consécutifs à la

situation sécuritaire (*Livre blanc sur la Défense et la Sécurité nationale*) et au contexte économique et budgétaire actuel (crise économique, LPM et RGPP).

Cela devrait conduire : à une généralisation des partenariats en vue de confier l'essentiel des tâches de soutien à l'industrie privée tout en conservant une maîtrise d'ouvrage étatique solide ; à la constitution de groupements de sociétés rassemblant à la fois des financiers, des industriels et des prestataires de services ; au développement de relations de partenariat entre la Défense et le secteur privé qui reposeront sur une confiance soutenue par une plus grande transparence des objectifs à atteindre, des procédures utilisées, des organisations retenues et de la maîtrise des coûts qui en résultent.

Certains groupes industriels et de services sont prêts à accompagner la Défense nationale dans cette évolution.

# L’empreinte logistique : la maîtrise par la visibilité

Thierry Veisemburger

| Conseiller opérationnel pour les systèmes d’information  
logistique chez Cassidian.

**L**e contexte des engagements des armées a fondamentalement changé ces dernières années. Après une notion d’engagement en masse, face à un ennemi connu dans le cadre de coalition déterminée, nous sommes aujourd’hui confrontés à des engagements limités, aux formes très diversifiées et face à un adversaire incertain et non déterminé au préalable. Le multinational devient le cadre normal des opérations et l’interarmées devient la norme. La mutualisation des soutiens s’impose face au soutien organique. Ces notions mettent en évidence le problème de l’interopérabilité et la nécessité de négocier et construire, en chaque occasion, le système logistique. La capacité logistique devient un véritable enjeu politique et stratégique.

Parallèlement, le système logistique est souvent considéré comme une contrainte, un service consommateur de ressources humaines, techniques, financières et géographiques, une organisation à l’empreinte trop importante et en conclusion comme une vulnérabilité. Dans ces conditions, parler de réduction de l’empreinte logistique semble toujours séduisant mais l’exercice est périlleux et il ne faut pas se tromper de cible. Il ne s’agit pas de réfléchir à une réduction de la logistique mais bien de rechercher un système de soutien adapté, mobile (à inertie réduite) et devenant un véritable facteur d’efficacité. Il convient mieux, à mon avis, de parler de maîtrise de l’empreinte logistique que de réduction.

Autant que l’évolution des technologies, c’est l’évolution de la logistique qui permet l’optimisation des possibilités nouvelles et la révolution de la manœuvre. La maîtrise logistique d’une opération est aujourd’hui un facteur de puissance.

## **Trois facteurs clés, un levier de maîtrise**

Les armées s’inscrivent dans un processus de transformation centré sur l’optimisation de leurs capacités opérationnelles. Or, les conditions nouvelles d’emploi des forces – aujourd’hui expéditionnaires dans la majorité des situations – font, davantage encore qu’hier, des performances du système logistique la condition de l’efficacité d’ensemble. Le concept de soutien des opérations s’inscrit dans

un cadre d'interopérabilité et s'appuie sur des documents doctrinaux. Il se place résolument dans le cadre des opérations multinationales qui sont désormais la référence des engagements français. Le soutien des forces en opération s'applique depuis la projection jusqu'au retrait des forces. Il est constitué par l'ensemble des dispositions et des actions de soutien qui permettent à une force projetée de s'installer et de vivre dans la durée et, simultanément, d'agir tout en maintenant sa puissance de combat.

Dans cette situation, lorsque l'on aborde le sujet de l'empreinte logistique, il faut prendre en considération trois facteurs clés.

- Le poids logistique de la force : différents facteurs influent sur le poids logistique d'une force ; nous pouvons citer principalement, ses équipements, sa zone d'action et bien sûr la forme de l'action.

- La mobilité : stratégique ou tactique, la mobilité s'appuie sur un système de gestion des transports et transits.

- Le soutien de la force : le soutien de la force se caractérise par le souci de la satisfaction au plus juste des besoins des opérations en recourant à l'anticipation, à l'adaptation permanente et à l'optimisation de la ressource.

On peut constater que ces trois facteurs sont interdépendants entre eux. En effet, par exemple, un déficit de mobilité engendrera bien souvent une augmentation importante des stocks pour le soutien et de ce fait alourdira le poids logistique de la force. En conséquence, il apparaît immédiatement que l'empreinte logistique est subordonnée à une « alchimie » entre ces trois facteurs. En revanche, il existe une constante entre ces trois facteurs, il s'agit de la notion de ressource :

- le poids logistique de la force est un ensemble de ressources de toutes natures et de tous types,

- la mobilité a pour objectif de déplacer des ressources dans l'espace et dans le temps,

- le soutien de la force est un consommateur de ressources.

Cette constatation m'amène à considérer la maîtrise de la ressource comme le levier principal de la maîtrise de l'empreinte logistique. Cette affirmation ne remet pas en cause les autres leviers qui influent directement ou indirectement sur l'empreinte logistique comme la gestion des énergies (consommation des équipements, standardisation...), la gestion des déchets, le maintien en condition des équipements, les moyens de transport et la productivité des moyens de soutien.

## La maîtrise de la ressource

La ressource est l'élément fondamental sur lequel il faut agir. Cette ressource possède un cycle de vie durant lequel il faudra la suivre et la gérer. On peut classer le cycle de vie d'une ressource en cinq processus :

- **Le processus de réalisation** : pourquoi et comment est réalisée la ressource ?
- **Le processus de suivi** : la position (géographique et statut) de la ressource.
- **Le processus de gestion** : l'utilisation de cette ressource (stockage, gestion de potentiel, péremption, distribution...).
- **Le processus de consommation** : comment est utilisée cette ressource (consommation, réemploi, durée de fonctionnement...)?
- **Le processus de fin de vie** : comment et pourquoi se termine le cycle de vie de la ressource ?

Il est nécessaire de disposer d'une véritable visibilité de la ressource sur toute la chaîne de soutien. Cette visibilité s'acquiert par la connaissance des stocks « amont », de la ressource en cours d'acheminement et enfin des stocks « aval ».

## La visibilité de la ressource

La visibilité de la ressource est définie de la manière suivante dans les documents de doctrine français : « La visibilité de la ressource correspond à la capacité de connaître l'identité, la position, la quantité et l'état de ressources en un point ou sur une partie de la chaîne de soutien (réf. PIA 04.105) ».

Grâce à une connaissance permanente d'un côté des pertes, des dommages et des consommations et de l'autre de la position, de la qualité et de la disponibilité de la ressource, les logisticiens peuvent être en mesure de piloter le dispositif logistique grâce au placement des éléments de soutien et des stocks à l'endroit où leur efficacité maximale sera garantie. L'accroissement des coûts des armements et de leur maintenance nécessite de disposer non seulement des moyens pour assurer le maintien en condition mais aussi et surtout d'une véritable visibilité sur la situation des parcs déployés et des ressources techniques pour maintenir la capacité opérationnelle. Cette visibilité est seule garante de l'efficacité des soutiens. Enfin, l'accroissement des coûts des ressources et les restrictions budgétaires amènent une réflexion sur le dimensionnement des stocks. On parle maintenant de juste suffisance. Afin de véritablement mesurer l'adéquation de ces niveaux de stocks avec le besoin et les impératifs des opérations, il faut disposer d'outils de mesure et d'évaluation. L'efficacité des soutiens alliée à la juste suffisance des stocks doit permettre

à terme une réduction de coût significative. La visibilité sur les ressources offre un véritable potentiel de réduction des stocks.

Les capacités énumérées précédemment ne sont acquises que par la mise en œuvre de systèmes de suivi et de gestion de la ressource. En effet, la visibilité ne se résume pas au suivi. Il ne s'agit pas de se limiter à un constat mais bien d'être capable de savoir, d'anticiper et de prévoir pour agir en conséquence et de façon proportionnée, adaptée et cohérente. L'obtention de cette capacité est donc bien le cœur du sujet. Les informations ainsi obtenues doivent aider les responsables des différents niveaux de la chaîne de soutien à prendre la bonne décision qui peut se traduire en :

- réduction des délais de réaction et de livraison,
- réduction des coûts,
- optimisation des stockages et des transports.

Ces capacités participent directement à la maîtrise de l'empreinte logistique.

Pour atteindre cet objectif, il faudra maîtriser l'information. C'est-à-dire, mettre à disposition de la bonne personne, la bonne information, au bon moment, sous la bonne forme et en toutes circonstances.

## **La maîtrise de l'information**

Le besoin pourrait se résumer à « maîtriser l'information » sur les ressources. En effet, il s'agit de disposer des outils pour assurer une totale visibilité sur la ressource afin de disposer d'une réelle capacité d'aide à la décision pour les métiers de la logistique.

De nombreux systèmes d'information logistiques sur le théâtre d'opération et les systèmes de communication offrent la capacité de détenir une quantité importante d'informations. Si cette somme d'information permet d'assurer un suivi et une conduite pour le déroulement des opérations, elle provoque, pour la logistique un cloisonnement par domaine. Il est indispensable et nécessaire pour la fonction logistique de disposer d'une capacité de synthèse de l'information afin de détenir une vision élargie de la situation logistique.

Les forces doivent se battre autant « pour » l'information que « grâce » à l'information. Les opérations info-valorisées devraient permettre des avancées significatives dans de nombreux domaines et notamment celui de la logistique. L'info-valorisation doit autoriser l'échange facile et rapide des informations entre tous les acteurs, quelle que soit leur situation géographique ou leur chaîne fonctionnelle. Un système de management global de la chaîne logistique peut permettre d'appréhender les écarts de réalisation en temps utile. Il est alors possible

de constituer une « image logistique » grâce à laquelle les logisticiens sont en mesure d’évaluer préventivement les conséquences logistiques des actions, d’apporter les mesures correctives au fur et à mesure et de définir les modalités de mise en œuvre garantissant la meilleure efficacité des moyens logistiques. Il s’agit bien d’améliorer le service au regard de son coût et non plus le service seul.

Le contexte opérationnel du suivi et de la gestion de la ressource montre l’impérieuse nécessité de détenir une information fiable, pertinente et cohérente sur les ressources afin de pouvoir répondre aux nouveaux défis de la logistique opérationnelle dans un contexte financier de plus en plus tendu. Cette information évolue ou s’échange dans un environnement complexe, évolutif et parfois non stabilisé.

Dans la chaîne de soutien, le besoin en information concerne de nombreux acteurs de niveaux d’emploi différents (stratégique, opératif, tactique), de niveaux hiérarchiques différents (de l’officier d’état-major de conception jusqu’au pion d’exécution logistique) et d’appartenances différentes (militaires, nationaux ou alliés ; civils, administration ou prestataires de services). La maîtrise de l’information doit offrir à ces différents acteurs de la chaîne de soutien :

- une aide pour la conception, la planification et la conduite du volet logistique des opérations ;
- une aide à la coordination des différents acteurs grâce à une information adaptée et personnalisée ;
- la capacité de coordonner, contrôler et conduire les acheminements et les ravitaillements ;
- la capacité de connaître la disponibilité et la qualité des ressources.

Encore une fois, ces capacités participent directement à la maîtrise de l’empreinte logistique.

Pour atteindre une telle performance, il faut considérer l’information comme une réelle matière première et la gérer avec rigueur comme toute autre ressource. Enfin, pour appréhender toute la portée de cette maîtrise de l’information, il faut comprendre les caractéristiques de la chaîne de soutien.

## **La chaîne de soutien**

La chaîne de soutien peut être comparée à la colonne vertébrale du système logistique. C’est dans cette chaîne que sera suivi le cycle de vie d’une ressource. En effet, une ressource n’existe que pour obtenir une capacité qui sera assurée grâce au soutien. Les informations sur une ressource devront donc être disponibles tout au long du cycle de vie de cette ressource dans la chaîne de soutien. La chaîne de soutien se caractérise, en particulier, par :

- son caractère interarmées, interalliées, civilo-militaire ;
- sa chaîne d’information adaptée au contexte d’emploi (France, Union européenne, Otan, ONU, coalition) et au besoin national ;
- son parallélisme avec la chaîne de commandement et son action subordonnée à la chaîne de commandement mais indépendante en gestion ;
- sa continuité depuis les fournisseurs de ressources ou les dépôts d’infrastructure en métropole jusqu’au dernier niveau de soutien des forces ;
- sa permanence aussi bien pour les forces en métropole que pour les forces pré-positionnées et les forces projetées ;
- son évolutivité en fonction des changements de contexte d’emploi ou d’action de la force ;
- ses acteurs qui peuvent être militaires (nationaux ou internationaux) ou civils ;
- son organisation adaptée à la typologie du soutien (différence entre la chaîne d’entretien et la chaîne médicale d’évacuation, par exemple).

S’appuyant sur un système d’information permettant le suivi et la gestion en temps utile des ressources, le soutien des forces se caractérise par le souci de la satisfaction au plus juste des besoins des opérations en recourant à l’anticipation, à l’adaptation permanente et à l’optimisation de la ressource mise en œuvre. Il n’y a pas de performance logistique sans anticipation : il faut rechercher le temps d’avance. Cela n’est que la traduction logistique du principe de liberté d’action. Les forces projetées doivent posséder des capacités leur permettant fréquemment et rapidement de changer de configuration pour s’adapter aux changements de contexte et de menace, voire de nature ou de mission.

\*

\*\*

En conclusion, nous pouvons dire que la maîtrise de l’empreinte logistique est conditionnée par la maîtrise sur les ressources. Cette maîtrise confère aux différents acteurs de la chaîne de soutien une véritable aide à la décision pour l’optimisation des dispositifs logistiques et garantissant la réussite de la mission.

Maîtriser ses ressources c’est :

- disposer d’une vue globale, instantanée et prévisible, des capacités logistiques ;
- pouvoir agir sur les flux pour maintenir la capacité logistique ;

- maîtriser les coûts d'acheminement, de stockage, de distribution et de manutention ;
- maîtriser l'emploi des ressources à péremption ou critiques et, en conséquence, les coûts particuliers liés à ces ressources ;
- coordonner l'action des différents acteurs (la bonne ressource, au bon endroit, au bon moment, pour le bon destinataire) ;
- estimer les évolutions futures et anticiper les besoins afin de raccourcir les délais de réaction et éviter les ruptures logistiques.





■ **Le blindage du futur**

RDN



# Orientations des recherches en matériaux pour la protection à la DGA

Bruno Mortaigne

Responsable du domaine scientifique « Matériaux Chimie  
Énergie » (DGA/DS/MRIS).

Les concepts avancés pour la protection balistique font partie des orientations prioritaires de la DGA dans le domaine des matériaux. Elle oriente ses travaux sur la « protection-perforation » pour répondre aux besoins militaires pour les matériels (transports terrestres, aériens et navals) et la protection du personnel (gilets de protection balistique, casque de combat, sièges d'hélicoptères, etc.) qui est une priorité forte. Les travaux soutenus peuvent également intéresser la sécurité des biens et des personnes (avions civils, ferroviaire : éléments avant de TGV, transports de fond, protection anti-infraction de certains bâtiments : centrales nucléaires, bâtiments officiels, banques, commerces de luxe...), et trouvent leur place dans différentes capacités technologiques telles que l'« efficacité et la protection du combattant », l'« optimisation de l'efficacité des blindés », les « plates-formes navales innovantes », la « conception de plates-formes aériennes futures ».

Même si ce sont les paramètres matériaux qui gouvernent les propriétés, pour proposer des solutions pertinentes il convient de raisonner en termes de « concept de protection » plutôt qu'uniquement en termes de choix de matériaux car l'efficacité du système va autant dépendre des matériaux choisis que de leur combinaison et de la façon de les mettre en œuvre sur le support à protéger. Dans la définition d'un concept de protection contre les menaces balistiques ou explosives, ce sont essentiellement les performances mécaniques des matériaux sous chargements dynamiques qui sont recherchées : comportement aux hautes vitesses de déformation, propagation des ondes dans les matériaux, modes d'endommagement et de ruine, rupture dynamique, érosion sous forte pression, etc. Les protections sont de plus en plus définies pour apporter une fonctionnalité supplémentaire à un système et la multifonctionnalité des matériaux, en plus de l'allègement des structures et de la tenue structurale, fait partie des orientations prioritaires du domaine.

Le domaine scientifique s'intéresse aux propriétés mécaniques et au comportement des matériaux sur toute la gamme de vitesse de sollicitations depuis

le régime quasi-statique (quelques  $\text{m.s}^{-1}$ , représentatif des impacts faible vitesse tels que le crash auto, les impacts d'oiseau, de gravillon, etc.), jusqu'à la dynamique rapide (vitesse de déformation de l'ordre de  $1\ 000\ \text{m.s}^{-1}$  représentative des impacts balistiques), voire au-delà pour les phénomènes les plus rapides (charges creuses, charges génératrices de noyaux, impacts hyper véloces, débris spatiaux, etc.). La modélisation du comportement et les essais, qui s'imposent pour la validation finale et pour le recalage des modèles qui sont développés, permettent de disposer de lois de comportement mécaniques validées. Elles permettront ultérieurement de disposer de modèles de simulations représentatifs et de facteurs de réduction des coûts dans l'élaboration des futures solutions de protection.

Pour pouvoir optimiser une protection, il est nécessaire de raisonner à des niveaux multi-échelles depuis la microstructure du matériau, en passant par les échelles mésoscopique et macroscopique, jusqu'à l'assemblage des différents matériaux qui constitueront celle-ci dans son environnement d'utilisation. Il n'est pas possible de parler d'un matériau sans lui associer les procédés utilisés pour son élaboration puisque ce sont toujours les procédés de mise en œuvre qui contrôleront pour une large proportion les propriétés finales qui seront obtenues. C'est la microstructure du matériau qui gouverne les relations entre la structure et les propriétés, et donc les performances. La prise en compte lors du processus de conception de la notion de « réparabilité » des solutions de blindage permet de minimiser les coûts de maintenance lors de leur remplacement. Le choix des matériaux de protection se fait également en tenant compte des notions de « recyclabilité » et de coût énergétique d'élaboration.

## Quelques priorités pour les recherches

Il n'est possible de proposer et d'optimiser les protections balistiques qu'en étudiant les menaces, et en adaptant en permanence en parallèle la protection à la menace susceptible d'être rencontrée. Ceci conduit à mener des recherches sur ces deux points pour comprendre le comportement des matériaux dans ces deux fonctions différentes mais complémentaires.

## Menaces

Les menaces diffèrent par leur nature et par l'énergie qu'elles transmettent à la cible. On distingue dans nos travaux les têtes militaires constituées de perforants à énergie cinétique (balles, éclats d'artillerie, projectiles flèche) et les projectiles à énergie dirigée (charge creuse, charge génératrice de noyaux), mais également les menaces constituées par des « projectiles » naturels (grêlons, oiseaux, débris) susceptibles d'être rencontrés par des systèmes (automobiles, trains, avions, missiles, satellites) en mouvement.

Les agressions aux chocs de faible énergie comme ceux liés à la chute d'objet, aux chocs rencontrés sur les casques de pilote (quelques  $\text{m.s}^{-1}$ ), constituent également des menaces à évaluer et pour lesquelles il convient de développer des protections adaptées.

La montée en puissance de la menace terroriste et les conflits asymétriques ont favorisé l'émergence de nouvelles menaces telles que bombes, charges génératrices de noyaux et mines artisanales, couplant des phénomènes de souffle et d'impact multimatériaux et multifformes, qui sont regroupées dans la catégorie des « engins explosifs improvisés (EEI) ». Les agressions par EEI deviennent un sujet prioritaire et la prochaine édition de la norme *Stanag 4569* les intégrera. Le niveau de protection des véhicules terrestres doit prendre en compte cette problématique nouvelle et doit reposer sur des solutions innovantes pour la protection des occupants.

### **Définition des têtes militaires**

Le mode d'action des projectiles cinétiques, développés pour perforer les blindages des véhicules lourds, correspond à un effet cinétique du perforant sur la cible. Au moment de l'impact, l'énergie apportée sur la cible suit la relation mathématique  $E_c = \frac{1}{2} mv^2$  ( $E_c$  = énergie cinétique). Pour l'élaboration des protections, les efforts de recherche porteront sur des solutions en vue d'absorber cette énergie.

Dans les perforants à énergie cinétique (projectiles flèches), les recherches portent sur le paramètre « masse » de cette équation. Un projectile flèche est l'une des munitions principales de char utilisée en tir tendu. Il correspond à un pénétrateur constitué d'un barreau allongé en alliage lourd, stabilisé par rotation en vol et guidé et propulsé par l'intermédiaire d'un sabot dans le canon. Plus la section du projectile est faible et plus sa masse rapportée au maître couple sur la cible est élevée, ce qui se traduit comme une augmentation de la pression d'impact lors de l'interaction projectile/cible.

Dans les projectiles à énergie dirigée (charge creuse, charge génératrice de noyaux), c'est le paramètre « vitesse » qui devient prépondérant à optimiser. Ces projectiles sont employés comme charge militaire de missile et de certaines munitions d'artillerie et de char. Une charge creuse consiste en une charge d'explosive placée autour d'un revêtement de métal de forme conique. L'amorçage de l'explosif se fait à l'opposé du revêtement et engendre une focalisation de l'énergie dans les gaz de détonation qui projette le revêtement métallique dans l'axe de la munition. Au moment de l'impact sur la cible, la charge explosive entourant le cône métallique détone et « retourne » littéralement celui-ci sous la forme d'un long jet de métal animé d'une vitesse de 9 000 à 11 000  $\text{m.s}^{-1}$  dont le pouvoir de pénétration est extrêmement puissant. Pour obtenir des charges creuses performantes, il faut utiliser des matériaux de revêtement possédant une densité suffisamment élevée et une capacité d'élongation importante.

Les charges génératrices de noyaux sont d'autres dispositifs particuliers de perforation. La charge génère un noyau aérodynamiquement stable à partir d'un revêtement métallique mis en vitesse par une charge explosive. Par rapport à la charge creuse, ce noyau est propulsé à des vitesses plus lentes de 2 000 à 3 000 m.s<sup>-1</sup> donc de pouvoir perforant inférieur, mais présente l'avantage d'être déclenché à des distances de plusieurs dizaines de mètres, voir centaines, évitant ainsi d'être détecté par les systèmes de protection des véhicules lourds.

Les efforts dans le domaine des matériaux pour améliorer les performances des têtes militaires et leur efficacité vont porter essentiellement sur le pilotage de la microstructure des pénétrateurs, et sur les procédés d'élaboration des matériaux. Les notions de réduction de la masse et du volume des munitions, ainsi que la sécurisation de leur fonctionnement (muratisation) restent également toujours sous-jacents dans la définition des solutions « matériaux » à proposer. Les solutions qui seront proposées devront également avoir une répercussion limitée sur le coût global de la munition.

### **Recherches menées sur les perforants militaires**

Au niveau des projectiles cinétiques, les efforts de recherches concernent le développement de nouveaux matériaux métalliques à structure ultrafine (voire nanométrique) et à structure amorphe (verres métalliques). Ils sont orientés en vue de disposer de pénétrateurs avec des ogives denses et à bas coût de fabrication. Ces efforts concernent également les nouveaux procédés d'élaboration comme le frittage flash *Spark Plasma Sintering (SPS)* ou le frittage micro-ondes qui permettent de contrôler et d'associer différents matériaux en contrôlant leur microstructure et donc leurs propriétés. Ces technologies de frittage ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients, et méritent dans le cadre de la recherche de technologies de rupture d'être investiguées.

Actuellement, des deux procédés, c'est le *SPS* qui présente la maturité la plus avancée. La technologie *SPS* permet d'une part, d'associer des poudres de natures différentes dans un même moule par cofrittage et, d'autre part, de souder sans apport de matière deux pièces massives pour obtenir un matériau présentant un gradient continu de propriétés mécaniques.

L'élaboration de matériaux ultrafins, voire nanostructurés, correspond à de nouveaux matériaux en rupture avec les matériaux métalliques conventionnels. Ils présentent des modes de déformation inexplorés qui peuvent être rendus favorables à la pénétration de blindage homogène et sont donc des candidats potentiels pour les nouvelles générations de munitions perforantes. Ils forment une nouvelle génération de matériau à très fort potentiel d'applications, grâce notamment :

- à des résistances mécaniques élevées,

- à des comportements plastiques tout à fait nouveaux permettant de piloter des modes de rupture spécifiques.

L'utilisation de poudres submicroniques permet *via* le procédé *SPS* de réaliser l'opération de frittage avec un temps de cycle très court, limitant ainsi le grossissement des grains ou cristallites. Ce procédé permet d'élaborer des alliages métalliques massifs ultrafins et nanostructurés. C'est ce procédé qui est considéré pour la réalisation de munitions flèches en alliages nanostructurés à base de tungstène. Dans le même ordre d'idées, l'élaboration de pénétrateurs durs et denses à partir d'alliages sans cobalt est également une priorité pour la recherche compte tenu des tensions sur les règles d'utilisation de cet élément dopant dans les alliages.

Les verres métalliques massifs correspondent également à de nouveaux matériaux en rupture avec les matériaux métalliques conventionnels. Ils présentent un mode de déformation favorable à la pénétration de blindage homogène et sont donc également des candidats potentiels pour les nouvelles générations de munitions perforantes. Ils forment une nouvelle génération de matériau à fort potentiel d'applications, grâce notamment :

- à des combinaisons de propriétés uniques : limite élastique élevée, excellente tenue à la corrosion, biocompatibilité et faible densité, faible coefficient de friction ;

- à des possibilités de mise en forme de précision de type thermoplastique, exceptionnelles pour des alliages métalliques.

Les efforts concernent le développement de nuances de verres métalliques à hautes résistances mécaniques capables de se déformer plastiquement tout en conservant un bon pouvoir pénétrant. L'orientation et le contrôle de la microstructure lors de l'élaboration permettent d'optimiser les propriétés.

Les recherches effectuées pour les cônes des charges creuses et les revêtements des charges génératrices de noyaux concernent des matériaux comme le cuivre, le nickel, le tantale ou le molybdène. La métallurgie intervient fortement sur les performances ; un cuivre de grande pureté avec une microstructure la plus fine possible favorisera l'élongation des jets de charge creuse. Il conviendra donc de maîtriser au mieux celle-ci, en contrôlant les traitements thermomécaniques qui seront appliqués lors de l'élaboration. Des travaux sont en cours sur des solutions nanostructurées de ces métaux.

Il est également envisageable de s'intéresser à la métallurgie des poudres pour élaborer de nouveaux perforants cinétiques sous forme de composites à matrice de verre métallique mis en forme par *SPS* avec des renforts durs, comme par exemple du tungstène. La taille des particules est adaptée pour obtenir une percolation conduisant aux propriétés recherchées.

## Protections

Les axes d'efforts dans le développement des systèmes de protections adressent des réponses à des sollicitations très variables, liées aux menaces décrites précédemment. Ils sont orientés pour définir des protections efficaces permettant de se protéger des pénétrateurs et des fragments qui peuvent être formés, ainsi que sur la compréhension du comportement des projectiles à haute vitesse.

Ces différents systèmes de protections, indépendamment de la forme de la pièce ou de la structure, peuvent être classés en fonction de l'utilisation des matériaux qui les constituent et des gammes de sollicitations en énergie qui seront rencontrées :

- protection opaque des véhicules (lourds, médians et légers, ainsi que les hélicoptères) ;
- protection transparente des véhicules dans le domaine du visible, de l'infrarouge (protection d'optique, vitrages, épiscopes...) qui doit être totalement multifonctionnelle (transparence, tenue structurale...) ;
- protection du combattant (gilet, casque, visière) en particulier dans le cadre du développement du fantassin du futur (Félin), où la masse de la protection est un facteur déterminant ;
- développement de protections face à des chocs de plus faible énergie, comme les casques de pilote de chasse ;
- protection des infrastructures.

Dans le choix de la solution de protection finale à retenir, la tenue aux impacts multiples peut conduire à une solution contradictoire avec une solution très performante d'arrêt d'un projectile unique (choix de céramique), comme le compromis masse-coût-performance qui reste le critère primordial du système d'arme.

### *Définition d'un système de protection*

Plusieurs catégories de solution de blindage se distinguent selon le niveau de menace : les blindages « passifs », les blindages « actifs » et les blindages « réactifs ».

Du fait des énergies engendrées lors de l'impact, la simple solution d'interposer une protection métallique pour arrêter le projectile n'est pas toujours possible car elle conduirait à des épaisseurs telles que la protection ne serait plus transportable. Le blindage « passif », constitué par un empilement de différents matériaux métalliques, composites, polymère et céramique, est une première solution. Les efforts de recherches doivent être menés non seulement sur les matériaux mais également sur les concepts de protection combinant différents matériaux. Face aux projectiles flèches et aux charges creuses, la protection visera surtout à déstabiliser, voire rompre, le projectile.

Pour les projectiles cinétiques les plus dimensionnant comme les barreaux flèches dont la vitesse d'impact peut aller jusqu'à 1 800 m s<sup>-1</sup> (niveau IV du *Stanag* : 911 m.s<sup>-1</sup>, et niveau V 1335 m.s<sup>-1</sup>), la solution la plus efficace est de briser le projectile en associant différents matériaux de manière à répartir son énergie cinétique sur un volume de matière le plus grand possible.

Pour une charge creuse la théorie indique que la profondeur de pénétration augmente linéairement avec la longueur du jet et avec la racine carrée de sa densité. Elle pénètre une épaisseur d'acier correspondant à 10 fois son calibre. Pour ce type de menace, l'objectif est de déstabiliser le jet par la mise en mouvement de plaques soit par des systèmes passifs de type PAC (Plaque accélérée par choc), soit par des systèmes réactifs. Les blindages réactifs correspondent à une structure sandwich inclinée emprisonnant un explosif en feuille qui détonnera au moment du passage du jet. Le mouvement des deux plaques du sandwich dans des directions opposées créera alors une perturbation.

Face aux munitions à effet de souffle (ex. munition thermobarique), plus que des travaux sur les matériaux, ce sont des travaux sur les concepts structuraux qui sont pris en compte. Pour cette application, les efforts de recherche portent sur des structures visant à dévier l'effet de souffle plutôt qu'à s'y opposer frontalement mais aussi sur les technologies de transfert d'énergie vers les zones rigides des structures ou encore sur les technologies d'absorption d'énergie. Les fragments émis, même s'ils sont de faible masse, pourront avoir des vitesses de 4 000 m.s<sup>-1</sup>. Dans l'élaboration des structures, les efforts du domaine scientifique concernent essentiellement les technologies de mise en forme, d'assemblage et de soudage des matériaux entre eux.

### **Principe de protection**

Le principe de fonctionnement d'un blindage de véhicule contre des projectiles cinétiques, est de combiner en face avant un matériau dur qui aura pour fonction de casser les noyaux des projectiles et en face arrière un matériau avec une grande ductilité qui aura pour fonction d'arrêter les fragments qui auront été générés, en évitant le phénomène d'écaillage du matériau reconnu pour être générateur de projections arrières. Or, cette combinaison de propriétés est actuellement incompatible pour un même matériau ce qui nécessite d'avoir recours à un « concept de blindage » associant par exemple de la céramique sur une structure en acier ou en aluminium.

Les axes d'effort portent sur les matériaux durs comme les céramiques pour les faces avant, sur les matériaux plus ductiles constitués par des métaux associés à des matériaux composites, et sur les nouveaux concepts permettant d'aboutir à des matériaux à gradient de propriétés. Sont regardés les constituants de ces éléments mais également les procédés servant à les élaborer et à les associer.

Pour améliorer les performances, un tissu composite (*backing*) qui aura pour fonction d'arrêter les éclats est fréquemment couplé en face arrière pour constituer un sur-blindage. L'intérêt de ce type de matériau en sur-blindage a été démontré sur structure en aluminium pour arrêter des projectiles simulés de type 20FSP (menaces EEI, éclats). Des efforts sont menés sur les fibres et leur mode de tissage, leur intégration et leur assemblage dans la solution de blindage, en particulier pour la protection des combattants et des véhicules.

Les procédés d'assemblage des différents éléments de la structure du véhicule revêtent également une grande importance. Les techniques avancées de soudage (par friction, laser, faisceaux d'électrons, plasma... en général sans apport de matière), les techniques d'assemblages multimatériaux constituent des enjeux forts sur le comportement de la structure. L'optimisation des pièces tirant parti des nouveaux matériaux et procédés d'assemblage permet des gains de poids parfois considérables qui se répercutent immédiatement sur les performances du véhicule.

### **Matériaux durs : céramiques**

Les céramiques sont connues pour leur potentiel en tant que matériau de blindage : ces performances sont liées à leur faible densité par rapport aux matériaux métalliques durs, associée à des résistances mécaniques en compression très élevées. Cependant, les performances balistiques varient considérablement d'une composition à l'autre. De même, la performance d'un blindage ne dépend pas que des caractéristiques de la céramique employée ; son intégration dans la solution de blindage est fondamentale pour l'efficacité globale de la protection. Des pistes sont explorées pour obtenir des produits à plus hautes performances capables de concurrencer les céramiques de blindage haut de gamme actuellement employées pour les niveaux de protections plus élevés.

Dans le domaine des matériaux céramiques opaques utilisés pour la protection balistique, les matériaux de choix sont l'alumine, le carbure de silicium (SiC) et le carbure de bore ( $B_4C$ ), ce dernier étant densifié par frittage sous charge ce qui le rend actuellement coûteux et peu utilisé par les industriels. Le  $TiB_2$  sous forme nanostructuré est également une céramique d'intérêt qui pourrait se développer pour les protections. Des travaux sont réalisés pour renforcer les alumines (aluminosilicates) et pour réduire le coût de mise en œuvre du carbure de bore, même si l'amélioration des SiC reste toujours une voie de fort intérêt. Des composites à matrices métalliques renforcées par des céramiques encapsulées permettent également d'alléger les protections tout en conservant de bonnes propriétés balistiques.

Les produits résultants de mélanges d'alumino-silicates présentent l'avantage d'avoir une densité (3,2) inférieure à celle des produits en alumine (3,8 à 3,98), matériau de référence constituant une part importante du marché des céramiques de blindage, tout en présentant des propriétés dynamiques (au sens du comportement mécanique aux grandes vitesses de sollicitation) intéressantes.

Le carbure de bore ( $B_4C$ ) est un matériau qui cumule une densité faible (2,50), une dureté très élevée (3 200 kg/mm<sup>2</sup>) ce qui le rend particulièrement intéressant pour la réalisation des protections. Sur ce matériau, des efforts sont menés sur la compréhension de la structure du matériau et sur les mécanismes mis en jeu pour la dissipation de l'énergie au moment de l'impact et de manière plus théorique sur les procédés d'élaboration pour réduire les coûts de fabrication des protections. La technique dite *Reaction Bounded* développée par Israël et les États-Unis est une voie intéressante à explorer. Ces procédés « basse température et sans charge appliquée » permettent d'élaborer des matériaux à base de SiC ou de SiC/ $B_4C$  à moindre coût.

Les technologies de dépôt des céramiques (torche plasma...) sur des matériaux ductiles (blindage d'aube moteur, dépôts sur des textiles pour le fantassin) sont regardées avec grand intérêt en se focalisant sur le comportement des interfaces du dépôt.

Les blindages transparents correspondent à un besoin spécifique avéré (oculus pour les boucliers, visière du combattant, vitrage pour les véhicules et les aéronefs en moyenne ou grande dimensions). Les céramiques transparentes pourraient venir en remplacement des solutions à base de verres feuilletés dans la constitution des blindages transparents. Elles permettraient des gains très élevés en termes d'allègement (de l'ordre de 50 %). Les céramiques à base de spinelles de magnésie présentent un coût très élevé et sont pénalisées par l'absence de filière française (dépendance vis-à-vis des États-Unis). Les céramiques à base de saphir (oxyde d'alumine mono cristallin) sont d'un coût rédhibitoire et résistent mal au multi-impact. Une solution pourrait être le développement d'une filière française de mise en œuvre des céramiques transparentes par un procédé conventionnel, comme par exemple le pressage à chaud (HIP), qui permettrait de réduire les coûts de fabrication. Dans le choix du procédé, le contrôle de la microstructure du matériau est primordial sachant que la fragmentation de la céramique dépend de la microstructure et du confinement. De plus, la dureté augmente lorsque la taille des particules diminue, ce qui montre l'intérêt du développement des matériaux nanostructurés dans ces applications.

### **Matériaux ductiles**

L'intégrité des structures est abordée en parallèle et avec le même intérêt que l'allègement lors de la conception des systèmes de défense : amélioration des performances de protection à masse équivalente et/ou allègement des protections. Deux grandes familles de matériaux métalliques sont utilisées dans les blindages de véhicules : les aciers et les alliages d'aluminium. Les métaux légers avec nano-renforts constituent une nouvelle voie à explorer pour répondre à ce besoin (aluminium avec des nano diamants ou autres pour la protection des véhicules légers), mais elle nécessite d'être validée et comparée à des solutions existantes.

Les efforts sur les matériaux pour la protection portent sur :

- alliages de titane dont les propriétés permettent d'envisager des applications structurales et de blindage (efficacité massique de 1,5 par rapport à l'acier), mais il faudrait que leur coût diminue ; de nouveaux alliages avec des caractéristiques élevées pourraient permettre des sauts technologiques sans toutefois nous enfermer dans des solutions trop complexes ;

- alliages d'aluminium à très haute résistance développés pour l'aéronautique ;

- matériaux poreux absorbants (billes creuses, nidas associés aux céramiques) pour des applications planchers anti-mines et parois latérales de protection contre les EEI ;

- matériaux à gradient. Il conviendra de trouver les bonnes combinaisons et de mettre au point de nouvelles solutions technologiques à partir du procédé Frittage Flash *SPS*.

Comme pour les pénétrateurs, la technologie *SPS* peut s'appliquer à la réalisation d'éléments de blindage. Cette technologie permet la réalisation de matériaux à gradient de fonctions, nanostructurés et obtenus avec des cycles de fabrication courts. Elle est prometteuse pour la combinaison de matériaux présentant des propriétés très différentes comme l'association céramique/métal pour renforcer la céramique. L'emploi de nano matériaux combiné à la technologie *SPS* et/ou micro-ondes devrait permettre de réduire le poids des véhicules ainsi que le coût des protections balistiques.

Les aspects innovants des verres métalliques massifs, décrits précédemment, offrent également des applications pour les protections. Ces matériaux, par leur capacité de combiner faible densité, comportement élasto-plastique, mécanisme d'érosion comparable aux céramiques, peuvent constituer des solutions innovantes pour les blindages. Les propriétés nouvelles des verres métalliques comparées aux alliages métalliques traditionnels, du fait de l'amélioration de la stabilité thermique des verres et composites de faible densité, laissent prévoir également des perspectives d'applications innovantes dans les domaines civils, de la mécanique (automobile, machines mécaniques), des loisirs, pour l'aéronautique du fait de leur tenue en température et à la corrosion.

### **Backing et matériaux textiles**

Les matériaux textiles souples ou en renforts fibreux de matériaux composites ont vu leur utilisation s'accroître dans de nombreux domaines pour des questions d'allègement des structures mais également pour la protection. Les composites à renforts tissés sont de plus en plus utilisés dans des domaines d'application où des performances mécaniques à l'impact, d'endommagement ou encore

de fatigue sont nécessaires. Il faut distinguer deux applications distinctes correspondant à la protection souple (type gilet pare-balles, sac de confinement, protection du combattant...) et la protection dure (blindage de véhicule terrestre, protection supplémentaire de gilets...) utilisée en *backing*.

Les protections de blindage existantes sur les véhicules de transport terrestre sur structure aluminium sont renforcées par des matériaux fibreux à haute performance mécanique pour des sollicitations de type EEI à éclats. Les fibres utilisées dans la fabrication des blindages sont principalement la fibre de verre, les aramides ou encore les fibres polyéthylène. Cependant, de nouvelles fibres (*Vectran* par exemple) apparaissent sur le marché. Cela conduit la DGA à mener différentes actions pour proposer des améliorations mécaniques des tissus utilisés dans les protections.

Les structures bidimensionnelles, particulièrement les stratifiés, font office de *leader* sur le marché des composites tissés. Grâce à un taux élevé de fibres, ces matériaux ont une grande résistance à la rupture et une grande rigidité. Lors d'un impact, la structure du matériau composite est sollicitée transversalement aux plis qui la constituent. Lorsque le composite est chargé dans une autre direction que le renfort fibreux, une rupture interlaminaire (délaminage) se produit, rendant le composite moins efficace. Le délaminage peut se produire au niveau des interfaces entre les fibres et la matrice mais aussi entre les couches anisotropes du stratifié. Afin d'améliorer les performances de protection, l'utilisation de renfort textile 3D de type *interlock* peut apporter des solutions innovantes et permettre d'alléger la solution globale de blindage. De même, il est possible d'imaginer des fibres qui seraient greffées transversalement avec des nano éléments capables de se coupler avec la matrice du composite et d'apporter le renfort 3D.

Par rapport aux fibres classiques de verre, de carbone ou de kevlar, des fibres qui seraient élaborées à partir de nanotubes de carbone (NTC) peuvent constituer une rupture technologique. Les propriétés obtenues à partir de fibres élaborées en utilisant des NTC à simple ou à multiples parois seront vraisemblablement différentes. Il faut toutefois en premier lieu savoir de manière reproductible les produire, les filer, puis les tisser avant de réaliser des pièces.

## Protection du combattant

Dans la protection pour le combattant, pour des contraintes de masse (densité du matériau) et d'encombrement, il n'est pas possible de réaliser des protections de forte épaisseur ni avec des matériaux de forte densité. L'objectif principal actuel est l'allègement des protections individuelles (10 % du poids d'ici cinq ans à performances équivalentes, 20 % sous dix ans). Il est nécessaire de disposer de structures souples qui pourront s'adapter à la stature du combattant et qui permettront la liberté de mouvements. La prise en compte de menaces multiples (ex. : souffle, éclats), l'augmentation du nombre d'impacts que la protection est

capable de supporter, l'amélioration de l'ergonomie, la diminution du volume, la prise en compte des effets arrière après impact (réponse couplée du corps humain et de la protection par rapport au spectre de menaces – anti-trauma) sont également des paramètres à considérer. La protection du combattant face à des éclats émis par des munitions « *air burst* » (multi impact) est une contrainte à prendre en compte dans la définition des protections.

L'amélioration de la protection de la tête (casques) reste un objectif important et doit être vue de manière globale : protection balistique et anti-trauma. La protection contre une menace supérieure au 9 mm (limite actuelle) reste une priorité. Trouver des matériaux de type rhéo épaississants comme par exemple constitués de particules submicrométriques de silice colloïdale noyées dans un polymère renforcé par un tissu *Kevlar*, de manière à avoir « un blindage liquide » qui durcit sous l'effet d'un impact, est une solution à investiguer, qui semble s'être développée aux États-Unis et en Corée du Sud, et sur laquelle une veille est menée.

Pour la protection des systèmes contre les chocs de plus faible énergie comme dans le cas d'un casque de pilote, le concept de protection sera basé sur le développement de matériaux amortissant, en modifiant la nature des mousses ou des résines qui constituent les différents ensembles associés pour répartir et dissiper l'énergie de l'impact. Le développement de mousses et de résines chargées par des élastomères, ou par des terpolymères nanostructurés (Nanostrength) permet d'améliorer l'efficacité des protections.

## Protection des infrastructures

L'objectif des actions sur le comportement des infrastructures est de se doter d'une capacité de prédiction réaliste et fiable pour les dimensionner ou bien simuler les scénarios de frappe et évaluer le potentiel de performance des armements.

Bien que largement déployé dans le monde, le béton reste encore aujourd'hui un matériau complexe avec des mécanismes de comportement multiples et très différents suivant la nature et l'intensité du chargement auquel il est soumis : endommagement, plasticité, dépendance à la pression, effet des vitesses de déformations, fissuration... Afin de diminuer les coûts des expérimentations menées sur des structures à échelle 1, il est nécessaire de développer des modèles de comportement numériques macroscopiques capables de reproduire l'ensemble des phénomènes mécaniques pilotant la réponse du béton sous chargements extrêmes (pression de quelques centaines de MPa, vitesses de déformation  $> 1 \text{ m.s}^{-1}$ ). Des efforts particuliers portent sur la caractérisation des bétons et sur leur comportement face à des agressions dynamiques énergétiques (impact de missile...).

Les travaux déjà engagés sur les bétons standards ont ainsi permis d'élaborer une compréhension nouvelle et cohérente du comportement en compression triaxiale et en traction dynamique des bétons, mettant en lumière l'ensemble des

paramètres jouant sur la réponse des matériaux et identifiant leur influence (teneur en eau, rapport eau/ciment, rapport granulats/ciment, nature et taille des granulats...). Cela ouvre la voie vers une capacité de modélisation micromécanique, donnant ainsi une réelle capacité de modélisation prédictive et non purement phénoménologique du comportement des bétons sous chargement intense (explosion, pénétration). Comme pour les autres matériaux, c'est la microstructure de matériau qui va contrôler les propriétés et le comportement.

À l'avenir, ce travail sera étendu aux Bétons à ultra-hautes performances (BUHP). En effet, ce type de matériaux fabriqués depuis le début des années 2000 représente aujourd'hui une menace certaine et un véritable défi pour les armements conventionnels. Bien que prometteurs pour de nombreuses applications dans le domaine de la protection des infrastructures face aux agressions de type militaires ou malveillantes, il reste encore beaucoup à faire pour pouvoir comprendre les mécanismes qui pilotent leurs comportements (influence des paramètres matériaux ; influence des fibres, de leurs natures, de leur répartition dans la matrice...).

À une échelle plus globale, pour étudier la tenue et la stabilité complète d'une infrastructure en béton armé, il est également nécessaire de connaître, en plus du comportement dynamique propre aux matériaux utilisés (béton standard, béton fibré ultra-hautes performances, briques, parpaings...), le comportement des assemblages et liaisons qui composent cette structure. Des premiers travaux numériques ont permis de modéliser l'effet d'une explosion sur un élément porteur d'une structure (pilier), de la perte de résistance de cet élément porteur après une explosion et de l'effondrement d'un assemblage structural consécutif à la rupture d'un ou plusieurs éléments porteurs (phénomène de « *progressive collapse* »).

Les activités expérimentales et numériques menées à moyen terme par la DGA s'orientent selon les axes suivants :

- caractérisation et modélisation en dynamique des matériaux d'ouvrage que l'on peut trouver dans des infrastructures militaires ou des infrastructures de zones urbaines (bétons standards, bétons fibrés à ultra-hautes performances, murs maçonnés...),

- caractérisation et modélisation en dynamique des liaisons acier-béton et des sous-ensembles constituant une structure en béton armé (poutre-poteau, poutre-poutre, poteau-plancher...),

- modélisation du phénomène de « *progressive collapse* » (effondrement global de la structure) suite à la perte d'un ou de plusieurs éléments porteurs.

Des essais de tirs balistiques ou d'explosions sur structures en béton armé réalisés à échelle réduite permettent de valider les outils numériques de simulation mis en œuvre pour garantir la performance des systèmes d'armement ou des

moyens de protection. Ces essais couplés à des approches mésoscopiques numériques (à l'échelle du grain et du mortier) permettent de découpler et d'analyser les différents phénomènes pilotant le comportement du matériau béton (écaillage, compaction, comportement en statique et dynamique...).

## Essais

La méthode classique pour identifier les performances d'un matériau et d'une solution de protection reste le test balistique. Cette approche est relativement économique pour chaque matériau testé mais s'avère très coûteuse sur le long terme. Elle n'apporte aucun enseignement pour ce qui concerne les micro-mécanismes caractérisant la réponse des matériaux et gouvernant *in fine* sa résistance à la pénétration ce qui peut être pénalisant pour orienter le choix de matériaux prometteurs. Par ailleurs, l'exploitation des essais est handicapée par la complexité et la multiplicité des mécanismes mis en jeu.

Une approche alternative consiste à caractériser la réponse du matériau à l'aide d'instruments de laboratoire : expériences de détonique, essais d'impacts de plaques, essais aux barres d'Hopkinson en traction et compression, expérience de fragmentation par impact sur la tranche, essais à la tour de chute et d'associer à ces expérimentations de la simulation et de la modélisation. Les essais, réalisés dans les centres universitaires, viseront à évaluer les performances des pénétrateurs et le comportement mécanique sur des cibles. Un soutien est apporté à des moyens spécifiques comme GEPI (Générateur électrique de pression intense), Cyclope, Giga (presse de compression triaxiale pouvant atteindre jusqu'à 1 GPa de pression de confinement).

Au niveau des lanceurs, des contacts sont menés avec des sociétés spécialisées en vue de développer des moyens d'essais pouvant atteindre  $10\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (simulation d'impact sur des satellites en orbite, compréhension et détermination des lois de comportement des matériaux). Pour l'amélioration de ces lanceurs, dans le domaine des matériaux une attention particulière est apportée aux méthodes de chromage dur des tubes par des dépôts PVD ou CVD mais également sur les technologies de dépôt plasma qui permettent à partir de poudres nano-structurées de déposer des revêtements avec d'excellentes propriétés, et compatibles des évolutions imposées par la réglementation sur l'environnement.

## Simulation numérique – Modélisation

La tenue structurale des systèmes et infrastructures de défense repose sur la maîtrise et la connaissance de plusieurs aspects : modélisation des structures et des différentes technologies d'assemblages, connaissance des sollicitations, acquisition des propriétés physiques et mécaniques des matériaux en fonction de la vitesse de déformation, de la pression, de la température et du comportement des matériaux.

La capacité à modéliser et simuler le comportement des matériaux et des structures permet de réduire les coûts de développement et de qualification en limitant le nombre d'essais qui servent alors à vérifier la précision des calculs de prévision et leur recalage éventuel. Un juste équilibre est à trouver entre le nombre d'essais à réaliser comme données d'entrée aux modèles et la précision souhaitée pour les simulations dans le périmètre déterminé. La simulation permet également de comprendre des phénomènes particuliers et d'anticiper des problèmes potentiels. Elle ne saurait toutefois être une fin en soi, ni être suffisante pour décider de la qualification d'un matériel ou d'un système, les modèles de comportement étant de simples représentations de la réalité.

La conception d'une structure résistante exige la connaissance précise des sollicitations auxquelles elle est soumise : celle-ci résulte typiquement d'une modélisation des chocs solide-solide ou encore des ondes de choc suite à une explosion. Dans les modèles développés, différentes lois d'endommagement, propagation de fissures, perforation... sont intégrées. Le domaine scientifique s'intéresse à la modélisation de l'impact, la simulation des effets dynamiques au cœur de la matière (éclats, fragmentation) et leur compréhension. Par exemple, les codes de simulations numériques intégreront les combinaisons céramique/métal susceptibles d'offrir un comportement balistique meilleur que celui d'une céramique seule.

Pour aborder efficacement les problèmes dynamiques, des codes explicites (Autodyn, LS-Dyna...) sont utilisés mais il faut également maîtriser des codes plus ouverts permettant à la fois des calculs explicites et implicites et permettant l'introduction de lois de comportement utilisateur spécifiques notamment pour les composites (Ansys, Abaqus). Le développement d'approches numériques avancées est nécessaire pour mieux décrire le comportement de structures multi-matériaux et les technologies de liaisons et d'assemblages structurels (soudage, collage...). Pour traiter des problèmes pour lesquels un code eulérien (régime hydrodynamique) est inadapté, un code à caractère explicite (*Radioss*) est nécessaire. Ce type de code est employé dans les cas de la protection du combattant et des blindages. Pour des besoins spécifiques, la DGA soutient le code eulérien *Ouranos* développé avec le CEA. Il permet de rendre compte de façon réaliste de la cinétique d'explosion des matériaux énergétiques et de traiter des problèmes dynamiques rapides des matériaux et structures.

L'assemblage de ces différentes briques permet de déterminer des modèles de comportement aux différentes échelles de la matière (micro – méso – macro) et le bon dimensionnement des structures par le calcul. Les avancées scientifiques à venir permettront la prévision des propriétés macroscopiques à partir de la connaissance des propriétés microscopiques des matériaux et de leur mise en œuvre impliquant des modélisations pertinentes à plusieurs échelles : micronique, mésoscopique et macroscopique. Ceci sera réalisé au prix d'intégration de modèles homogénéisés en dynamique ou non suivant la nécessité de considérer les termes cinétiques dans le processus d'homogénéisation.

## **Partenariat**

Les travaux supportés par la DGA sont réalisés avec les laboratoires des centres de recherche universitaires orientés vers la caractérisation mécanique en statique et en dynamique, avec les équipes spécialisées dans la modélisation du comportement, le CEA Gramat pour les travaux sous sollicitations dynamiques, l'Onera avec sa tour de crash. L'Institut franco-allemand de Saint-Louis (ISL) constitue également un acteur privilégié dans ce domaine d'activité. Ces travaux sont également menés en étroite coopération avec les industriels travaillant sur la conception et sur l'intégration des protections dans les matériels (Nexter, MBDA, Sagem, Panhard, PGD, Renault Truck Defense, RTD...), MSA Gallet pour les casques, avec des fournisseurs de matières premières de céramiques, de fibres et des équipementiers. Les activités de recherches et de développement sont également réalisées dans les pôles de compétitivités nationaux comme par exemple le Pôle européen de la Céramique, le pôle Uptex...

La DGA réalise également ses recherches en coopération internationale et, à ce titre, s'implique dans des forums internationaux sur les matériaux avec d'autres pays comme les États-Unis, la Grande-Bretagne, l'Allemagne et Israël. Des actions européennes sur l'intégrité structurale et la survivabilité pour améliorer la tolérance aux dommages (tenue aux impacts), en associant le besoin en allègement des structures, sont supportées depuis plusieurs années.

# Les blindages futurs

Éric Petitpas, Daniel Vallée, Benoît Bettencourt

| Nexter-Systems.

## Introduction

Le rôle d'un blindage est de protéger un espace contre les agressions externes. Cet espace peut être une construction, un véhicule, un aéronef, un navire, ou encore un combattant. Le blindage peut revêtir différentes formes selon le volume à protéger, le type de menace ou encore le coût autorisé pour protéger l'espace.

Les menaces peuvent revêtir de très nombreuses formes ; on peut les classer en 8 catégories :

- les projectiles cinétiques de petit calibre jusqu'aux flèches de gros calibre,
- les charges creuses et les charges formées des obus, roquettes et missiles,
- les charges thermobarriques des obus, roquettes et missiles,
- les charges à fragment des obus, roquettes et missiles,
- les mines à effet de souffle ou à charge formée,
- les engins explosifs improvisés (*IED*) à effets de fragments,
- les *IED* à charges formées,
- les *IED* à effet de souffle.

Les effets de ces 8 catégories de menaces peuvent être répartis en 2 grandes familles.

- La famille des menaces à effet local : les projectiles cinétiques, les *IED* à fragments, les charges creuses et les charges à fragments des obus, roquettes et missiles ; leur action sur le blindage est limitée à la surface réduite d'impact.

- La famille des menaces à effet global : les mines et les *IED* à effet de souffle, les charges thermobarriques ; ces menaces agissent par effet de souffle provoqué par la détonation d'explosifs à une distance limitée du volume à protéger ; la

surface de blindage exposée à l'effet du blast est importante de l'ordre de 1 à plusieurs mètres carrés.

Certaines menaces agissent localement et globalement comme les *IED* et les mines à charges formées et les *IED* à effets de fragments.

Les technologies de protections contre ces 2 familles de menace sont très différentes.

Pour la famille des menaces à effet local on recherchera des technologies permettant de perturber le projectile pour répartir son énergie sur une surface la plus grande possible pour l'arrêter.

Pour la famille des menaces à effet global on cherchera à réduire ses effets sur le volume par renforcement de la structure mécanique et l'utilisation de boucliers de protection.

### **Pour la famille des menaces à effet global**

On cherchera à minimiser l'impulsion transmise par des formes de structure favorisant l'effet défecteur du souffle et à la transmettre globalement à l'ensemble du volume à protéger en évitant les effets locaux.

Le travail de conception va porter en grande partie sur l'architecture mécanique de l'ensemble à protéger. Dans le cas des véhicules blindés, les architectes mécaniques joueront sur la forme externe du véhicule pour minimiser l'emprise du souffle et ainsi réduire l'impulsion transmise. Cela concernera essentiellement le plancher contre les mines, les passages de roues ou de chenille, la pointe avant et les faces latérales contre des *IED* à effet de souffle. L'architecture de la caisse sera également travaillée pour maximiser sa rigidité contre l'effet de souffle et sa résistance à la déchirure. Des protections anti-blast rapportée sur la structure joueront un rôle complémentaire de bouclier pour protéger les zones sensibles en absorbant une partie de l'énergie du blast et en reportant l'impulsion résiduelle sur les zones rigides de la caisse.

Ainsi la protection des futurs véhicules blindés contre la famille des menaces à effet de blast se fera par la combinaison de 4 paramètres de conception :

- La maîtrise des phénomènes d'interaction entre l'effet blast et les structures ;
- Les formes externes optimisées des structures porteuses (caisse de véhicule par exemple) pour limiter la transmission d'impulsion des menaces à effet de souffle ;
- L'architecture mécanique de la caisse maximisant sa rigidité et sa résistance aux pressions extrêmes ;

- La conception de protections rapportées permettant de protéger les zones sensibles par absorption d'énergie et la transmission de l'énergie résiduelle dans les zones rigides de la caisse.

Dans le futur, la simulation jouera un rôle primordial dans la maîtrise de l'amélioration de la protection contre les menaces à effet de blast. Elle permet de comprendre les phénomènes d'interaction entre le souffle et les structures, d'en optimiser les formes pour limiter la transmission de l'impulsion, de maximiser sa rigidité et sa résistance et de concevoir des boucliers de protection et leurs liaisons avec la structure.

### **Perspectives sur les matériaux contre les menaces à effet global**

Une autre voie d'avenir concerne la recherche sur les solutions matériaux de protection.

Les solutions matériaux à très fort pouvoir d'absorption d'énergie constituent un premier axe de recherche. L'objectif est de concevoir des systèmes de protection permettant d'améliorer le fonctionnement des boucliers de protection. L'idée est de construire des matériaux spécifiques par combinaison de matériaux disponibles permettant de maximiser l'absorption d'énergie et la répartition de l'énergie résiduelle sur des surfaces importantes. L'emploi judicieux de matériaux poreux ou de matériaux multiphases est sans aucun doute une solution d'avenir à explorer. Là encore la simulation jouera un rôle important dans la conception de ces matériaux complexes.

Un deuxième axe de recherche concerne les solutions matériaux permettant d'absorber les ondes de choc : l'utilisation de matériaux diphasiques dans une solution de protection pourrait permettre une atténuation des ondes de choc produites par une explosion de mine ou *IED*. Les matériaux poreux ou des matériaux à structure équivalente sont des solutions potentiellement intéressantes pour atténuer les ondes de choc par combinaison de rupture d'impédance et de dissipation d'énergie par vibration, déformation ou collapse d'une des phases. Ces solutions sont à l'étude dans différents secteurs pour atténuer les effets des explosions sur les plateformes.

### **Pour la famille des menaces à effet local**

On recherchera des technologies permettant de perturber ou d'endommager le projectile pour répartir son énergie sur une surface la plus grande possible.

La très grande majorité des blindages sont des blindages passifs. Les blindages réactifs ont été développés et sont employés contre des menaces spécifiques (charges creuses).

Les principes de fonctionnement des solutions de protections peuvent être classés en 5 catégories.

- **Le ricochet du projectile** : sous certaines conditions d'incidence du projectile et de dureté relative du projectile par rapport à la surface impactée, le projectile peut ricocher et changer de trajectoire ; ce principe très efficace de protection peut être appliqué par inclinaison des surfaces des plaques de protection ; son application est limitée aux surfaces très inclinées des structures, tel que la pointe avant des véhicules blindés.

- **La déflexion du projectile** : ce phénomène a été observé sur les projectiles élancés de type flèche lors de la perforation de matériaux de blindage particuliers inclinés par rapport à la trajectoire du projectile ; lors de la pénétration du projectile dans l'épaisseur du matériau de protection, une rotation du projectile est observée dans le sens externe tendant à le faire sortir.

- **La perturbation du projectile** : ce mécanisme est obtenu sur les projectiles très élancés, jet de charge creuse principalement (le mécanisme consiste à mettre en mouvement une plaque de matériau à blindage par une réaction dynamique de la plaque avec une couche sous-jacente soit par réaction avec un matériau passif type élastomère ou un matériau réactif type explosif) ; le premier mécanisme concerne les blindages PAC (Plaque accélérée par choc), le second les blindages réactifs ; ces blindages sont actuellement utilisés sur divers véhicules essentiellement pour la protection contre les charges creuses de roquette, missiles et obus.

- **La rupture du projectile** : la rupture du projectile par impact sur une surface très dure est un mécanisme très efficace pour disperser l'énergie cinétique du projectile sur une surface plus grande ; ce mécanisme est utilisé sur les projectiles cinétiques de type flèche, mais surtout sur les projectiles classiques moins élancés du *Stanag 4569* (normes Otan concernant les niveaux de protection pour les occupants de véhicules logistiques et de blindés légers) ; la solution idéale recherchée est la fragmentation du projectile sur le matériau de blindage sans le perforer ; cet effet, appelé « effet Dwell », est observé sur les blindages à base de céramiques très dures (le projectile fragmenté s'étale en surface de la céramique sans la perforer).

- **L'érosion projectile** : lorsque la dureté du blindage ne permet pas de casser le projectile, on cherchera à arrêter celui-ci par érosion du projectile lors de la perforation du matériau de blindage ; l'érosion intervient soit par déformation visco-plastique, soit par mécanisme d'usure ; le premier mécanisme interviendra avec les blindages métalliques, le second avec les blindages céramiques.

Ces mécanismes d'endommagement des projectiles sont obtenus en général par combinaison de plusieurs matériaux dont les effets complémentaires permettent d'optimiser le mécanisme d'endommagement recherché. Une combinaison classique consiste à superposer une couche de matériau très dure (comme une céramique) et une couche de matériau ductile (comme un stratifié composite)

pour permettre à la céramique de fragmenter le projectile tout en bloquant les fragments par le composite stratifié.

La conception d'un blindage doit tenir compte de différentes menaces et de la spécification de protection (angles d'incidences, multi-impact...). Les mécanismes d'endommagement du projectile les plus efficaces dépendent de la nature des menaces et des conditions d'arrivée sur le blindage. Par exemple la déflexion ou le ricochet d'un projectile élançé pourra être envisagée pour protéger une zone dont la surface de protection est très inclinée par rapport à la trajectoire de la menace, la fragmentation du projectile sera recherchée pour les surfaces normales aux trajectoires de projectiles très durs ; l'érosion du projectile sera plus efficace vis-à-vis des projectiles ramassés de type *IED* ou éclats d'obus.

Depuis le début des années 2000, la multiplication des menaces (*IED* à éclats et à charges formées en plus des projectiles classiques) et des conditions d'attaque des véhicules (tous les angles d'attaques doivent être considérés) rendent la conception des blindages plus complexes.

Ainsi la conception d'un blindage a pour objectif de combiner plusieurs mécanismes d'endommagement des projectiles ; cette combinaison sera obtenue par superposition de plusieurs couches de matériau permettant d'optimiser la performance du blindage.

Ainsi, compte tenu du grand nombre de paramètres à considérer, une priorité pour la conception des blindages futurs sera de maîtriser la simulation des différents mécanismes de perturbation et d'endommagement des projectiles et des blindages composites constitués de différentes couches de matériaux. Cet objectif demandera un effort très important de compréhension et de modélisation des mécanismes. Des essais balistiques instrumentés devront être développés pour comprendre les mécanismes mis en jeu. En parallèle des lois de comportement et d'endommagement devront être développées pour rendre compte des mécanismes d'endommagement. La modélisation à l'échelle mésoscopique des matériaux (échelle intermédiaire entre l'échelle microscopique et l'échelle macroscopique) sera certainement un axe d'avenir. Les essais dynamiques sur les matériaux permettront d'identifier les paramètres matériaux des modèles développés.

Les modélisations développées orienteront les choix de combinaison de matériaux des blindages composites afin d'assurer un effet optimal sur les projectiles. À terme la modélisation permettra d'approcher le dimensionnement des blindages afin d'orienter les choix des solutions de blindage.

## **Perspectives sur les matériaux contre les menaces à effet local**

Parallèlement aux efforts sur la modélisation, la mise au point de matériaux aux propriétés extrêmes sera poursuivie, permettant d'enrichir la conception des

blindages composites multimatériaux. Plusieurs voies sont poursuivies, certaines pouvant déboucher à moyen terme, d'autres sur du plus long terme.

### **À moyen terme**

1- Recherche de matériaux très durs par la voie de nouvelles céramiques ou de céramiques à grains très fins ; l'utilisation de poudre nanométrique combinée à leur mise en œuvre par procédé de frittage flash devrait permettre d'augmenter la dureté des céramiques classiques.

2- Mise au point de céramiques transparentes : de type spinelle et saphir elles ont été produites à l'échelle du laboratoire ou d'unités expérimentales ; leurs propriétés balistiques ont été évaluées ; ces matériaux présentent des performances semblables aux céramiques classiques de blindage. L'utilisation de ces céramiques pour la conception des parties vitrées améliorera de façon spectaculaire les performances balistiques des vitrages blindés. La difficulté actuelle réside dans la mise au point d'un procédé industriel permettant la fabrication de plaques de grande dimension nécessaires à la réalisation des vitrages blindés à un coût acceptable.

3- Tissus composites présentant une architecture 3D : ces matériaux obtenus par tissage de fibres à haute résistance dans les 3 directions de l'espace présentent également un potentiel dans la conception de protection balistique. Des travaux de mise au point sont en cours dans le cadre d'un consortium université-industrie pour tester différentes architectures de tissus 3D.

4- Fluides rhéo-épaississant : obtenus par suspension de nano particule de matériaux minéraux dans des liquides organiques, ils présentent une capacité de durcissement instantané sous forte charge ; ces matériaux présentent une opportunité dans la conception de protections souples pour le personnel, le terme d'armure liquide est souvent employé pour décrire cette technologie. Leur utilisation dans les gilets de protection pourrait révolutionner l'ergonomie des protections du personnel.

### **À plus long terme**

5- Mise au point de matériaux à gradient de fonction, combinaison de matériaux céramiques et de matériaux métalliques, devrait permettre de renforcer la résistance à la perforation des céramiques et ainsi d'augmenter leur performance balistique. Des travaux de recherche en collaboration entre des équipes françaises et israéliennes sont menés à partir de 2012.

6- Fibres à très forte capacité d'absorption d'énergie : la synthèse de fibres organiques à base de nano-tubes de carbone peut conduire à des fibres à très forte capacité d'absorption d'énergie supérieure à la soie de la toile d'araignée ; ces fibres pourraient se révéler intéressantes dans la réalisation de blindages composites. Des

recherches sont actuellement menées dans un laboratoire français pour développer une chaîne pilote de fabrication de fibres et dans un autre laboratoire pour tisser les fibres obtenues.

7- Enfin les propriétés des verres métalliques sont étudiées dans plusieurs laboratoires universitaires.

### **Systemes de protection active**

Dans les années 1990 à 2005 des recherches ont été lancées dans différents pays sur les concepts de protection active, dont le principe consiste à détecter la menace sur sa trajectoire balistique et à la neutraliser ou l'endommager avant impact à l'aide d'un système pyrotechnique. Ces systèmes ont un éventail d'emploi limité aux menaces de type roquettes et missiles, et sont inefficaces contre des autres menaces. La complexité de mise au point de tels systèmes a entraîné l'abandon des recherches par la majorité des sociétés et gouvernements impliqués dans leur développement. Seul le système *Trophy* de la société israélienne Rafael est en cours d'expérimentation sur les chars *Merkava* de l'armée israélienne.



La *Revue Défense Nationale* est éditée par le Comité d'études de défense nationale  
(association loi de 1901)

Adresse géographique: École militaire, 1 place Joffre, Paris VII

Adresse postale: BP 8607, 75325 Paris cedex 07

Fax: 01 44 42 31 89 - [www.defnat.com](http://www.defnat.com) - [redac@defnat.com](mailto:redac@defnat.com)

Directeur de la publication: Alain Coldefy - Tél.: 01 44 42 31 92

Rédacteur en chef: Jean Dufourcq - Tél.: 01 44 42 31 90

Rédacteur en chef de l'édition anglaise: Mike Storey - Tél.: 01 44 42 49 95

Assistante de direction: Marie-Hélène Mounet - Tél.: 01 44 42 31 92

Secrétaires de rédaction: Pascal Lecardonnel, Marie-Hélène Mounet, Jérôme Dollé

Abonnements: Éliane Lecardonnel - Tél.: 01 44 42 38 23

Administration du site *Internet*: Paul Laporte - Tél.: 01 44 42 31 91

Conseiller de rédaction: Olivier Kempf

Régie publicitaire: BKSM Advertising - Tél.: 01 56 99 71 73

2<sup>e</sup> trimestre 2012 - ISSN: 2105-7508 - CP n° 1014 G 85493 du 9 septembre 2010