



AED/SNC-IHEDN

Quels systèmes, lanceurs et munitions pour une artillerie sol-sol plus performante dans une logique d'économie des moyens à l'horizon 2035-2040

Membres du groupe de travail

BRUNO LASSALLE

Général (2 s), 37° session du CHEAr, Bruno Lassalle est chercheur associé à la Fondation pour la recherche stratégique (FRS) depuis 15 ans. Saint-cyrien de la promotion lieutenant Darthenay, il a servi alternativement dans l'artillerie, au sein des troupes de montagne et dans le domaine de la fonction connaissance et anticipation.

BRUNO CHÂTENET

Ingénieur général de l'armement (2 s), X 72, Ensta, auditeur de la 35° session du CHEAr, Bruno Châtenet préside le jury du prix « AAT - Ingénieur général Chanson ». Il a fait carrière au sein de la DGA dans les centres d'expertise et d'essais et en services de programmes, notamment dans le domaine de l'artillerie, puis a été chargé du développement des compétences techniques de la DGA.

JEAN-BERNARD CURET

Ingénieur École centrale de Paris (1978), auditeur de la 35° session du CHEAr, officier de réserve de la Marine nationale, membre correspondant de l'Académie de l'air et de l'espace. Jean-Bernard Curet a été directeur des études amont et directeur de programmes chez MBDA France puis directeur de la stratégie produit du groupe MBDA. Il est aujourd'hui conseiller du PDG de MBDA France et de l'administrateur-gérant du GIE Eurosam.

JEAN-LOUP GUERRIN

Ingénieur en chef de l'armement (ER), X 76, auditeur de la 35° session du CHEAr, Jean-Loup Guerrin a mené toute sa carrière dans le domaine des armements terrestres au GIAT, puis Giat Industries, puis Nexter, dans les fonctions de direction en R&D, programmes et stratégie. Il s'est particulièrement intéressé aux armes et munitions, notamment d'artillerie.

PATRICK MICHON

Ingénieur télécom, 31° Session du CHEAr, Patrick Michon a commencé sa vie professionnelle à l'APX puis à l'AMX-APX. Toute sa carrière a été consacrée à des équipements optroniques intégrés aux blindés et exportés

dans de nombreux pays en Europe, Asie et Amériques. Depuis sa retraite, il conseille des PME de défense et il assure la chronique des BITD de la revue Défense.

PIERRE-ANDRÉ MOREAU

Ingénieur général de l'armement (2 s), X68, Ensta, 26° session du CHEAr. Pierre-André Moreau a successivement servi au bureau d'études armes et munitions à DGA/GIAT/EFAB, puis à la DGA/DAT en direction de programmes (première munition intelligente), enfin, il a été directeur général de la division systèmes d'armes et munitions de GIAT, puis de Nexter.

Sommaire

Membres du groupe de travail	2
Systèmes d'artillerie à effet canon	9
Introduction	9
Canons à poudre	10
Canons à ergol liquide	15
Canons électriques	16
Obus non guidés	24
Obus guidés à propulsion classique	28
Charges propulsives	30
Conclusion	31
Systèmes de Missiles sol-sol (SMSS)	33
État des lieux	33
Évolution des SMSS	36
Systèmes de munitions téléopérées (MTO) projetables	41
Rappels des caractéristiques des éléments du système	41
Intérêt militaire de l'utilisation de drones en essaim	43
Les munitions rôdeuses dans le monde	44
Avancées sur les essaims de drones dans le monde	47
Points durs restant à lever et perspectives	47
Systèmes exotiques	51
Munition à effet IEM	51
Les charges thermobariques	57
Points de focalisation illustratifs	59
Les problèmes liés aux tourelles	59
Une montée en calibre de l'artillerie sol-sol est-elle pertinente ?	61

La question des obus à statoréacteurs	63
Les munitions de sauvegarde à effet antidrones	71
Étude sur la conception d'un canon électromagnétique mobile	77
Étude d'un système de drone projetable sur sa zone d'action	78
Étude d'un système de missile hypersonique	84
Aspects industriels	87
Capacités industrielles	87
GOCO (<i>Government Owned – Company Operated</i>), une piste à explorer ?	89
Recommandations	91
Conclusion	93

Introduction

Les conflits récents font ressortir le rôle déterminant des feux d'appuis s'appliquant au contact et dans la profondeur opérative, voire stratégique, du champ de bataille. En conséquence de la redoutable efficacité des défenses sol-air qui contrarient l'action des aéronefs, avions et hélicoptères, dans les zones d'engagement, ces feux sont actuellement majoritairement produits par l'artillerie sol-sol dans ses trois composantes obus, roquettes/missiles et munitions téléopérées ou robotisées.

L'équilibre tactique ancien qui préexistait depuis près de quatre-vingts ans garantissant le mouvement des plateformes de combat, chars et hélicoptères au sol et près du sol, et permettant d'emporter rapidement la décision sur le champ de bataille est aujourd'hui remis en cause par les feux de l'artillerie. En effet, les performances de la chaîne artillerie remaniée, tirant parti de la complémentarité de ses trois composantes et bénéficiant d'une acquisition précise des objectifs du fait des progrès de la télédétection aérienne et spatiale, change la donne. La manœuvre élaborée des trajectoires ainsi que la précision comme la puissance des feux sol-sol déjouent les protections des plateformes de combat mobiles, empêchant leur concentration, brisant leur élan, figeant les mouvements.

Dans cette nouvelle forme de conflit caractérisée par la prédominance du feu sur le mouvement, la survie des objectifs qui se dévoilent est de plus en plus précarisée par la réduction des délais de la boucle OODA (observer, orienter, décider, agir). La fulgurance et la puissance des feux d'artillerie gênent fortement les mouvements des unités au sol et près du sol, provoquent une forte attrition et empêchent les belligérants de gagner une bataille décisive conduisant la guerre à s'éterniser.

Ce cadre technico-opérationnel est toutefois mouvant, car il est modelé par la conjonction et l'interaction de trois tendances durables et en développement. Il s'agit, d'une part, de la transparence du champ de bataille concédée par les moyens de télédétection spatiaux et aériens, d'autre part, du développement d'engins et de missiles de plus en plus rapides et précis frappant loin et enfin du brouillage sous toutes ses formes. Dans cette perspective, le groupe de travail

s'est attaché à réfléchir sur l'artillerie qu'il faut envisager pour notre armée à l'horizon 2035-2040.

Ainsi, l'étude présentée ci-après tente de dégager les lignes de force à privilégier pour construire, à l'horizon 2035-2040, une chaîne d'artillerie modernisée et adaptée à la nouvelle donne. Cette chaîne, dotée de lanceurs et de projectiles adaptés, tirera parti des composantes actuellement détenues, en intégrant de nouvelles et en les mixant dans une logique de complémentarité d'hybridation et d'économie des moyens.

Pour cadrer l'étude, les missions suivantes seront considérées pour l'artillerie :

- gagner la bataille de la supériorité des feux (détruire ou neutraliser l'artillerie adverse);
- appuyer les forces dans la zone de contact sur une profondeur de 30 km;
- traiter la profondeur dans une étendue de 300 km, voire plus.

Les différents types de lanceurs et leurs projectiles sont ainsi passés en revue sans esprit d'exhaustivité, mais en prenant en compte les évolutions technologiques dont ils sont susceptibles de bénéficier à moyen terme et les vulnérabilités qui pourraient les atteindre. Dans cet esprit, chaque famille sera étudiée en décrivant les faiblesses qu'elles présentent ou présenteront face aux conditions actuelles de l'engagement terrestre qui exige robustesse et rusticité et face aux systèmes de défense en fort développement. Ces systèmes aujourd'hui fixes et encore partiellement expérimentaux sur certains plans ambitionnent de créer des bulles de manœuvrabilité mettant les unités de manœuvre à l'abri des feux de l'artillerie. Dans un proche avenir, ils vont vraisemblablement connaître des développements en exploitant des moyens de brouillage et de neutralisation basés sur des émetteurs électromagnétiques ou laser de moyenne ou forte puissance que l'électrification progressive du champ de bataille rendra plus facilement utilisables dans le combat terrestre.

Systèmes d'artillerie à effet canon

Introduction

Les systèmes d'artillerie à effet canon sont les plus anciens de tous les systèmes pouvant être envisagés pour disposer d'une artillerie performante. Ils n'en restent pas moins d'actualité, comme l'ont montré les conflits récents et en particulier celui entre la Russie et l'Ukraine.

La notion de système peut être étendue au système de conduite des feux, voire au-delà (observation, météo...), mais, comme on l'a vu dans l'introduction générale, la performance recherchée est axée sur les munitions. Et dans le cas des systèmes d'artillerie à effet canon, la contribution du canon à la performance de la munition est prépondérante, notamment pour la portée et l'effet terminal du projectile. Une exigence primordiale est alors l'interopérabilité entre le canon et les munitions.

Cette exigence provient d'une part de l'emploi sur le terrain, puisqu'un canon doit pouvoir utiliser des munitions d'origines différentes, comme c'est le cas actuellement en Ukraine, ou comme cela a pu être le cas dans d'autres conflits lorsqu'un pays, à court de munitions, a fait appel à des pays alliés pour s'approvisionner en munitions. Cette exigence provient d'autre part de l'export, car c'est une demande forte des pays acheteurs. Par exemple, l'AUF1, certainement le meilleur automoteur d'artillerie de la fin du XXe siècle, a eu un succès mitigé à l'export, uniquement dans des pays hors OTAN. Ceci est certainement dû au fait que son système de charges propulsives, bien que plus performant que les autres, n'était pas interopérable. De même et dans un autre domaine, les Anglais ont beaucoup regretté le choix d'un canon de char avec tube, certes de calibre de 120 mm, mais rayé, au contraire du choix franco-allemand d'un tube lisse généralisé par la suite.

Cette exigence est à prendre en compte, bien entendu dans le cas d'une nouvelle technologie, par exemple pour les canons électriques, mais aussi pour un futur canon à poudre.

Canons à poudre

État des lieux

Description technique

Les différents canons de cette catégorie sont très classiques : leur pièce principale est constituée par le tube qui a pour rôle de lancer le projectile dans la bonne direction et à la bonne vitesse initiale, cette dernière performance étant obtenue également par des caractéristiques du système propulsif et du projectile. Ces derniers sont en général séparés, mais le canon peut aussi utiliser des munitions encartouchées, d'un seul tenant. D'autres pièces du canon, comme la culasse et le lien élastique, contribuent à d'autres performances, comme la cadence. Elles contribuent également à l'exigence d'interopérabilité, avec le dispositif de mise de feu, voire à l'étanchéité lors du tir.

Emploi

Les systèmes d'artillerie utilisant des canons à poudre peuvent parfaitement remplir les deux premières missions visées pour les systèmes futurs :

- gagner la bataille de la supériorité des feux (détruire ou neutraliser l'artillerie adverse) ;
- appuyer les forces amies dans la zone de contact sur une profondeur de 30 km. Pour la troisième (traiter la profondeur dans une étendue de 300 à 500 km), ils ne peuvent qu'y contribuer, en couvrant des portées certes plus importantes que celles d'aujourd'hui, mais nettement inférieures à celle recherchée.

En revanche, ils peuvent assurer des missions de défense antiaérienne, notamment contre des missiles de croisière et des drones, pour protéger les sites fixes et semi-fixes.

Les objectifs situés en zone urbanisée ne peuvent qu'être partiellement traités en raison des angles d'attaque relativement importants par rapport à la verticale, même avec des obus guidés.

Le degré de robotisation — automatisation, au niveau des canons, mais aussi des systèmes de conduite des feux associés, peut être élevé, conduisant

à des temps de préparation très courts avant le départ du premier coup et à des cadences élevées. Combinées avec des durées de trajet des projectiles également très faibles, ces caractéristiques permettent une grande réactivité des interventions dès qu'un besoin en a été formulé. Ainsi, un obus peut arriver sur une cible située à environ 30 km environ deux minutes après réception de l'ordre de tir; c'est certainement le plus réactif de tous les systèmes d'artillerie.

Caractéristiques et performances actuelles

Les canons à poudre d'artillerie sont universellement définis par leur calibre et leur longueur de tube. On ne considérera que le calibre le plus utilisé actuellement, surtout pour atteindre les longues portées qui sont un point commun aux trois missions visées dans ce rapport, à savoir le 155 mm. Ainsi, les « standards » les plus utilisés actuellement sont le 155/52 calibres, par exemple, utilisé par le CAESAR, et le 155/39 calibres, par exemple, utilisé par le M 109 américain. Il faut insister sur le fait que ce choix de dénomination du standard n'est pas bon. En effet, celui du calibre se justifie, car il est essentiel pour la performance terminale des projectiles (emport en explosif notamment). Mais, si la longueur du tube a une influence sur la vitesse initiale et donc la portée des projectiles, le volume de la chambre disponible pour la poudre propulsive est le paramètre prépondérant du canon pour celle-ci. En effet, plus il est grand, plus on peut utiliser une grande quantité de poudre pour donner une plus forte vitesse initiale au projectile. Les standards précités auraient donc été mieux définis par « 155/23 litres » et « 155/9 litres ».

La performance principale d'un canon peut s'exprimer par l'énergie cinétique qu'il peut fournir à un obus classique. Mais celle-ci est rarement utilisée et on lui préférera donc la vitesse initiale qu'il peut fournir à un obus classique. Typiquement, c'est une vitesse de l'ordre de 820 m/s pour les canons de 155/39 calibres et de 945 m/s pour les canons de 155/52 calibres.

Évolutions prévisibles

Performances envisageables

Comme précisé ci-dessus, les caractéristiques principales sont le calibre du tube et le volume de chambre.

Augmentation du calibre

On peut penser à augmenter le calibre, actuellement de 155 mm pour les artilleries de longue portée de l'OTAN, d'une part pour accroître la performance

terminale des projectiles (emport en explosif, volume disponible pour le guidage, modules d'attaque emportés...), d'autre part pour augmenter la portée (l'effort des gaz exercé sur l'obus étant proportionnel au carré du calibre, ou grâce à un statoréacteur qui nécessite beaucoup de volume). On peut aussi envisager d'augmenter le calibre sans augmenter la longueur du tube, tout en obtenant des performances raisonnables en portée ; ceci aurait pour intérêt de faciliter, ou en tout cas de ne pas limiter, les manœuvres du véhicule porteur du canon.

Mais le principal argument qui va à l'encontre de cette solution est l'existence des stocks d'obus de 155 mm et de charges propulsives associées. Or, tous les pays souhaitent pouvoir être en capacité de les utiliser, au moins en partie en fonction de leur durée de vie, dans les futurs canons. C'est pour la même raison que les artilleries russes conservent depuis des décennies le calibre de 152 mm, y compris avec le tout récent matériel 2S35. L'autre argument est le poids des projectiles d'un calibre supérieur. En effet les obus de 155 mm pèsent un peu moins de 50 kg, ce qui leur permet d'être manipulés par un seul homme. Au-delà, toutes les manipulations devraient être automatisées ou au moins aidées, aussi bien pour le tir que pour toutes les opérations de logistique et de réapprovisionnement de la pièce d'artillerie. Ceci conduirait à des baisses de fiabilité, à des délais plus importants et à des coûts supérieurs.

On peut noter qu'aucune étude amont n'a été lancée à ce sujet, ni en France, ni ailleurs à notre connaissance.

Augmentation du volume de chambre

En revanche l'augmentation du volume de chambre est une piste intéressante, dans le but d'augmenter la portée des obus de 155 mm. Comme la chambre a pour fonction principale de contenir le système propulsif, celui-ci est d'une importance cruciale pour en choisir la valeur. Or, tous les systèmes propulsifs actuels modernes sont constitués de charges modulaires. On ne considérera ici que les TCM (*Top Charge Module*) utilisés pour les portées les plus importantes. La chambre de 23 l des canons de 155/52 calibres peut contenir six modules alors que la chambre de 19 l des canons de 155/39 calibres ne peut en contenir que cinq. Il est intéressant de pouvoir réutiliser les mêmes modules, afin de valoriser les stocks existants. Il est ainsi logique d'envisager des chambres pouvant contenir sept voire huit modules. Ce dernier choix correspondrait alors à des volumes de chambre d'environ 29 l. Un point technique important sera le bon allumage de charges propulsives aussi longues, sans création d'ondes de pression rédhibitoires pour les obus.

Or, cette augmentation du volume de chambre doit nécessairement s'accompagner d'une augmentation du volume total de l'âme du tube afin que la combustion de la poudre soit complète, pour des raisons à la fois d'efficacité et de sécurité. Le diamètre étant fixé à 155 mm, il faut donc augmenter la longueur de tube, sans doute aux alentours de 60 calibres, ce qui correspond à une longueur de tube de 9,3 m et pourrait conduire à limiter les manœuvres du véhicule porteur du canon, plus ou moins selon l'architecture du véhicule.

Même si le gain est moins important, on peut aussi augmenter la pression de tir, avec des poudres plus performantes, afin d'augmenter encore plus la vitesse initiale (V_0) des obus et donc leur portée. Mais la seule utilisation d'une charge propulsive à huit modules TCM identiques à ceux existants augmente déjà la pression par rapport aux six modules utilisés dans une chambre de 23 l. Les problèmes d'usure seraient alors encore accrus.

Une estimation de la V_0 accessible avec des obus classiques est donnée au § sur les charges propulsives.

Toutes ces améliorations ont des conséquences au niveau du canon et du porteur.

L'augmentation de la masse du canon serait modérée grâce aux nouvelles technologies, tant sur les matériaux que sur les concepts de culasse, de lien élastique et de berceau. En revanche la principale difficulté porterait sans doute sur l'usure du tube. En effet, celle-ci serait exacerbée sous l'effet d'une durée du coup de feu plus longue (et donc d'échanges thermiques plus importants) et de pressions plus élevées. Il faudra donc soit trouver une solution de protection ou de refroidissement du tube, soit limiter l'emploi de ces canons à poudre au tir de munitions de précision, pouvant donc être tirées en moins grand nombre que les munitions à effet surfacique de saturation.

La deuxième conséquence négative se situe au niveau du porteur, qui devrait supporter une impulsion environ 20 % supérieure à celle d'aujourd'hui. Cela nécessitera la recherche de freins de bouche un peu plus performants que ceux en service et l'emploi de porteurs un peu moins légers, en tout cas pas autant que le CAESAR Mk1.

Maturité

Des canons améliorés avec les caractéristiques citées au chapitre 1 ne posent aucun problème de faisabilité. Seule la protection du tube contre l'usure nécessiterait des études technologiques approfondies. Les autres aspects (concepts de

sous-ensembles, aciers...) devraient également faire l'objet d'études amont, tout en pouvant bénéficier de celles menées sur la partie « canon » du programme de char MGCS (*Main Ground Combat System*).

Coûts

Dans ce chapitre on considérera les coûts du canon seul. Bien entendu, il est important de prendre en compte l'ensemble du système incluant le porteur. Ceci pourra être fait dans un autre cadre, car les différences sont très importantes entre un porteur de type camion et un automoteur lourd fortement protégé avec tourelle (on n'évoque plus les canons tractés comme une solution d'avenir en raison de leur manque de mobilité et leur mise en batterie trop longue). Mais il est intéressant d'avoir des estimations des coûts pour le canon à poudre, qui est un sous-système commun à ces pièces d'artillerie et au plus proche des munitions qui assurent l'efficacité de la mission.

Le coût d'acquisition (études amont, développement et industrialisation) d'un tel canon d'artillerie devrait être de l'ordre de 50 M€.

Le coût unitaire de série devrait être légèrement augmenté, avec un coefficient de l'ordre de 1,2 à 1,3 par rapport au coût d'un canon de 155/52 calibres.

Le coût de maintien en service est essentiellement dépendant de la durée de vie du tube, d'une part parce que c'est une pièce qui a un coût important par rapport au coût du canon et d'autre part parce que c'est la pièce qui s'use le plus, non en fonction du temps, mais en fonction du nombre et du type de coups tirés (selon la charge propulsive), donc du profil d'emploi, notamment en temps de paix. Il est très difficile de donner des estimations, mais ce sujet renforce le besoin d'études sur la protection des tubes.

Programmes mondiaux en cours, en particulier en France

KNDS France mène un PTD (Projet de technologie de défense) dénommé SAPHIR (Système d'artillerie à portée hecto-kilométrique). Ce programme, financé par la DGA et qui porte sur le canon (paramètres liés à la portée), la charge propulsive et l'obus à très grande portée, a débuté fin 2022 et devrait se terminer mi 2027. Il envisage notamment un canon de 155 mm/58 calibres, avec un volume de chambre de 29 l permettant l'utilisation de huit TCM, voire d'une supercharge monobloc.

Un autre PTD financé par la DGA est en cours sur la protection du tube contre l'usure, en visant des solutions de type chromage ou EPVD (*Electromagnetically Enhanced Physical Vapor Deposition*).

Ces deux programmes sont complétés par des travaux menés sur fonds propres : LORAS (*long-range Artillery System*), études plus axées sur d'autres technologies du canon, pas seulement liées à la portée, à la charge propulsive et à l'intégration sur un porteur.

Aux États-Unis, le programme ERCA (*Extended-Range Cannon Artillery*), avec un canon de 155 mm/58 calibres, lancé en 2019, vient d'être abandonné en mars 2024 en raison de l'usure excessive des tubes et sans doute aussi en raison de la priorité donnée au remplacement des canons de 155/39 cal par des canons de 155/52 cal. Mais son canon, le XM 1299, serait utilisé pour le nouveau programme envisagé MDACS (*Multi-Domain Artillery Cannon System*) dans un rôle de défense antiaérienne.

Canons à ergol liquide

Les canons à ergol liquide utilisent une charge liquide à la place de la poudre solide pour propulser le projectile.

Cette technologie appliquée aux canons de tous calibres et emplois (infanterie, moyen calibre, canons de char, artillerie), si elle était viable, présenterait essentiellement un intérêt dans le domaine de l'artillerie.

En effet, les avantages communs à tous les domaines sont nombreux : coût de l'ergol, emport en munitions, vulnérabilité, logistique à long terme... Mais les avantages supplémentaires propres à l'artillerie sont le réglage continu (en vitesse initiale des projectiles et donc de leur portée, sans avoir à changer l'angle de hausse du tube), le MRSI (*Multiple Round Simultaneous Impact*) et la cadence.

Les États-Unis ne s'y sont d'ailleurs pas trompés en ayant investi plusieurs G\$ dans cette technologie, puis en ayant lancé au milieu des années 90 le développement d'un nouveau canon d'artillerie (*Crusader*) basé sur cette technologie.

Il ne faut cependant pas oublier les inconvénients : interopérabilité (il pourrait se passer des dizaines d'années entre la mise en service d'un premier canon utilisant cette technologie et sa généralisation), maintenance plus complexe et logistique à court terme (la logistique ne deviendra un avantage pour un pays que lorsque l'ergol liquide sera utilisé pour de nombreux systèmes, pas seulement en artillerie).

Mais ce ne sont pas ces inconvénients qui ont fait reculer les États-Unis et ont provoqué la réorientation du programme *Crusader* vers l'utilisation de charges modulaires solides. C'est en raison de nombreux problèmes techniques (insta-

bilité de combustion avec ondes de pression très importantes) ayant conduit à des dispersions importantes en V0 et donc en portée, mais aussi à l'explosion d'un canon.

Même si la France avait mené dans les années 80 des essais prometteurs, mais à échelle réduite (30 mm), il est donc préconisé de ne pas rechercher de solution dans cette voie, sauf si une coopération internationale voyait le jour.

Canons électriques

État des lieux

Description technique

Alors que la propulsion d'un projectile dans un canon est habituellement réalisée en recourant à l'énergie chimique de la poudre propulsive, les canons électromagnétiques utilisent l'énergie électrique pour propulser le projectile en phase canon. Deux principes peuvent être utilisés :

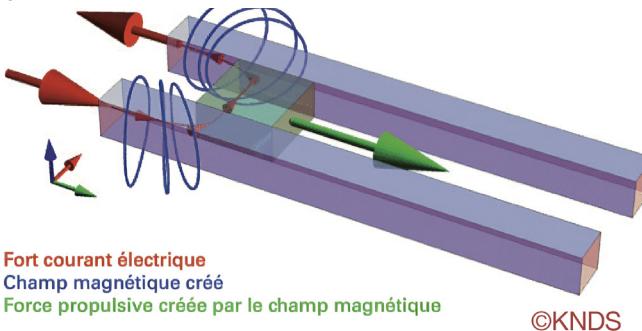
Lanceur à bobines

L'idée est ancienne ; elle remonte en France à Fauchon de Villeplée qui, en 1917, a proposé un tel canon (tir de fléchettes de 50 g à 200 m/s) ; la guerre s'est achevée avant que le démonstrateur soit construit. Le canon est constitué d'une succession de bobines dans lesquelles on fait successivement passer un courant électrique (une impulsion), ce qui attire le projectile vers la bobine située devant lui (qui peut comporter un bobinage récepteur ou pas) par la force induite. L'efficacité est largement augmentée si les bobines situées derrière le projectile induisent une force qui le repousse. Naturellement, chaque bobine est d'abord située devant, puis derrière le projectile : il faut donc inverser le sens du courant, de très haute intensité, en un temps très court et au moment du passage du projectile. Un démonstrateur en plus gros calibre a été réalisé et testé à Bourges vers le début des années 2000. Il n'y a pas de limite théorique à la vitesse du projectile, mais la difficulté est de synchroniser l'alimentation successive des bobines, puis l'inversion du sens du courant, avec le passage du projectile. L'importance de cette difficulté explique l'abandon des recherches sur cette technologie dans tous les pays qui avaient commencé à l'étudier.

Canon à rails

Le principe d'un canon électromagnétique à rails consiste à faire circuler un courant électrique de forte intensité afin de créer un champ magnétique entre deux rails conducteurs. Grâce à la force de Laplace, un projectile, également conducteur, va subir une forte accélération avant d'être éjecté du tube à une vitesse très élevée.

Avec ce principe aussi, il n'y a pas de limite théorique à la vitesse du projectile. Une difficulté est d'assurer le contact électrique glissant entre le projectile et les rails.



Pour les canons électromagnétiques des deux types, il faut délivrer une forte quantité d'énergie électrique en un temps très bref. On retrouve ce même besoin dans d'autres applications, telles que la radiographie éclair (avec des niveaux d'énergie moindres). Les technologies de stockage d'énergie électrique et de restitution à de très hauts niveaux d'intensité pendant des temps très brefs ont été longuement étudiées par l'ISL (institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis), essentiellement pour des besoins de métrologie balistique et plus récemment d'armes hyperfréquences. De ce fait, l'ISL travaille depuis de nombreuses années sur le sujet des lanceurs électriques avec un excellent niveau international. Cependant, pour quantifier le besoin, rappelons qu'un canon d'artillerie à poudre délivre en environ 10 ms au projectile une énergie cinétique de plusieurs dizaines de mégajoules à la bouche, soit une puissance de quelques gigawatts et donc plus qu'un réacteur nucléaire.

Seul le second principe, celui des canons à rails, fait actuellement l'objet de travaux.

Canon électrothermique

Pour mémoire, un troisième procédé, mixte, existe. Avec la sous-famille des canons électromagnétiques, il constitue la famille des canons électriques.

Ce procédé est connu sous le terme de canon électrothermique (ETC). Il s'agit d'utiliser une énergie électrique pour générer un plasma, par vaporisation d'un fil entre deux électrodes. Ce plasma permet d'allumer à son tour une charge propulsive très énergétique, mais impossible à allumer à l'aide d'un TPA (tube porte-amorce) classique. Cet « allumage plasma » peut notamment allumer des charges propulsives plus compactes, voire monobloc, tout en créant une courbe de montée en pression plus favorable et générant des vitesses initiales de projectile plus importantes à pression maximum égale. Un autre intérêt est d'utiliser un système propulsif dont les performances sont bien moins sensibles à la température de celui-ci, et ainsi d'avoir des performances quasiment constantes. Deux démonstrateurs ont été réalisés par Giat industries en calibres 45 mm, puis 120 mm et testés dans les années 2000.

Un très gros avantage, par rapport aux canons électromagnétiques, est que le canon reste conventionnel, avec un système propulsif très proche des systèmes propulsifs classiques. Mais le gain d'énergie cinétique (pas de la vitesse initiale !) du projectile ne dépasse pas les 15 %, ce qui est très faible en regard des problèmes énormes d'interopérabilité et de la relative complexité supplémentaire du canon, même si les quantités d'énergie à stocker sont très inférieures à celles des canons électromagnétiques.

Emploi

Les avantages opérationnels sont les suivants :

- absence de stockage de poudre, induisant une forte diminution de la vulnérabilité des munitions, tant pendant l'emploi en temps de guerre qu'en stockage en temps de paix. Mais cet avantage est à nuancer par la nécessité d'assurer la sécurité des batteries, avec notamment une grande quantité de lithium en temps de paix comme en temps de guerre ;
- vitesse initiale des projectiles très élevée et donc portée très élevée. On notera cependant que plus on cherche à profiter de cet avantage, plus les contraintes associées de masse et de volume sont importantes.

Ces avantages sont également valables pour d'autres applications, le gain en vitesse initiale étant mis à profit de la performance de perforation des munitions flèches pour la cavalerie ou de la diminution de la durée de trajet pour la défense antiaérienne. Mais il existe d'autres avantages propres à l'artillerie :

- réglage continu de la vitesse initiale des projectiles, permettant un ajustement de leur portée sans avoir à changer l'angle de hausse du tube ;
- capacité de MRSI (*Multiple Round Simultaneous Impact*) améliorée grâce à ce même réglage continu de la vitesse initiale ;
- temps de chargement réduit du système propulsif induisant une cadence améliorée, mais seulement pour une salve de trois à cinq coups ; au-delà, il faut recharger des condensateurs ou des inductances qui délivrent ensuite la puissance pulsée pour la salve suivante, et ce temps de recharge nécessite plusieurs minutes.

Évolutions prévisibles

Performances envisageables

Si un canon à poudre a des limitations de performance en termes de vitesse initiale pour des raisons de rendement, quelque part autour de 2000 m/s, il n'y a pas de limite équivalente pour un canon électromagnétique. Le niveau accessible est donc à envisager en regard de l'intégrabilité du lanceur sur une plateforme terrestre (masse et volume des systèmes de stockage d'énergie, de génération de puissance pulsée, et de refroidissement). De plus les démonstrateurs réalisés à ce jour ne portent que sur le lancement d'obus au maximum de quelques kilogrammes et non d'une cinquantaine, comme c'est le cas pour un obus d'artillerie. À l'horizon 2035-2040, il ne semble pas réaliste d'atteindre les performances des systèmes actuels à base de canon à poudre avec la même facilité d'intégration sur plateforme terrestre, en raison des points durs décrits au § suivant.

Les performances visées paraissent constituer une rupture pour l'artillerie :

- portée > 200 km, mais pour des projectiles plus légers que ceux actuels, donc avec un effet terminal moins efficace ;
- vitesse initiale de l'ordre de 3000 m/s, performance qui contribue à la précédente (portée) pour l'artillerie, mais qui n'a d'intérêt en elle-même que pour une application antiaérienne ;
- cadence de tir accessible élevée, mais qui multiplie les contraintes et points durs déjà constatés pour une cadence faible ;
- pas de risque lié au stockage ;
- coût récurrent bas.

Mais les contraintes et points durs semblent limiter actuellement cette technologie au domaine naval, surtout dans une application mer-air.

Maturité

Les points durs restant à lever sont les suivants :

- conception d'un projectile hypervéloce tirable par un canon à rails ;
- fenue à l'accélération du projectile et des composants de guidage-navigation pendant le tir (20 000 à 40 000 g) ;
- tenue thermique du projectile et en particulier des bords d'attaque des systèmes de contrôle ;
- choix et conception du système de conversion d'énergie la plus adéquate pour le lanceur à rails ;
- compatibilité électromagnétique :
 - ▷ avec la plateforme terrestre ou navale. En particulier, le pointage du canon est problématique, car actuellement aucun système de pointage autre que mécanique manuel ne supporte pas l'environnement électromagnétique associé,
 - ▷ avec les composants du système de guidage-pilotage du projectile,
- intégration sur une plateforme terrestre (masse et volume des systèmes de stockage d'énergie, de génération de puissance pulsée, et de refroidissement).

Coûts

Même si les coûts récurrents des munitions seront réduits, car ils seront limités à ceux des obus (qui sont prépondérants dès que les obus sont guidés), les coûts du système de stockage et de conversion d'énergie risquent d'être très élevés. On peut cependant noter que les travaux de l'ISL sur le stockage inductif XRAM (le générateur XRAM charge plusieurs inductances en série et les décharge en parallèle) sont prometteurs et devraient conduire à une solution plus légère, moins volumineuse, plus simple technologiquement et plus économique que les batteries de condensateurs envisagés initialement. Mais cela restera sans doute une solution moins intégrable qu'un canon à poudre.

Programmes mondiaux en cours, en particulier en France

L'Europe : programme PILUM

En Europe, le canon électromagnétique est une priorité. En 2020, dans le cadre du PADR [Action préparatoire sur la recherche en matière de défense], la Commission européenne a confié le programme PILUM à l'ISL alors très en pointe sur le sujet, pour un montant de 1,5 M€. Ses partenaires étaient dans le domaine des systèmes, canons et projectiles Nexter Systems & Munitions, Naval

Group, Diehl-Defence, des matériaux Explomet, de l'aérodynamique des projectiles Von Karman Institute et de la gestion de projets Erdyn. Outre les travaux de recherche sur le lanceur à rails et le projectile, PILUM a examiné l'intégrabilité sur des plateformes terrestres et navales.

Les résultats suivants ont été obtenus :

Le canon électromagnétique

- La durée de vie des rails du lanceur (exposés à des températures élevées et à des frottements à haute vitesse) peut être significativement accrue en utilisant des associations de matériaux combinant une excellente conductivité électrique avec une haute résistance à l'usure sur les surfaces en contact avec le projectile.
- Plusieurs concepts de canons ont été étudiés et l'un d'eux a été retenu pour les travaux futurs. Il s'agit d'un canon de 90 mm qui, certes, propulse un projectile à 2000 m/s, mais sa masse de 3 kg ne permet qu'un emport négligeable d'explosif. L'énergie cinétique à la bouche est donc de 6 MJ, à comparer aux 20 MJ pour le 155/52 cal actuel.
- Des concepts d'alimentation en munitions et de pointage ont été adaptés aux besoins spécifiques du lanceur à rails, en dehors des contraintes CEM.
- Un concept de projectile a été étudié.

Le projectile hypersonique

Un concept préliminaire de projectiles hypersoniques a été élaboré pour les vitesses allant jusqu'à Mach 6. Des tests en soufflerie, des simulations se basant sur la mécanique des fluides numérique, ainsi que des tests en vol libre ont été réalisés afin d'évaluer la performance à Mach 5.

Stockage et conversion de l'énergie

- Le projet PILUM s'est également penché de près sur plusieurs concepts d'alimentation en énergie, y compris l'alimentation capacitive et inductive.
- Une évaluation du cycle de vie réalisée pour le concept d'énergie capacitive a montré que, dans des conditions opérationnelles spécifiques basées sur les scénarios, la densité d'énergie du système à énergie pulsée était d'environ 25 % supérieure aux valeurs nominales indiquées dans les spécifications techniques du fabricant.
- Pour ce qui est des applications du canon à rails, l'ISL propose une solution prometteuse avec son générateur XRAM qui repose sur le stockage inductif de l'énergie dans un volume plus faible que la solution à base de condensateurs. La densité d'énergie stockée par des condensateurs (1 MJ/m³) ou par

stockage inductif (4,5 MJ/m³) reste cependant très en deçà de la poudre à canon (5 MJ/l). La commutation reste un défi technologique qui devrait être surmonté dans la phase de maturation (projet THEMA).

L'Europe : projet THEMA

Plus récemment, cette fois au titre du Fonds européen de défense [FEDEF], la Commission a désigné KNDS France pour coordonner le projet THEMA (*technology for Electromagnetic Artillery*) qui, doté de 15 millions d'euros, vise à accroître la maturité technologique des trois éléments critiques constituant l'EMRG (Electromagnetic Rail Gun) entre 2024 et 2027, avec pour objectif de préparer l'essai, dès 2028, d'un démonstrateur de canon électromagnétique sur un champ de tir, mais en calibre limité à 25 mm.

Les moyens de l'ISL

Les installations de canon électromagnétique à rails de l'ISL sont uniques en Europe. L'Institut dispose de plusieurs démonstrateurs de laboratoire, notamment le canon NGL-60 [*New Generation Launcher*], un lanceur de calibre carré 60x60 mm permettant de tirer des projectiles de l'ordre du kilogramme jusqu'à 3700 m/s et le canon RAFIRA [*rapid-fire Railgun*], un lanceur de calibre 25x25 mm capable de tirer des rafales de 3 à 5 projectiles à des cadences de tir extrêmement élevées (75 coups par seconde) et une vitesse initiale comprise entre 2000 m/s et 3 000 m/s.

Les États-Unis

L'Office of Naval Research (ONR) avait, avec BAE Systems, Raytheon et General Atomics, un projet de canon à rails capable de lancer un projectile hypervéloce de 16 kg à 2000 m/s ou de 10 kg à 2500 m/s. Des tirs ont eu lieu en 2017. Ce projet a été remis en pause en 2021, faute de crédits suffisants, alors que les résultats étaient encourageants.

Le Japon

Le Japon s'est aussi lancé dans l'étude d'une telle arme. Le gouvernement japonais aurait débloqué en 2022 l'équivalent d'environ 50 millions d'euros pour ce projet. Le canon électromagnétique que vient de tester l'ATLA (*Acquisition Technology & Logistics Agency*) en 2023 aurait une puissance d'au moins 5 MJ, ce qui permet d'expédier des projectiles d'un calibre de 40 mm (320 grammes) à la vitesse de 2230 m/s (soit Mach 6,5). La prochaine étape consisterait à porter cette puissance à 20 MJ. L'application est la défense aérienne et la lutte antisurface. La France, l'Allemagne et le Japon ont signé en mai 2024 un accord pour collaborer sur la recherche, le développement, les essais et les évaluations dans ce domaine avec l'ISL.

La Chine

Un canon électrique devrait intégrer l'arsenal des navires de guerre chinois en 2025. Le modèle chinois serait capable d'atteindre une cible située à 200 km en quatre-vingt-dix secondes.

Chaque munition coûterait entre 21000 et 43 000 euros, ce qui est très élevé pour un obus qui, si non guidé, serait très peu précis à cette portée et faible pour un obus guidé, d'où l'interrogation.

La marine chinoise a laissé entendre qu'elle avait réussi à en déployer un à bord de son navire d'assaut amphibie *Haiyang Shan*.

L'ensemble de ces informations est à vérifier tellement les performances annoncées sont très éloignées des niveaux en Europe et aux États-Unis.

La Corée du Sud

La Corée du Sud a indiqué par communiqué de presse en juin 2011 étudier la question. *L'Agency for Defense Development* (ADD) entamait alors ses travaux. L'objectif était de disposer d'un canon électromagnétique à rail (EMRG) de 64 MJ, destiné à équiper la prochaine classe de ce qui était présenté comme des « frégates ». En réalité, il pourrait s'agir de la deuxième série de destroyers KDX-III, qui doivent entrer en service dans les années 2020. Au-delà, il n'est pas interdit de penser que les travaux sud-coréens visent également à renforcer les capacités antibalistiques au regard de la Corée du Nord. Le statut précis du programme reste cependant difficile à évaluer.

La Turquie

Le système de canon électromagnétique, entièrement développé avec des moyens turcs, et qui a été nommé SAHI-209 Blok2, a été conçu par la société turque « *Yeteknoloji AS* » qui s'est spécialisée dans les armes électromagnétiques à partir de 2008. La nouvelle arme aurait une énergie de 10 MJ et aurait la capacité de tirer, à une vitesse hypersonique, des obus de plus d'un kilogramme, de calibre 35 mm. Des tirs auraient eu lieu en 2019.

La Russie

La Russie développe elle aussi de tels systèmes et annonçait début janvier 2017 avoir réalisé ses premiers tirs. Elle semblait alors avoir atteint une puissance d'un peu moins de 5 MJ. Elle était toujours dans une phase de R&T en 2019.

Conclusion

Certains travaux, très amont, sont donc prometteurs, pour une application possible à partir de 2040. Mais cette première application devrait se situer en

marge du sujet traité dans ce rapport. En effet, la très nette augmentation de vitesse initiale des projectiles peut se traduire aussi par une diminution du temps de trajet. Ce saut en performance est particulièrement intéressant pour la défense antiaérienne au sens large. De plus cette mission peut être réalisée avec des obus de plus faible calibre que ceux utilisés en artillerie. Elle nécessiterait alors des besoins moindres en systèmes de stockage et de délivrance de l'énergie en un temps très court.

Par ailleurs, même si de grands progrès ont été et seront réalisés sur le volume et la masse de ces systèmes de stockage de l'énergie et de génération de puissance pulsée, son intégration sera nettement plus facile sur un navire que sur un véhicule terrestre. On peut donc imaginer, à l'horizon 2040, une application mer-air, mais pas une application sol-sol.

Obus non guidés

État des lieux

Description technique

Les obus non guidés sont très classiques : mis en vitesse dans le canon par une charge propulsive, ils ont une trajectoire balistique déterminée avant tir et sont gyrostabilisés. Ils comportent un corps en acier, une charge militaire, un DSA (Dispositif de Sécurité et d'Amorçage), une ceinture assurant l'étanchéité avec le tube et la mise en rotation, et, dans la plupart des cas, un dispositif permettant d'accroître la portée (*base-bleed*).

Emploi

Ils forment le dernier maillon de la chaîne d'artillerie et à ce titre, contribuent à remplir les deux premières missions visées pour les systèmes futurs :

- gagner la bataille de la supériorité des feux (détruire ou neutraliser l'artillerie adverse) ;
- appuyer les forces dans la zone de contact sur une profondeur de 30 km.

N'étant pas guidés, leur précision n'est pas très bonne et il faut donc tirer au moins une salve de plusieurs coups pour remplir la mission, à partir d'un ou plusieurs canons. Les objectifs sont essentiellement des personnels, des véhicules faiblement blindés (artillerie adverse, PC, point sensible...), mais aussi des véhicules fortement blindés. Le coup au but étant peu probable avec un obus

non guidé monochARGE, il faut dans ce cas utiliser un obus à module d'attaque, chaque module préalablement largué pouvant détecter à moyenne distance le point chaud du moteur d'un véhicule et le détruire par l'utilisation d'une CGN (charge génératrice de noyau). Les obus les plus connus utilisant ce principe sont BONUS¹ (franco-suédois) et Smart (allemand). En revanche les obus à sous-munitions (grenades) sont interdits pour les signataires (dont la France) de la Convention sur les armes à sous-munitions de 2008, entrée en vigueur en 2010.

Caractéristiques et performances actuelles

La première performance demandée à un obus d'artillerie, outre l'interopérabilité qui est primordiale, est la portée. Comme expliqué dans le § sur les canons, c'est le calibre 155 mm qui est de loin le plus répandu actuellement. Dans le standard 155/39 calibres, un obus *Base Bleed* a une portée max d'environ 30 km; dans le standard 155/52 calibres, sa portée max est d'environ 40 km.

L'obus sous-calibré *Vulcano* dans sa version non guidée (BER — *Ballistic Extended Range*) a été qualifié par l'Italie et l'Allemagne et a été produit en très faibles quantités. Sa portée est de 50 km, mais la charge d'explosif est fortement réduite à 3,5 kg (à comparer aux 11 kg d'un obus classique, voir ci-après).

L'obus est la composante du système d'artillerie qui concourt le plus à la performance de précision et donc de « probabilité d'atteinte », et c'est donc la deuxième performance qui lui est demandée, même si elle ne figure pas toujours dans un cahier des charges, car les autres composantes du système influent également.

Cette précision a deux composantes : la justesse qui mesure la distance entre le point moyen des impacts d'une salve et le point visé, et la fidélité, caractéristique inverse de la dispersion qui mesure l'écart moyen entre les points d'impact d'une salve et le point moyen de celle-ci. L'écart de justesse (ou biais) et la dispersion sont nettement plus importants dans la direction du tir que dans la direction transverse et on donnera donc des ordres de grandeur pour uniquement la direction du tir. Sans tir de réglage préalable, l'écart probable du biais est de l'ordre de 0,5 à 1 % de la portée et l'écart probable de dispersion est de l'ordre de 0,2 à 0,5 % de la portée.

La troisième performance importante demandée à l'obus est l'effet terminal. Celui-ci dépend bien entendu de la cible et, pour ce qui concerne l'obus, du moment de déclenchement de la charge militaire (avant impact, à l'impact ou après impact), de l'angle de fin de trajectoire, de l'angle entre le point de déclenchement et la cible par rapport au plan de trajectoire, et surtout de la quantité

1 BOfors Nutating Shell

et de la nature de l'explosif et de la définition du corps d'obus qui va générer les fragments. Un obus de 155 mm emporte de 7 kg d'explosif pour un obus M107 (standard 39 calibres) jusqu'à 11 kg pour les obus d'artillerie 52 calibres de toute dernière génération.

Il faut insister sur une grande performance intrinsèque des obus non guidés : leur très faible vulnérabilité. En effet, ils ne comportent aucun dispositif de géolocalisation ou électronique de guidage. Ils sont donc, contrairement aux obus guidés et aux missiles, complètement invulnérables aux effets des systèmes de brouillage C-RAM (*Counter Rockets, Artillery and Mortars*). De plus, leurs corps d'obus en acier les rendent invulnérables aux armes laser et peu vulnérables aux munitions des systèmes C-RAM.

Évolutions prévisibles

Performances envisageables

La portée des obus non guidés peut être augmentée par différents moyens :

- modifier le profil de l'obus, avec une ogive allongée : la portée peut être un peu allongée, au maximum jusqu'à 42 km ;
- optimiser le dispositif de réduction de traînée de culot (Base Bleed), celle-ci représentant 50 % de la traînée totale du projectile ;
- utiliser une propulsion additionnelle par effet tuyère : on peut espérer un gain de 40 % sur la portée, soit 55 km dans le standard 155/52 calibres ; mais cela entraînerait une diminution de la masse d'explosif emportée et une baisse de la performance de précision ;
- utiliser la technologie du statoréacteur : un chapitre spécifique est consacré à l'obus à statoréacteur, qui n'a sans doute de sens que pour un calibre supérieur à 155 mm.

Si la portée est augmentée par rapport au maximum actuel de la portée des obus non guidés, de l'ordre de 40 km, il faut impérativement utiliser un moyen d'amélioration de la précision. La solution la plus simple est l'utilisation de fusées à correction de trajectoire (CCF – *course correction fuze en anglais*).

Deux types de correction sont possibles :

- 1D ; correction dans la direction du tir, direction où la précision est la moins bonne. L'écart probable d'erreur de précision est divisé par un facteur égal à environ 4 ;
-

- 2D : avec également correction dans la direction transverse. Cette solution plus complexe permet de réduire l'écart probable d'erreur de précision à environ 20 m quelle que soit la portée, mais l'obus devient alors sensible au brouillage. Il faut noter qu'avec l'emploi d'une CCF, 1D ou 2D, la portée maximum effective est réduite de 10 % à 15 % par rapport à la portée max techniquement accessible. Ainsi, la portée maximum effective d'un obus à propulsion additionnelle en 155/52 calibres ne serait que d'environ 50 km.

Enfin les obus spécialisés dans l'attaque des véhicules blindés peuvent être améliorés, soit en augmentant leur portée (celle de BONUS MkII est d'environ 30 km), soit en diversifiant leurs effets. C'est ce qui est envisagé avec le BONUS MkIII.

Maturité

Des obus améliorés avec une propulsion additionnelle ont déjà été réalisés au niveau de démonstrateur et leur développement pour une mise en service à l'horizon souhaité ne poserait pas de problème.

Des fusées 2D sont déjà en service dans certains pays, la pionnière étant la fusée PGK américaine. Elle a été utilisée au début du conflit en Ukraine, mais plus par la suite en raison de sa sensibilité au brouillage. En France, la fusée 1D SPACIDO, insensible au brouillage, a été développée et qualifiée, mais non adoptée.

Coûts

Le terme « coût » est à comprendre pour le pays acquéreur, et il s'agit donc d'un prix de vente TTC.

Le coût d'acquisition (études amont, développement et industrialisation) d'un obus à propulsion additionnelle peut être de l'ordre de 50 M€.

Le coût unitaire de série du seul projectile devrait être augmenté d'environ 50 % par rapport à un obus classique, soit une augmentation de 20 % sur le coup complet (obus + fusée + 6 charges propulsives TCM, actuellement d'un peu moins de 10 k€).

Une fusée CCF 1D en remplacement d'une fusée classique augmente le coût complet d'une munition d'environ 25 %.

Le coût d'acquisition d'une fusée CCF 2D peut être de l'ordre de 100 k€.

Une fusée CCF 2D en remplacement d'une fusée classique multiplie par un facteur d'environ 2 le coût complet d'une munition qui deviendrait alors de l'ordre de 15 k€.

Programmes mondiaux en cours, en particulier en France

KNDS Ammo France mène un PTD (Projet de technologie de défense) dénommé Saphir (Système d'artillerie à portée hecto-kilométrique) qui porte entre autres sur l'obus à longue portée.

Ce programme, financé par la DGA, a débuté fin 2022 et devrait se terminer mi 2027. Il porte sur différentes solutions technologiques décrites précédemment, ainsi que sur les obus guidés et les charges propulsives traités dans les deux ☒ suivants.

Par ailleurs, KNDS Ammo France mène un autre PTD, en coopération avec l'ISL et TDM, sur une fusée CCF 2D.

Rheinmetall en Allemagne et les Coréens mènent également diverses études technologiques sur la plupart de ces sous-ensembles.

Obus guidés à propulsion classique

État des lieux

Description technique

La propulsion classique fait référence à la propulsion par poudre dans le canon et à une propulsion sans statoréacteur en vol.

Le guidage des obus est en général assuré par GPS et guidage inertiel, et le pilotage par un système de gouvernes et d'ailettes canard ou d'empennage découplé.

Ces obus permettent d'obtenir une très grande précision et souvent une portée supérieure par rapport aux obus non guidés ; ils sont en revanche très vulnérables aux systèmes de brouillage C-RAM, comme cela a pu être vérifié en Ukraine.

Certes, il existe aussi la technologie de guidage de l'obus par laser semi-actif (Copperhead américain ou équivalent Krasnopol russe en 152 mm et en 155 mm pour l'export), mais l'emploi nécessite d'avoir un observateur — désignateur très proche de la cible, humain ou drone, et la portée est très réduite (de l'ordre de 20 à 25 km). Même s'il permet d'agresser des cibles (faiblement) mobiles, ce type d'obus ne sera donc pas exploré dans la suite de ce chapitre.

Emploi

On a vu que l'écart de justesse (ou biais) et la dispersion des obus non guidés permettent d'assurer les missions, de gagner la bataille de la supériorité des feux (détruire ou neutraliser l'artillerie adverse) et d'appuyer les forces amies dans la zone de contact avec des portées de l'ordre de 40 km, et jusqu'à de l'ordre de 60 km à l'avenir. Il faut toutefois garder en tête que les portées au-delà de la ligne de contact sont de 20 km actuellement et 40 km dans le futur pour tenir compte de la zone de sécurité qui existe déjà aujourd'hui, et qui sera encore étendue demain en raison de la menace drone.

En revanche, ils ne peuvent assurer la mission de traiter des cibles à haute valeur ajoutée dans la profondeur, même à des distances intermédiaires aux portées maximum visées. De même, leur précision permet difficilement leur emploi en environnement urbain, pourtant de plus en plus courant avec l'émergence de conflits asymétriques.

Il est donc nécessaire d'utiliser des obus guidés, qui ont éventuellement de plus une portée augmentée. Leur précision permet en effet de faire coup au but ou d'endommager suffisamment la cible. Le nombre d'obus à tirer est alors inférieur à celui du nombre d'obus classiques pour les autres missions, limitant ainsi les problèmes de logistique. Un autre avantage opérationnel induit est la moindre vulnérabilité des pièces d'artillerie qui, ayant moins d'obus à tirer, restent moins longtemps sur la position de tir.

Caractéristiques et performances actuelles

La référence est l'obus américain Excalibur qui a une portée maximale pouvant aller jusqu'à 50 km et un écart circulaire probable de précision de 5 m. Son emport en explosif (moins de 4,5 kg) est fortement réduit par rapport à celui d'un obus non guidé, mais reste compatible avec l'efficacité contre les cibles grâce à sa précision.

En combinant les mêmes technologies de pilotage — guidage que celles d'Excalibur avec la technologie d'obus sous-calibré, la version GLR (*Guided Long Range*) de l'obus Vulcano a une portée de 70 km, mais la quantité d'explosif est encore fortement réduite à 2,5 kg, ce qui limite beaucoup son efficacité, même si sa précision est bonne.

Mais Excalibur a des limitations en termes :

- d'emploi : le guidage est assuré par la seule constellation GPS avec signaux militaires, et il y a donc une dépendance aux autorités américaines, avec de plus la présence obligatoire d'un opérateur chiffre pour tous les tirs ;
- de performance de vulnérabilité (résistance au brouillage) ;
- de fabrication (composants ITAR).

Évolutions prévisibles

Performances envisageables

Les pistes d'amélioration pour un nouvel obus guidé portent sur l'élimination ou la réduction des limitations de l'obus Excalibur citées ci-dessus, sur l'augmentation de l'emport en explosif (plus de 6 kg visés), voire sur l'amélioration de la portée maximum (55 km en 155/52 calibres).

Maturité

Des travaux ont été menés sur les différentes technologies permettant d'améliorer les performances des obus guidés, et leur développement pour une mise en service à l'horizon souhaité ne poserait pas de problème.

Coûts

On peut espérer maintenir le coût d'un obus guidé amélioré au niveau de celui actuel, soit de l'ordre de 100 k€, ce qui est environ vingt fois celui d'un obus non guidé ;

Programmes en cours dans le monde, en particulier en France

KNDS Ammo France mène des études avancées sur l'obus KATANA® depuis quelques années, d'abord sur autofinancement, et avec l'appui financier de la DGA depuis fin 2022, en vue d'un développement à partir de 2026.

Nammo, en Norvège, mène des études sur un obus de 155 mm à propulsion additionnelle et des études technologiques visant un obus de 155 mm à statoréacteur.

L'ISL a par ailleurs mené des études sur un système de navigation magnéto-inertielle, donc utilisant des magnétomètres, qui permettrait d'éviter les contraintes d'emploi du GPS militarisé et d'approvisionnement des composants soumis à la réglementation américaine ITAR, et de limiter la vulnérabilité au brouillage. En

effet, une UMI (Unité de Mesure Inertielle) à base de gyromètres, accéléromètres et magnétomètres, couplée à un modèle de vol à 6 degrés de liberté, permet de s'affranchir de GNSS et donc du brouillage. Si on associe un GNSS en plus à cette UMI, la connaissance de l'attitude de l'obus permet la mise en œuvre d'un système antibrouillage. Le TRL 5 a été atteint en 2023.

Enfin les Américains mènent des travaux sur une version d'Excalibur qui serait guidée par un SAL (laser semi-actif) pour s'affranchir du brouillage.

Charges propulsives

État des lieux

Les charges propulsives du standard 155/52 calibres, également utilisables dans le standard 155/39 calibres, sont des charges bimodulaires : les charges BCM (*Bottom Charge Module*) sont utilisées avec un ou deux module(s) pour les courtes portées et les charges TCM (*Top Charge Module*) sont utilisées avec trois à six modules pour les longues portées.

Évolutions prévisibles

Les dimensions sont fixées par les standards actuels et le standard futur le plus probable utilisera les mêmes modules, jusqu'à huit TCM pour améliorer la portée.

Une première piste pour que les charges propulsives contribuent elles-mêmes à l'augmentation de portée, au-delà du nombre de modules, est de changer la poudre, mais les gains espérés sont faibles, avec sans doute des limitations d'emploi dans les anciens standards.

Une deuxième, plus prometteuse, est l'emploi d'une supercharge monolithique. Ceci peut être envisagé aussi bien dans la chambre de 23 l du standard de 155/52 calibres que dans une chambre de 29 l d'un futur standard. Le gain de portée par rapport à des charges modulaires serait d'environ 10 à 15 %. On peut également envisager de réduire un peu l'usure du tube avec cette supercharge par rapport à celle induite par le nombre maximum de charges modulaires en conservant la pression d'emploi actuelle. On peut aussi augmenter encore la portée de plus de 10 % en augmentant significativement la pression d'emploi, mais au détriment de l'usure du tube, qui serait fortement augmentée.

Conclusion

Les pistes pour améliorer la portée d'un futur système d'arme à effet canon sont nombreuses. Il paraît intéressant d'en combiner plusieurs, sinon toutes.

Ainsi, en associant un canon à tube de 155 mm, à chambre de 29 l et d'une longueur de 58 à 60 cal, l'utilisation d'une supercharge, un obus à propulsion additionnelle et une fusée CCF 2D, la portée maximum peut atteindre environ 80 km, tout en ayant une précision décamétrique.

Mais, comme on l'a vu dans l'introduction sur ce chapitre portant sur les systèmes d'artillerie à effet canon, une exigence primordiale pour ceux-ci est l'interopérabilité entre le canon et les munitions.

Cela nécessite donc de déterminer le futur standard de l'artillerie à effet canon avec nos principaux alliés. Mais pour peser sur les choix qui seront faits collectivement, il faut auparavant mener des études amont en France, non seulement des études théoriques, mais également des études expérimentales, toujours plus probantes.

Et pour mener ces études, la DGA et l'industrie doivent conserver un savoir-faire au plus haut niveau, voire retrouver certaines compétences qui se sont atrophierées en raison de l'absence de développements sur certains types de produits depuis une trentaine d'années.

Concernant les types de munitions, il faudra rechercher la complémentarité entre les obus non guidés, avec correction de trajectoire pour ceux ayant des portées supérieures à 40 km, qui permettent de traiter des cibles surfaciques, et les obus guidés qui permettent de traiter des cibles ponctuelles d'un cout d'acquisition important ou de haute valeur opérationnelle.

Enfin il est nécessaire de trouver des solutions d'investissement à grande échelle pour faire face à une économie de guerre, de façon concertée entre l'État et les industriels.

— 2 —

Systèmes de missiles sol-sol (SMSS)

État des lieux

Les systèmes de missiles sol-sol (SMSS) mettent en œuvre des munitions guidées et propulsées par des moteurs-fusées anaérobies à propergol solide.

Les munitions sont tirées à partir de tourelles mobiles selon deux axes (azimut et site), elles-mêmes portées, le plus souvent, par des camions tous chemins.

Elles sont guidées vers les coordonnées présumées de la cible et suivent une trajectoire proche de la trajectoire balistique.

Elles sont de deux types :

- des roquettes guidées de masse typique 300 kg en emport multiple dans un panier;
- des missiles sol-sol balistiques Courte Portée (*Short-Range Ballistic Missile -SRBM*) de masse de la classe 1,5 t.

Portée

Les roquettes guidées ont une portée maximale typique de 80 km. Leur portée minimale est de la classe 15 km.

Les SRBM ont une portée maximale typique de 300 km. Leur portée minimale est de 70 km. Nous pouvons noter la complémentarité des systèmes à base de roquettes guidées et de ceux à base de SRBM, puisque les roquettes guidées couvrent le domaine court que les SRBM ne peuvent atteindre.

« Time on Target »

À portée maximale, les roquettes guidées ont un Mach moyen de l'ordre de 2 au long de leur trajectoire et les SRBM, un Mach moyen compris entre 2,6 et 3. À portée maximale, les roquettes guidées atteignent donc leurs objectifs en une centaine de secondes et les SRBM en une poignée de minutes.

Ces temps de vol sont homogènes avec la nature fixe des objectifs des SMSS.

Capacité de pénétration des défenses sol-air adverses

Une **roquette guidée** isolée ne peut pénétrer une défense sol-air (DSA) de type Counter-Rocket Artillery Mortar (C-RAM) en raison, d'une part, de sa détectabilité par les radars d'alerte dans la première partie de sa trajectoire et, d'autre part, de son Mach terminal relativement limité (inférieur à 2) ainsi que de sa faible capacité de manœuvre pour se dérober en phase finale.

En revanche, d'une part, une volée de roquettes guidées peut saturer opérationnellement une défense sol-air qui n'aurait pas une capacité multicibles suffisante et, d'autre part, une force dotée d'un grand nombre de roquettes guidées peut submerger, industriellement, un adversaire dont la défense sol-air reposera sur des munitions antiaériennes relativement plus longues à produire.

Un SRBM isolé ne peut pénétrer les systèmes sol-air en service du meilleur niveau de la classe du SAMP-T Mamba, même si, par rapport à une roquette guidée, sa vitesse terminale et ses capacités de manœuvres terminales sont plus élevées.

Par ailleurs, les SRBM pouvant être tirés en moins grand nombre que les roquettes guidées, ils sont moins sujet aux attaques saturantes.

Néanmoins, le défenseur est confronté à un enjeu industriel. En effet, la complexité du processus de production du missile antiaérien est supérieure à celle du SRBM qu'il doit intercepter par le fait que le premier doit être doté d'un autodirecteur, ce qui n'est pas le cas du second.

Effet terminal

Les roquettes guidées sont, le plus souvent, dotées de charges unitaires d'emploi général de la classe 90 kg, tandis que les SRBM sont dotés de charges unitaires ou à sous-munitions de la classe 200 kg.

Leur guidage est du type inertiel recalé par informations satellitaires (GPS et Galileo, du côté de l'OTAN, GLONASS, du côté de la Russie). Il assure un cercle d'erreur probable (CEP) de quelques mètres.

Le couple précision-charge permet aux roquettes guidées d'être efficaces pour traiter des cibles, telles que les pièces d'artillerie, les postes de commandement ou les moyens logistiques situés à leur portée.

Les SRBM, du fait de leur portée et de leur charge militaire plus importantes, sont adaptés au traitement des cibles de valeur situées dans la profondeur du dispositif adverse.

Mobilité et transportabilité

Les lanceurs de roquettes guidées ou de SRBM utilisent, dans les cas plus courant, des véhicules à roues tous chemins respectant les gabarits routiers, ferroviaires et d'aérotransport.

Ainsi, la mobilité et la transportabilité des SMSS sont excellentes.

Agilité sur zone de lancement

À l'arrivée sur la zone de lancement, les lanceurs sont prêts au tir en une dizaine de minutes.

Après tir, le délai pour quitter la zone ne dépasse pas quelques minutes.

Emploi en zone urbanisée

Les roquettes guidées et les SRBM ne pouvant être tirés avec une hausse-supérieure à 60°, ils sont difficiles d'emploi en zones urbanisées denses avec bâtiments de grande hauteur.

De plus, leurs lanceurs ne sont pas adaptés à la circulation dans des rues étroites.

Effectif pour servir le système

Un lanceur de SMSS est servi par un équipage de trois membres, un chef de pièce, un tireur et un conducteur.

Impact logistique

Du fait de leurs excellentes transportabilité et mobilité, du faible nombre d'opérateurs qu'ils requièrent, de leur excellent rapport entre la masse du lanceur et l'effet létal produit, les SMSS présentent un impact logistique réduit, au regard de leur valeur opérationnelle.

Coûts d'acquisition

Les coûts d'acquisition typiques sont de 10 M€ pour un lanceur, de 150 k€ pour une roquette guidée et de 1,5 M€ pour un SRBM.

Synthèse de l'état des lieux

Les SSMS en service contribuent efficacement à l'accomplissement des missions assignées aux moyens de feu de profondeur :

- gagner la bataille de la supériorité des feux (détruire ou neutraliser l'artillerie adverse);
- appuyer les forces amies dans la zone de contact sur une profondeur de 30 km;
- traiter la profondeur au moyen de frappes de précision jusqu'à 300 km.

Très mobiles, aisément transportables et requérant des effectifs réduits, ils sont souples d'emploi.

Bien que la part consommable de ces systèmes soit constituée de munitions assez onéreuses en raison de leurs fonctions d'autopropulsion, d'autoguidage et de létalité, ils sont incontournables dans l'équipement des forces terrestres.

Néanmoins,

- l'accroissement des performances des Défenses sol-air fait que la capacité de pénétration des roquettes guidées et des SRBM n'est plus assurée ;
- en conséquence, dans une guerre d'attrition telle que la guerre d'Ukraine, un enjeu clé réside dans la capacité industrielle de chaque camp, puisque c'est cette capacité qui définit le camp le plus apte à mettre en ligne un grand nombre de vecteurs sol-sol ou d'intercepteurs antiaériens ;
- la transparence accrue du champ de bataille rend les SMSS vulnérables à la contrebatterie malgré leur agilité avant et après tir, sauf à disposer d'une allonge supérieure à celle de l'adversaire.

Évolution des SMSS

L'évolution majeure recherchée pour les SMSS de nouvelle génération consiste en un accroissement significatif de leur portée afin d'augmenter la liste des objectifs atteignables et de réduire leur vulnérabilité aux moyens de contre-batterie adverses.

Dans la suite du présent document, seules les caractéristiques du SMSS sensibles à cette évolution seront abordées.

Portée

Les munitions de nouvelle génération atteindront une portée maximale de 150 km pour les roquettes guidées et de 500 km pour les SRBM.

Capacité de pénétration des défenses sol-air adverses

Une **roquette guidée** de nouvelle génération isolée ne pourra pénétrer une défense sol-air (DSA) de type C-RAM du meilleur niveau, malgré son Mach terminal supérieur à celui d'une roquette guidée en service (corrélation de la vitesse d'impact avec la portée en cas de trajectoire balistique).

Le coût unitaire des roquettes guidées de nouvelle génération devra être maîtrisé pour permettre la réalisation d'attaques saturantes (voir ci-dessous).

Un **SRBM** de nouvelle génération isolé ne pourra pénétrer une DSA moderne du meilleur niveau (par exemple, le SAMP-T NG), même si ses vitesses terminales sont plus élevées que celles des SRBM en service.

Pas plus que ceux qui sont en service, les SRBM de nouvelle génération ne seront pas adaptées aux attaques saturantes.

L'équilibre industriel entre l'attaque et la défense évoluera en faveur de la défense. En effet, de nouveaux algorithmes de guidage sont en développement pour améliorer les missiles antiaériens en service et leur permettre, sans augmentation de leur coût de série, d'intercepter les SRBM de nouvelle génération.

Effet terminal

Les munitions de nouvelle génération présenteront une précision de **guidage** au moins aussi bonne que les munitions en service avec une résistance accrue au brouillage des signaux satellitaires.

Charge militaire des SRBM de nouvelle génération

Il existe une relation d'échange entre la portée d'un SRBM et la masse de sa charge militaire si on constraint le missile à rester intégrable sur un véhicule similaire aux véhicules en service. Ainsi, le *Precision Strike Missile* (PRSM) de l'*US Army* atteindra les 500 km et restera compatible du véhicule HIMARS en acceptant une réduction de moitié de la masse de la charge militaire (90 kg pour la charge du PRSM contre une classe 200 kg pour les charges de l'ATACMS).

Pour les cibles durcies requérant que la charge présente une capacité de pénétration, une charge militaire de masse réduite restera compatible du maintien de l'effet létal en cas d'impact direct du fait de l'accroissement de la vitesse d'impact corrélative à l'accroissement de portée.

Ainsi, un SRBM de nouvelle génération doté d'une charge de 90 kg sera mieux adapté à l'attaque d'une cible durcie, tel qu'un poste de commandement enterré, que son prédecesseur de 300 km de portée muni d'une charge militaire de la classe 200 kg.

En revanche la réduction de la masse de la charge militaire pénalisera grandement le rayon d'efficacité obtenu en cas d'arrivée au voisinage de la cible.

Charge militaire des roquettes guidées de nouvelle génération

Pour les roquettes guidées, le concepteur ne rencontre pas de contrainte obligeant à une réduction de la masse de la charge militaire pour assurer une portée de la classe 150 km tout en restant intégrable (en emport multiple) sur un véhicule similaire aux véhicules en service.

Ainsi, les roquettes guidées de nouvelle génération resteront dotées de charges militaires de la classe 90 kg.

En cas d'impact direct sur une cible durcie, leur effet létal sera accru par l'accroissement de l'énergie cinétique qui va de pair avec l'accroissement de portée.

Transportabilité et mobilité

Comme on l'a vu ci-dessus, les SMSS de nouvelle génération conserveront, par conception, les caractéristiques de transportabilité et de mobilité des SMSS en service.

Vulnérabilité à la contre-batterie

Les SMSS de nouvelle génération verront leur agilité avant et après tir grandement améliorée :

- à l'arrivée sur la zone de lancement, les lanceurs utiliseront des dispositifs de localisation capables de s'initialiser rapidement, afin de permettre un tir en moins d'une minute ;
- après tir, le délai pour quitter la zone sera également inférieur à la minute.

Néanmoins, l'amélioration des capacités d'observation temps réel sur le champ de bataille rendue possible par l'application de l'intelligence artificielle au traitement d'images augmentera la vulnérabilité du SMSS avant et après tir.

La meilleure protection du SMSS NG résidera dans sa portée accrue lui assurant une capacité à tirer en zone de sécurité au regard de l'allonge des moyens de contre-batterie de l'adversaire.

En outre, l'allonge accrue diminue la vulnérabilité à la contre-batterie en accroissant la zone de recherche de l'adversaire.

Coûts d'acquisition

L'augmentation de portée accroît les exigences imposées aux fonctions de propulsion et de guidage et rend plus sévère l'environnement subi par la fonction létale à l'impact sur la cible.

Pour tous les équipements du missile, elle rend également plus sévères les conditions thermiques et mécaniques du vol.

Ces différentes évolutions conduiront à une augmentation du prix des munitions (300 k€ pour une roquette guidée de portée 150 km et 3 M€ pour un SRBM de portée 500 km).

Le coût des lanceurs sera inchangé.

Synthèse pour les SMSS de nouvelle génération

Les SMSS de nouvelle génération permettront les frappes de précision dans la profondeur opérative, jusqu'à 500 km.

Un beaucoup plus grand nombre d'objectifs de l'adversaire deviendra vulnérable.

Très mobiles, aisément transportables et requérant des effectifs réduits, ils seront très souples d'emploi.

La part consommable de ces systèmes sera plus onéreuse qu'à la génération précédente, toutes les fonctions des missiles étant plus complexes.

Les SMSS de nouvelle génération seront moins vulnérables à la contrebatterie en accroissant la zone de recherche de l'adversaire et en surpassant son allonge si ses moyens de contrebatterie n'ont pas suivi la même évolution.

L'accroissement des performances des Défenses sol-air fera que la capacité de pénétration des roquettes guidées et des SRBM restera fondée sur la saturation, laquelle est plus accessible aux roquettes qu'aux SRBM.

Il est vraisemblable que la confrontation industrielle entre l'attaque et la défense évolue en faveur de la défense, les missiles antiaériens, plus complexes, étant plus susceptibles de bénéficier d'améliorations algorithmiques dont le développement et la validation prennent du temps, mais qui sont transparentes en production.

Mais, de toutes les façons, l'enjeu portant sur la capacité scientifique et industrielle de chaque camp sera toujours aussi critique.

—3—

Systèmes de munitions téléopérées (MTO) projetables

L'idée est de disposer d'un système capable de déployer rapidement un essaim de MTO sur un pôle, leur transport au-dessus de la zone d'intérêt étant assuré par un ou plusieurs obus-cargo d'artillerie ou par un ou plusieurs missiles d'artillerie.

Rappels des caractéristiques des éléments du système

Les MTO concernées

On distingue classiquement les drones de combat équipés de matériel d'observation et/ou d'armements divers et les « munitions rôdeuses », appelées Munitions Téléopérées par la DGA (MTO).

Dans le cas qui nous intéresse, ce sont les MTO qui constituent l'essaim. La MTO est un drone de combat aérien contenant une charge explosive, conçue pour évoluer au-dessus du champ de bataille et détruire une cible en plongeant sur elle lors de missions de recherche d'opportunité, c'est-à-dire à la fois de reconnaissance et de combat.

La détection de la cible peut être assurée par un opérateur qui la voit grâce à la caméra du drone et la guide sur elle, ou être confiée à un système de détection/reconnaissance/identification à bord du drone qui opère de façon autonome, sans recourir à une liaison bidirectionnelle (transmission des images vidéo vers l'opérateur, télécommande par l'opérateur) facilement brouillable.

Les essaims

Qu'est-ce qu'un essaim de MTO ?

Dans le domaine civil, on est désormais habitué aux ballets de drones dans le ciel, comme en 2021 au-dessus du stade de Tokyo (1800 drones) ou avec des attractions avec des groupes de drones à Disneyland, ou au Puy-du-Fou. Le record semble être détenu par la Chine avec, à Shenzhen, le 1er octobre 2024, un essaim de 10197 drones. Mais, en réalité, ce ce ne sont pas des essaims au sens militaire du terme, tous les drones se localisent par GPS et leurs trajectoires sont préprogrammées.

Dans le domaine militaire, actuellement, chaque drone nécessite un opérateur. On doit également distinguer une attaque saturante et une attaque par un essaim.

Une attaque saturante est obtenue par l'envoi sur une zone d'intérêt d'un grand nombre de MTO qui dépasse les capacités de détection et de riposte de l'ennemi. Il n'y a pas de coordination entre les MTO.

Un essaim est constitué d'un ensemble de mobiles, avec un contrôle humain limité, qui coopèrent et optimisent leurs actions grâce à l'IA afin de mener collectivement une mission, quel que soit leur milieu d'évolution. Le déploiement de drones en essaims nécessite une digitalisation accrue de chaque élément constitutif des chaînes de missions (capteurs, communications, etc.), une augmentation des capacités de traitement des données, ainsi que la distribution de ces capacités à travers tous les éléments de l'essaim, à la fois à bord des drones et dans le centre de commandement. Cela permet ensuite de recourir massivement à des fonctionnalités autonomes alimentées par l'intelligence artificielle. L'essaim nécessite des moyens de communication permanents entre tous les drones et occasionnels avec le centre de commandement. Les liaisons doivent être protégées efficacement contre le brouillage.

Le transport de sous-munitions autonomes par une munition d'artillerie

Plusieurs sous-munitions ayant une certaine autonomie ont été développées ou étudiées par le passé.

La sous-munition du programme MLRS Phase 3

Le programme en coopération internationale (États-Unis, Fr, Allemagne et UK), visait à développer une sous-munition planante équipée d'un autodirecteur millimétrique et d'une charge tandem, destinée à l'attaque des blindés par le toit, libérée au-dessus de la zone d'intérêt par une roquette MLRS cargo (3 sous-munitions

par roquette d'une portée alors de 30 km). Le programme — bien qu'un succès technologique — s'arrêta en mai 1992 avec la décision des États-Unis de choisir la sous-munition BAT (*Brilliant Anti-armour Submunition*).

La sous-munition, non motorisée, ne peut pas être qualifiée de drone.

La munition rôdeuse BAT

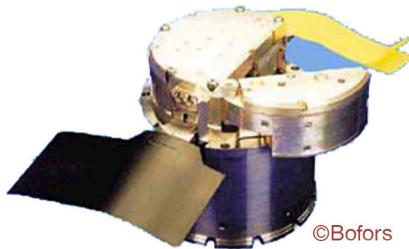
Le *Brilliant Anti-Tank* (BAT) de Northrop Grumman est une sous-munition planante américaine lancée à partir d'un missile air-sol ou d'un missile d'artillerie. Il est capable d'identifier et d'attaquer de manière indépendante des véhicules blindés. Le BAT utilise des capteurs acoustiques pour identifier ses cibles, et un autodirecteur à guidage infrarouge pour détecter la cible et guider la sous-munition.

13 BAT étaient prévus pour être transportés sur le missile MGM-164 ATACMS Block II tiré à partir du système de lance-roquettes multiples M270 et des systèmes associés. Cette version n'est jamais entrée en service.

La sous-munition, non motorisée, ne peut pas être qualifiée de drone.

La sous-munition de l'obus BONUS

L'obus BONUS est un obus de calibre 155 mm antichar produit par Nexter et Bofors, libérant au-dessus de la zone d'intérêt deux sous-munitions à détection de cible et à charge génératrice de noyau. Chaque sous-munition est capable de balayer une zone de 150 mètres de rayon autour de lui au moyen de son capteur, de détecter sa cible et de déclencher l'explosion d'une charge génératrice de noyau.



©Bofors

La sous-munition, non motorisée, ne peut pas être qualifiée de drone.

Intérêt militaire de l'utilisation de drones en essaim

La première utilisation simultanée de plusieurs drones aurait eu lieu en Syrie, le 6 janvier 2018; la base aérienne russe de *Hmeimim* est alors attaquée par un groupe de 13 drones, lancés à une distance de plus de 50 kilomètres et à guidage GPS. Selon le gouvernement russe, l'attaque contre la base aérienne de *Hmeimim* (10 drones) et contre la base de *Tartous* (3 drones) est repoussée.

En l'absence de coordination entre les drones et d'autonomie de ceux-ci, l'affaire doit être qualifiée de tentative d'attaque saturante plutôt que d'attaque par un essaim de drones.

Les munitions rôdeuses dans le monde

De nombreuses munitions rôdeuses ont été développées ou sont en développement dans le monde. Quelques exemples :

France

Colibri



Le drone Colibri a une portée de 5 km, et peut attaquer principalement les véhicules légers. Sa précision est annoncée métrique et son autonomie de 45 minutes. Il est conçu et fabriqué par KNDS et le droniste français Delair pour, selon la presse, un coût unitaire visé inférieur à

20 000 euros. Le modèle de cette toute nouvelle munition rôdeuse est basé sur le drone UX11 de l'entreprise française, qui est déjà utilisé par les forces spéciales françaises depuis 2019, et dont une centaine a été envoyée en Ukraine depuis l'été 2023. Colibri est téléopéré. La forme « aile volante » et sa taille le rendent inadapté à un déploiement par munition d'artillerie.

Larinae

Deux marchés ont été notifiés, à KNDS d'une part, et à MBDA associée au droniste Novadem d'autre part. La version de KNDS, conçue en collaboration avec EOS Technologie et TRAAK, aura une portée de 80 à 120 km et une autonomie de trois heures. Elle sera capable de traiter toutes les menaces blindées en déjouant leurs systèmes de protection active. Les premières démonstrations avec une charge inerte auront lieu en 2026. La version de MBDA, baptisée « Mutant », sera également une arme antichar, d'une portée de 50 km, une démonstration réussie a eu lieu en 2025. Les deux versions sont téléopérées.

États-Unis

Switchblade 300



Le Switchblade 300, conçu par AeroVironment, est une MTO (drone irrécupérable) destinée à augmenter la puissance de feu de précision des unités d'infanterie de la taille d'un peloton. Il peut être contrôlé dans un rayon de

10 km et a une autonomie de 10 minutes. Il utilise une caméra couleur et une localisation GPS pour identifier, suivre et engager des cibles. Il transporte une charge explosive équivalente à une grenade de calibre 40 mm pour détruire les véhicules blindés légers et le personnel.

Switchblade 600



Le Switchblade 600 est conçu pour voler à 40 km en 20 minutes, puis patrouiller pendant encore 20 minutes, ce qui lui donne une portée totale de 80 km, et attaquer la cible à l'aide d'une charge creuse. Le drone est contrôlé manuellement.

Il est sécurisé via des liaisons de données cryptées embarquées et un GPS. Il dispose d'une caméra visible/IR.

Royaume-Uni



Tiré à partir d'un tube lance-roquette, le WASP M4-TL, de ISS Aerospace, déploie ensuite ses bras en altitude pour se transformer en un drone quadrimoteur polyvalent. Il peut porter 1,5 kg de charge utile.

Australie

Le D40 de DefendTex peut être lancé soit manuellement, soit à l'aide d'un lance-grenades de 40 mm. La portée maximale est de 20 km et la masse au décollage est de 300 g. Lorsque l'on tire plusieurs munitions, elles fonctionnent sans liaison entre elles. Son temps de vol est de 30 à 60 minutes. Le drone dispose d'une liaison radio cryptée.

Chine

Le CASC CH-901 est une munition rôdeuse développée par la *China Aerospace Science and Technology Corporation* en 2016. Le drone peut être transporté par des soldats sur le terrain et lancé depuis un mortier portable, ainsi que depuis des véhicules, des avions et drones. Le CH-901 vole vers sa zone cible à 180 km/h, zone qu'il peut survoler à 100 km/h et à une altitude de 100 m à 150 m. Son autonomie est de 60 minutes. Une fois qu'une cible est localisée à l'aide du guidage électro-optique du drone, elle attaque la cible. Le CH-901 peut transporter une charge militaire de 3,5 kg. Les drones peuvent également être lancés par vagues dans un but de saturation des défenses.

Russie

Lancet

Le *Lancet* est une munition rôdeuse russe conçue par la société ZALA Aero. Il existe en deux modèles, le *Lancet-1* et le *Lancet 3*.

- *Lancet-1*: version initiale du drone. Il est petit et léger et ne peut emporter que 1 kg d'explosifs, son autonomie est de 30 minutes ;
- *Lancet-3*: il est plus gros, sa capacité est augmentée à 3 kg d'explosifs, son autonomie à 40 minutes et il peut atteindre les 110 km/h.

Ces munitions rôdeuses sont téléguidées via une caméra embarquée montée dans le nez du drone. Lors de la phase d'attaque, le *Lancet* descend en piqué sur sa cible et l'opérateur pilote le drone de façon à frapper la partie la plus vulnérable de la cible.

Izdeliye 53

Le drone *Izdeliye 53* est une nouvelle version du *Lancet*. Contrairement aux versions précédentes, le drone est livré directement dans un tube ; le drone est expulsé du tube à la manière d'un obus de mortier et les ailes du drone ne se déploient qu'après le lancement. Selon le constructeur, la plus grosse amélioration serait l'ajout d'un système d'intelligence artificielle pour pouvoir opérer le drone en essaim.

Avancées sur les essaims de drones dans le monde

À l'heure actuelle, de nombreux pays développent la technologie de l'essaim. Parmi les pays leaders se trouvent les États-Unis, Israël, la Turquie, la Russie et la Chine. Les essaims turcs auraient déjà été déployés en Syrie, et se seraient imposés comme un véritable levier de supériorité face aux forces russes. L'Inde a également prouvé qu'elle était capable de déployer des drones en essaim lors de récents tests, tout comme la Chine ou encore les États-Unis. Sur le sol européen, le Royaume-Uni travaille sur le développement de son programme d'essaim. La technologie de l'essaim étant déjà maîtrisée dans le secteur civil, il ne fait aucun doute que ces États seront capables dans un futur proche de déployer des essaims sur un théâtre d'opérations. Mais l'emploi du mot « essaim » est sans doute parfois abusif et décrit l'utilisation de drones en meute, sans liaisons entre les drones ni d'intelligence artificielle collaborative embarquée.

États-Unis

En 2016, 103 mini drones *Perdix* (drone pesant 290 g et d'une autonomie de 20 minutes) ont volé en essaim grâce à une intelligence artificielle collective. Les *Perdix* ne sont pas des individus synchronisés préprogrammés, ils sont un organisme collectif, partageant un seul cerveau distribué pour la prise de décision et l'adaptation à chacun d'entre eux comme des essaims dans la nature. Comme chaque *Perdix* communique et collabore avec tous les autres *Perdix*, l'essaim n'a pas de meneur et peut s'adapter aux drones qui intègrent l'essaim ou en sortent. L'essaim reste opérationnel même si de nombreux éléments ont été détruits.

Chine

La Chine a dévoilé le drone aérien *Blowfish A3* en 2019; ce modèle capable d'agir en essaim serait également capable de libérer des drones pouvant eux aussi fonctionner en réseau.

Points durs restant à lever et perspectives

Aspects éthiques des essaims de drones

Le recours à l'IA pour assurer une autonomie complète des drones en essaim ne permet pas de garantir un fonctionnement conforme à l'éthique, surtout

lorsque la présence sur zone est longue ; une modification notable de la situation est possible entre l'instant de décision de l'envoi de l'essaim et l'attaque par un ou plusieurs drones d'un objectif détecté par ceux-ci. Conformément aux orientations éthiques appliquées aux innovations de la Défense, les essaims de drones pourraient être développés selon le modèle SALIA (systèmes d'armes létaux intégrant de l'autonomie). La présence d'un opérateur dans la boucle pour assurer la prise de décision létale est alors nécessaire.

L'IA dans les essaims

Des composantes d'IA orientées « multiagents » ont été développées pour permettre à une flottille autonome de drones, de robots terrestres ou marins de se déplacer et d'agir comme un essaim intelligent. Inspirées des essaims d'insectes ou d'étourneaux, les essaims robotisés sont capables de coopérer pour se déplacer (algorithme de consensus de l'essaim sur un mouvement), pour surveiller une zone ou pour détruire une cible en fonctionnant de manière autonome, sans contrôle central. Une mission peut être définie globalement et programmée pour l'essaim à partir d'algorithmes multiagents, sans avoir à programmer individuellement chaque composant (agent) de l'essaim. Cette configuration apporte de la résilience au dispositif qui peut poursuivre sa mission même si une partie de l'essaim a été neutralisée par l'ennemi.

En France, lors de la Journée de démonstrations d'essaims de drones de contact, Thales et ses partenaires ont dévoilé leurs dernières avancées permettant des opérations en essaims adaptées aux besoins militaires. Le démonstrateur COHESION de la solution d'essaim Thales permettrait d'atteindre un niveau d'autonomie inégalé grâce à l'IA et à l'usage d'agents intelligents. L'architecture système de COHESION permet à l'opérateur d'ajuster le niveau d'autonomie de l'essaim de drones pour l'adapter au besoin. Le système d'intelligence artificielle (IA) et les capteurs haute définition installés à bord des drones leur permettent, en quelques minutes seulement, de réaliser de manière autonome une cartographie 3D extrêmement détaillée de la zone d'intérêt. Les drones perçoivent et analysent leur environnement, partagent entre eux des informations sur les cibles potentielles, analysent l'intention de l'ennemi, mettent en œuvre des tactiques militaires collaboratives ou optimisent leurs trajectoires. L'existence de liaisons entre les drones les rend cependant vulnérables au brouillage.

Il convient de rester vigilant sur la réelle autonomie de l'essaim ; certaines démonstrations opèrent en centralisant les données issues des drones dans une station sol et en redistribuant les données traitées vers les drones.

En Chine, dans le domaine de la coordination de drones volant en essaim, une équipe dirigée par Fei Gao, de l'université de Hangzhou, en Chine, est parvenue à faire voler un essaim de drones autonomes à travers une forêt de bambous, soit un milieu non cartographié où rien n'est connu d'avance. Les chercheurs se sont concentrés sur l'algorithme permettant de planifier leur chemin. Un calcul global donne aux drones un point cible cohérent vers lequel ils se dirigent de manière autonome, puis, à chaque instant, le plan de route s'adapte pour éviter les obstacles et les autres appareils. Les trajectoires sont ainsi recalculées toutes les quelques millisecondes.

La résilience des essaims de drones

Actuellement, les systèmes de défense anti-essaim de drones les plus développés prennent principalement la forme d'armes laser ou de systèmes d'armes hyperfréquence.

Les lasers infligent des dommages structurels aux drones conduisant à leur destruction. Mais le système laser doit appliquer le faisceau plusieurs secondes sur chaque drone, et la destruction de l'essaim peut alors s'avérer longue. Un exemple d'un tel dispositif est HELMA-P de la société CILAS.

Les armes hyperfréquence sont :

- soit des brouilleurs des liaisons poste de contrôle-drone, inefficaces cependant lorsque le drone devient autonome grâce à un autodirecteur (visible ou IR), mais le brouilleur peut interagir avec plusieurs drones de l'essaim ; le fusil brouilleur NEROD de la société française MC2 Technologies est un exemple de ces moyens de lutte anti-drone efficace contre la très grande majorité des drones commerciaux, son action multiréférentielle permet de neutraliser un ou plusieurs drones menaçants ;
- soit des armes à énergie dirigée hyperfréquence dont le principe est simple : une antenne émet une impulsion électromagnétique très brève, mais de forte puissance pour dégrader ou détruire les composants électroniques des systèmes ; un exemple est l'arme à micro-ondes E-TRAP de Thales, efficace face à tous types de petits drones, même ceux autonomes en termes de navigation et de communication. E-TRAP garantit la neutralisation simultanée de tous les appareils pris dans son faisceau, aptitude essentielle pour arrêter un essaim ;
- soit des charges génératrices d'IEM, ayant probablement un effet sur la quasi-totalité des drones de l'essaim, mais aussi sur l'environnement ami.

Le leurrage électromagnétique constitue également un procédé de lutte contre les essaims de drones. Le système Skyjacker de Safran Electronics & Defense

altère la trajectoire d'un drone pour neutraliser la menace qu'il représente en simulant les signaux GNSS nécessaires au guidage du drone vers sa cible. Couplé à une capacité de détection radar et d'identification optronique, il permettrait de traiter efficacement les essaims de drones.

Pour tous ces systèmes de défense contre les drones, le coût de la destruction d'un drone est extrêmement faible. La quantité d'énergie requise permet la répétition des tirs sur les drones de l'essaim.

— 4 —

Systèmes exotiques

Munition à effet IEM

Une impulsion électromagnétique (IEM) est une émission d'ondes électromagnétiques brève couvrant une très large bande de fréquences et de très forte amplitude qui peut détruire de nombreux appareils électriques et électroniques non protégés dans une zone de quelques dizaines à quelques centaines de mètres, limitant fortement les effets collatéraux sur les êtres humains, civils et militaires. Par ailleurs, les effets sur l'homme sont très réduits avec des impulsions ultracourtes ; les ondes sont peu pénétrantes dans le corps humain ; le risque — minime — est limité à l'effet sur des inserts métalliques ou des stimulateurs cardiaques.

L'arme IEM a été inventée dans les années 1950, et est capable de produire une impulsion électromagnétique (IEM) sans explosion nucléaire.

Le concept du générateur magnétocumulatif qui produit une impulsion électromagnétique non nucléaire a été conçu dès 1951 par Andreï Sakharov en Union soviétique.

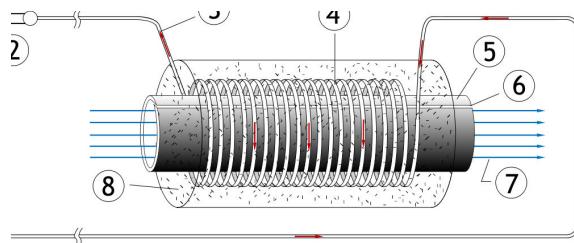
Rappels des caractéristiques de l'arme IEM

En explosant, la charge émet pendant une très courte durée une onde électromagnétique de forte intensité. Celle-ci provoque, dans la zone concernée, un court-circuit généralisé au sein des appareils électriques.

De tels générateurs sont compatibles avec l'armement standard et peuvent être installés sur une bombe, un missile de croisière ou un drone, voire un obus de 155 mm.

Le type de générateur le plus adapté est le générateur magnétocumulatif. L'idée centrale derrière la construction d'un générateur magnétocumulatif consiste à

utiliser un explosif pour comprimer rapidement un champ magnétique, transférant ainsi beaucoup d'énergie de l'explosif dans le champ magnétique.



©Techno-Science.net

Générateur à tube.

1 : Banc de condensateurs — 2 : Interrupteur fermé — 3 : Courant électrique — 4 : Solénoïde — 5 : Cylindre de cuivre — 6 : Fente — 7 : Champ magnétique — 8 : Explosif à haute puissance

Intérêt militaire

Bien que les études portant sur les armes électromagnétiques aient débuté il y a près de 70 ans, il n'y a eu, jusqu'à maintenant, que peu de cas d'attaque par IEM recensés : les Américains auraient employé une version spéciale de l'AGM-86 en 1999 contre les installations C2 de la république de Yougoslavie, et auraient testé une arme de ce type contre le bâtiment de la télévision irakienne en 2003.

Ces armes permettent de générer des impulsions électromagnétiques non nucléaires à l'aide de générateurs de micro-ondes à forte puissance d'émission. Elles sont presque toutes réalisées avec des explosifs chimiques comme source d'énergie initiale, ce qui limite fortement leur portée par rapport aux impulsions d'origine nucléaire qui émettent une énergie électromagnétique de l'ordre d'un million de fois plus importante. De ce fait, l'impulsion électromagnétique des armes IEM est sensible uniquement à proximité de l'arme elle-même, tandis que celle d'une arme nucléaire est neutralisant même à une grande distance de la détonation. Malgré cette portée limitée, ces armes classiques permettent des frappes chirurgicales et peuvent se révéler suffisantes pour certaines opérations militaires ou antiterroristes.

Le fonctionnement des appareils électriques et électroniques soumis à cette impulsion électromagnétique est fortement altéré. De même, les signaux radioélectriques de faible longueur d'onde comme ceux des radars peuvent être fortement perturbés.

La vulnérabilité à l'IEM a évolué dans le temps :

- dans les années 60, les équipements électroniques étaient peu répandus, les moyens de communication pas aussi développés qu'aujourd'hui et les composants électriques ou électroniques (à tube principalement) étaient notamment moins sensibles aux champs électromagnétiques ; même chose pour le matériel militaire : l'électronique existante, peu miniaturisée, encore largement à base de lampes la rendait naturellement assez résistante aux armes IEM ;
- depuis le milieu des années 1990, les moyens de communication se sont développés et la miniaturisation de l'électronique s'est accélérée ; en conséquence, nos équipements et nos infrastructures n'ont plus du tout aujourd'hui la même résilience face à une attaque de type IEM ; si les effets sur les réseaux électriques restent les mêmes, deux vulnérabilités nouvelles sont apparues avec la généralisation des nouvelles technologies :
 - ▷ la miniaturisation qui rend les composants beaucoup plus sensibles au couplage pour des champs électromagnétiques de seulement quelques dizaines de volts/mètre,
 - ▷ la multiplication de nos moyens de communication sans fil ; toute antenne est une porte d'entrée privilégiée pour les ondes électromagnétiques et est donc un élément très vulnérable qui permet à l'impulsion électromagnétique de pénétrer dans un matériel même si celui-ci est protégé (cage de Faraday).

En conséquence, les véhicules terrestres, les aéronefs, les moyens de communication, les radars, les systèmes domotiques, les drones et les navires sont particulièrement vulnérables à une attaque par IEM. Les systèmes situés à l'intérieur de bâtiments restent moins exposés, étant donné que les structures métalliques permettent d'atténuer les effets en agissant comme une cage de Faraday, très imparfaite toutefois.

Quelle efficacité ?

- Quel serait l'effet d'une grenade IEM explosant près d'un char de combat ou d'un véhicule blindé ? Si le blindé lui-même a peu de chance d'être affecté, il en va tout autrement de ses capteurs, de ses moyens de communication, des armes téléopérées, des systèmes de protection active, etc. Dans ce cas, que restera-t-il de sa capacité de combat réelle ?
- Si la nuit, un drone s'introduit discrètement sur une base aérienne et génère

une impulsion électromagnétique contre les avions qui y sont stationnés, pourront-ils décoller le lendemain ? Si l'électronique est affectée, combien de temps prendront les réparations et à quel prix ?

- Si un raid d'avions de combat doit faire face à des salves de roquettes ou de missiles sol-air ou air-air produisant des IEM à proximité, quel sera l'impact sur les avions et leur armement ? Les aéronefs seront-ils totalement hors service ou seule une partie des capteurs sera-t-elle affectée ? Dans ce cas, pourront-ils poursuivre leurs missions, si tant est que leurs armements soient toujours en mesure de fonctionner ? Quand bien même ce ne serait que l'IFF qui serait impacté, l'appareil pourra-t-il poursuivre sa mission, sachant qu'il ne pourra pas être identifié par ses partenaires ?
- Dans quelle mesure les capteurs, les moyens de transmission et le système d'armes d'un navire de combat seront-ils impactés par une IEM ? Le bâtiment pourrait-il poursuivre sa mission ?
- Quel serait l'impact d'attaques électromagnétiques sur les drones et les plateformes ISR ?
- Quel serait l'impact d'une IEM sur l'efficacité opérationnelle de l'infanterie, privée de ses moyens de communication, de ses systèmes de visée, de ses drones et de ses missiles ?

Points durs restant à lever et perspectives

Points durs technologiques

Il ne semble pas qu'il y ait de réels points durs technologiques. L'ISL a annoncé en 2003 la mise au point d'un générateur de Marx compact, ouvrant la voie à des charges IEM de taille réduite (40 cm de long pour une dizaine de centimètres de diamètre), susceptibles d'équiper des roquettes d'artillerie ou des bombes guidées, voire à terme des obus de 155 mm.

Le blocage psychologique des décideurs civils et militaires.

Les effets des armes électromagnétiques ne sont pas visibles, ne sont que très difficilement prévisibles. En conséquence, il est difficile, voire impossible, de savoir si l'utilisation d'une arme à impulsion électromagnétique a eu un effet et quel est son impact (perturbation ou destruction), sauf dans le cas où la cible est un vecteur aérien (avion, missile, drone) dont la trajectoire sera perturbée. Comme pour la guerre électronique offensive (brouillage), dont c'est une extension, il n'y aura pas forcément de signes extérieurs indiquant les effets infligés à l'adversaire.

C'est un point qui ne plaît ni aux décideurs politiques ni aux chefs militaires qui ne peuvent avoir l'assurance que l'attaque a fonctionné. Cette absence de preuves tangibles, et donc de certitudes, crée un blocage psychologique.

Les drones constituent des cibles plus simples quant à l'observation de l'effet d'une IEM : le drone neutralisé tombe au sol.

Les travaux menés dans le monde

Europe

L'institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis possède une expérience de 40 ans dans l'étude, la conception et la réalisation de générateurs de Marx miniatures haute énergie. Initialement, de tels générateurs ont été développés pour les besoins propres de l'institut dans le domaine de la métrologie rapide (radiographie-éclair). Depuis 1999, l'ISL a pour objectif de perfectionner ce générateur en vue d'une application embarquée pour un dispositif de rayonnement électromagnétique de forte puissance.

Le CEA Gramat, quant à lui, travaille sur l'aspect système de ces armes.

Chine

Selon le *South China Morning Post*, la Chine aurait testé une arme à impulsion électromagnétique en 2021. Après avoir, comme d'autres pays, longtemps opté pour une bobine Tesla pour amplifier le voltage à l'aide d'un champ électromagnétique, la Chine s'est rabattue sur des générateurs Marx, à même de générer des tensions électriques de 2 millions de volts. Les scientifiques de l'entreprise de défense *China Electronics Technology Group* auraient réussi à abattre un grand drone à l'aide d'une arme à impulsion électromagnétique : les chercheurs chinois ont rapporté ce qui semblait être un dysfonctionnement du système de contrôle de la trajectoire, qui a conduit l'appareil à se comporter de manière erratique après l'attaque.

États-Unis

Les États-Unis auraient connu des avancées significatives dans le développement de ces armes dans les années 90, avec notamment la conception d'une charge IEM non nucléaire destinée au missile de croisière AGM-86, probablement dotée d'un générateur HPM de type Vircator.

Le Pentagone a lancé fin 2008 le programme CHAMP visant à la conception d'un démonstrateur aérien (drone ou missile), doté d'un générateur HPM capable

de générer plusieurs impulsions au cours d'un seul vol. C'est dans ce sens que Boeing a annoncé le développement de son propre démonstrateur CHAMP, intégrant un générateur HPM de 70 GW, fourni par le *Sandia National Laboratory* et *Lockheed Martin*.

Un prototype de charge IEM a réussi à abattre au moins une cinquantaine de drones lors d'un essai en 2019.

Allemagne

La compagnie allemande *Diehl BGT Defence* a développé un générateur HPM qu'elle décrit comme étant «compact» dans son brevet de 2003 et qui a pour objet le brouillage, voire l'endommagement de systèmes électroniques et informatiques. Elle propose à son catalogue un système du volume d'une grosse valise (61 cm x 49 cm x 22 cm) intégrant une source accordable entre 100 MHz et 300 MHz. Le champ rayonné à 2 m est de l'ordre de 50 kV/m pic à pic pour une tension théorique en pied d'antenne de 600 kV.

Turquie

La société turque ASELSAN commercialise le *Ejderha* pour neutraliser les engins explosifs improvisés (IED). Le système génère des champs électromagnétiques de très haute intensité dans des fréquences spécifiques et les dirige vers des cibles potentielles telles que les circuits électroniques des engins explosifs improvisés (IED) avec son ensemble antenne-réflecteur directionnel. Composé d'un chargeur haute puissance, d'un générateur Marx, d'une antenne et d'un réflecteur, le système HPM génère des ondes électromagnétiques haute fréquence et haute puissance (400 kV/m à 1 m).

Russie

La Russie disposerait de la grenade Atropus — 180 grammes et rayon d'action de 400 m.

Conclusion

La réalisation d'une roquette d'artillerie porteuse d'une charge génératrice d'IEM paraît réalisable. Une telle charge est susceptible de produire des effets sur les matériels modernes comportant de l'électronique, en particulier les drones, voire sur des infrastructures, avec un rayon d'efficacité de plusieurs centaines

de mètres et avec des effets collatéraux restreints. L'absence le plus souvent de signes extérieurs indiquant les effets infligés à l'adversaire constitue un handicap.

L'intégration d'une charge IEM dans un obus de 155 mm n'est pas encore envisageable.

Les charges thermobariques

Une arme thermobarique combine lors de sa mise en œuvre des effets thermiques, une onde de choc suivie d'une dépression. Elle s'avère efficace contre les fortifications.

Parmi les systèmes opérationnels, le TOS-2 Tossotchka russe porte 18 tubes lance-roquettes de calibre 220 mm d'une portée de 3 à 10 km.

— 5 —

Points de focalisation illustratifs

Les problèmes liés aux tourelles

La vision classique

Pour faire face aux masses blindées du pacte de Varsovie avant le contact et le combat de chars, différents matériels d'artillerie ont été développés dans les années 1950-1960 pour avoir une grande cadence de tir et pouvoir tirer tous azimuts. Ces exigences ont conduit à privilégier une mobilité analogue à celle des chars et au concept de canon sous tourelle.

France — 155 AuF1

L'AuF1 est un automoteur de 43 tonnes, mis en service en 1979, constitué d'un châssis d'AMX-30 et d'une tourelle de 17 tonnes abritant un canon de 155 mm de 39 calibres (sa modernisation visant à l'équiper d'un canon de 52 calibres a été abandonnée) et d'un système de chargement automatique de l'obus et de charges propulsives spécifiques du matériel. Il est mis en œuvre par quatre servants : un chef de pièce, un pointeur, un radio-chargeur et un pilote.

États-Unis — M109 A6 Paladin et M109 A7 PIM

Le M109 est un canon d'artillerie automoteur américain développé durant les années 1950 et entré en service au début des années 1960. Il est équipé d'un canon de 155 39 calibres sous tourelle.

Le fruit des expériences récentes

Évolution du contexte — L'illusion du blindage lourd

L'expérience ukrainienne montre que la masse des blindages lourds pénalise la mobilité, et qu'à la différence des batailles de blindés du milieu du XXe siècle,

il apparaît préférable de rechercher la survie dans la furtivité et les évolutions des dispositifs de déception.

Et cependant en Allemagne... — Tourelle RCH 156

Le RCH 155 [*Remotely Controlled Howitzer*], est une tourelle adaptable sur différents véhicules à roues ou à chenilles, construite par KNDS Deutschland, inhabitée et autonome et équipée d'un canon de 155 mm 52 calibres de Rheinmetall et d'un système de chargement automatisé.

Il est monté sur PzH-2000 (châssis chenillé, chargement automatique des obus et manuel des charges modulaires), sur Piranha V (châssis à roues Piranha MHC présenté en 2024) et sur Boxer (châssis à roues).

KNDS Deutschland indique que le RCH-155 a la capacité de faire feu en mouvement.

Les avantages d'une tourelle

- Meilleure protection contre la « mitraille du champ de bataille » : éclats d'obus, balles, micro-drones et autres rôdeurs de calibres < 30 mm.
- Meilleure capacité (ou facilité) de protection NBC.
- Temps de première intervention amélioré de 20 secondes, voire plus dans une hypothèse de tir en marche, dont l'intérêt est cependant douteux.
- Satisfaction intellectuelle de « continuité » historique.
- Sous certaines hypothèses : réduction de l'équipe de pièce d'un ou même deux hommes.

Les inconvénients d'une tourelle

- Complexité accrue des dispositifs d'alimentation et perte de confiance corrélative.
- Dégradation des possibilités d'emploi de munitions variées.
- Accroissement de masse significatif de la masse pivotante : 5 à 10 tonnes selon le niveau recherché (protection NBC ou « mitraille du champ de bataille »), induisant, en particulier, une réduction de la mobilité stratégique (ponts limités en tonnage, aérotransport...)
- Maintenance coûteuse : quasiment doublée sur châssis lourd à roues, triplée sur châssis chenillé.
- Coût des interventions de réparation accru dans le même rapport.
- Repérage par l'ennemi facilité si châssis chenillé.
- Contraintes routières (cf. expérience afghane).
- Aéromobilité complexe, voire inenvisageable.

Estimations de masse et de coûts

Un matériel d'artillerie avec une tourelle de 155 mm montée sur châssis chenillé pèserait de 45 à 60 tonnes et coûterait de 12 à 15 M€ selon le niveau de protection recherché. Un matériel conçu en associant une tourelle de simple protection et un châssis de camion lourd transformé pèserait de 35 à 45 tonnes et coûterait de 8 à 10 M€.

Coûts globaux pour une artillerie correctement dimensionnée (200 matériels avec leur maintenance et 1 million de munitions) :

- Matériel lourd chenillé à tourelle : 8,2 G€.
- Matériel à tourelle sur camion lourd : 7 G€.
- Matériel type « Caesar futur » : 5,7 G€.

Conclusion

Disposer d'une tourelle capable de tirer « tous azimuts » est sans doute également superflu, une capacité restreinte de pointage est suffisante, comme sur le CAESAR (300 ou 530 mil² selon les versions).

Le tir d'un obus de 155 « en marche » n'a de sens que pour des munitions guidées. Seule la capacité à arriver en position de tir et à quitter la position rapidement présente un intérêt et est favorisée par l'architecture de l'automoteur.

Étant donné les avantages et inconvénients listés supra, il semble préférable d'investir dans les dispositifs de déception qui seront indispensables dans toutes les configurations plutôt que de ressortir des recettes du passé. Un système d'artillerie sol-sol canon doté de tourelle présente plus d'inconvénients que d'avantages.

Une montée en calibre de l'artillerie sol-sol est-elle pertinente ?

Introduction

L'observation des combats de la guerre en Ukraine montre que pour attaquer avec succès les retranchements enterrés et fortifiés, les belligérants sont amenés à utiliser des missiles sol-sol coûteux ou des bombes d'aviation en complément d'une artillerie canon souvent impuissante à traiter avec ses seuls moyens ces objectifs durcis. Dans ce cadre, il est intéressant de s'interroger sur les avantages et incon-

2 Le mil Otan d'artillerie, c'est un mètre à mille mètres, soit 0,0573 degrés, 3,437 minutes arrondis à 3,5 minutes. Donc, ici, 16,8 ou 29,8 degrés

vénients de doter l'artillerie de lanceurs délivrant des obus de calibre supérieurs à 155 mm. Cette analyse trouve un intérêt particulier dans la mesure où l'appui feu apporté par l'aviation, en particulier en larguant des bombes planantes, peut dans l'avenir être dénié par l'accroissement continu des performances des défenses sol-air ou des missiles air-air tirés à grande distance, comme viennent de le mettre en évidence les batailles aériennes entre Indiens et Pakistanais au printemps 2025.

Comment une telle montée en calibre peut-elle se matérialiser ?

Une solution « canon »

Les tubes de forts calibres utilisés de manière opérationnelle et massive durant le premier conflit mondial, puis, de manière plus anecdotique, durant la Seconde Guerre mondiale, étaient des monstres dépourvus de mobilité tactique et sont inadaptés aux conditions d'aujourd'hui. Au cours de la guerre froide, le calibre de 203 mm, compatible avec des affûts mobiles comme le canon M110 US ou des châssis comme le 2S7 Pion soviétique, fut en service et, aujourd'hui, l'armée russe utilise toujours ce calibre en Ukraine.

Même si l'allonge importante apportée par les gros calibres est toujours intéressante pour tenter d'échapper à la contrebatterie ennemie, il semble primordial de privilégier la mobilité des lanceurs et leur rusticité pour résister à l'abrasion du champ de bataille. Dans cette perspective, une portée d'une trentaine de kilomètres pourrait être adoptée dans une logique de suffisance, de manière à limiter la longueur du tube tout en tirant des obus efficaces contre les positions abritées.

Pour tirer profit des tubes de très gros calibres plus courts, il est intéressant d'étudier les opportunités qui pourraient être apportées par la technologie des obus à statoréacteur. Ce mode de propulsion, décrit dans le paragraphe suivant du, pourrait fournir à l'obus une portée éventuellement supérieure avec un tube court, juste assez long pour garantir le démarrage du statoréacteur.

La conception d'un canon de 203 mm moderne s'inspirant du Caesar pose divers problèmes techniques dont la résolution s'écarte du cadre de cette étude. Parmi ceux-ci la masse d'un obus de 203 mm est environ 2,2 fois celle d'un obus de 155 mm, de sorte qu'à vitesse initiale égale (de l'ordre de 900 m/s), l'impulsion à encaisser par le canon est également 2,2 fois supérieure. Une réduction de la vitesse initiale vers 400 m/s permettrait de maintenir l'impulsion au niveau d'un canon de 155 mm, mais cette vitesse initiale paraît peu compatible avec l'amorçage d'un statoréacteur à bord de l'obus.

De plus, l'introduction d'un nouveau calibre qui pourrait être le 203 mm risquerait de pénaliser les efforts de rationalisation de l'artillerie contemporaine autour du calibre 155 et serait perturbante pour la logistique des munitions d'artillerie, comme cela a été développé au chapitre 1

Des solutions Roquettes/Missiles

En complément de l'utilisation exceptionnelle de missiles existants de gros calibres qu'il est préférable de conserver pour des frappes dans la profondeur sur des objectifs de haute valeur, on peut imaginer un lanceur tactique spécialisé. Ce système rustique et peu coûteux permettrait de délivrer des salves saturantes de roquettes ou missiles de gros calibres, mais de coût réduit grâce à une frugalité technologique.

Munitions téléopérées (dronisées et rôdeuses)

Dans ce cas, il s'agirait de bombes planantes motorisées emportant des charges militaires importantes de quelques tonnes, à l'instar des bombes planantes actuellement utilisées par les Russes. Ces engins pourraient être largués à distance de sécurité compte tenu des nouveaux missiles air-air. Autre approche, celle de drones que l'on pourrait qualifier « de croisière » boostés au départ ou emportés dans une roquette cargo de gros calibre pour la première partie de la trajectoire. Dans tous les cas la munition téléopérée pourrait adopter les trajectoires erratiques caractéristiques des drones sur la zone des objectifs.

La question des obus à statoréacteurs

De quoi s'agit-il

Parmi l'ensemble des voies innovantes permettant d'allonger les performances de l'artillerie sol-sol, en portée, l'utilisation d'obus ou de roquettes propulsés par statoréacteur occupe une bonne place. Cette technologie, dont l'invention remonte au début du XXe siècle, a intéressé très tôt les artilleurs, mais rapidement les innovations en matière de roquettes et de missiles ont fait oublier cette technologie pourtant prometteuse et largement utilisée dans le domaine des engins et missiles. Aujourd'hui l'intérêt pour ce type de propulsion qui permet de générer des vitesses pouvant être hypersoniques et donc de grandes portées est ravivé et de nombreuses expérimentations sont en cours.

L'étude de l'état de l'art en matière de statoréacteurs (*ramjets*) pouvant équiper des projectiles d'artillerie obus ou roquettes, fait l'objet des rubriques qui suivent.

Rappels des caractéristiques du statoréacteur

Généralités

Le statoréacteur (*ramjet*) est un propulseur à réaction d'une grande simplicité, car il peut être dénué de pièces mobiles d'où le préfixe « *stato* » pour statique et le sobriquet de « tuyau de poêle volant » qui fut attaché à ce type de réacteur. Il s'avère donc approprié pour les applications qui nécessitent un moteur simple et compact afin d'atteindre de grandes vitesses.

Constitué par une tuyère à thermopropulsion exigeant pour fonctionner une vitesse initiale élevée de l'ordre de deux fois la vitesse du son, il permet d'atteindre des vitesses importantes. Ce type de propulseur inventé en 1915 est un moteur dit respiratoire qui tire parti du déplacement du projectile dans l'air pour comprimer l'air avalé par le moteur dans la chambre de combustion sans avoir besoin de le comprimer artificiellement avec un compresseur.

Toutefois, la conception des premiers prototypes a tardé; en effet la mise en œuvre de ce type de propulseur nécessite pour le démarrage du moteur une vitesse initiale de lancement proche du supersonique, voire au-delà, pour garantir la compression nécessaire au démarrage, ce qui constituait un obstacle technologique au début du XXe siècle. Par ailleurs, l'apparente simplicité d'un tel moteur est trompeuse, il faut une ingénierie avancée, des matériaux adaptés et une fabrication de précision pour réussir, ce qui peut expliquer pourquoi cette idée, presque aussi ancienne que le vol motorisé, a mis autant de temps pour donner lieu à des applications opérationnelles.

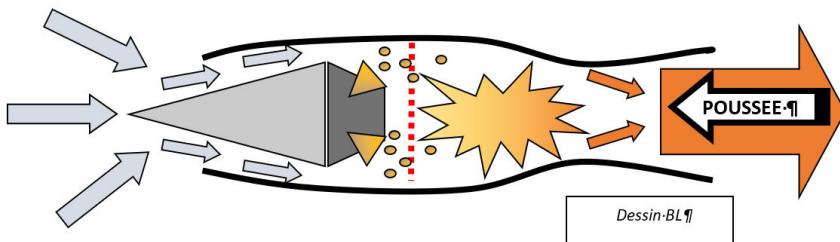
Aujourd'hui, les statoréacteurs sont couramment utilisés pour la propulsion des missiles de croisière lancés d'un avion porteur ou munis d'un turboréacteur pour apporter la vitesse initiale et assurer un décollage autonome. Ils peuvent être utilisés pour propulser des obus ou des roquettes. Après quelques essais réalisés durant la Seconde Guerre mondiale par l'Allemagne, leur intérêt se précise aujourd'hui.

Principe de fonctionnement

Un statoréacteur est un propulseur à réaction dont la poussée est produite grâce à l'éjection d'un gaz issu de la combustion d'un carburant. Il utilise un cycle thermodynamique classique dans lequel se succèdent compression, combustion,

détente et pour lequel la poussée est produite par éjection des gaz issus de la combustion d'un carburant liquide ou solide à une vitesse supérieure à la vitesse d'entrée. Du fait de la forme de la tuyère et de la vitesse initiale, l'air avalé qui sert de comburant est suffisamment compressé pour réagir directement avec le carburant et générer la poussée, ce qui évite d'avoir à faire appel à des pièces mobiles comme des ailettes de turbines ou compresseurs, comme dans les turboréacteurs classiques.

D'une manière générale, ce moteur est composé d'un tube ouvert aux deux extrémités. Il fonctionne en exploitant la pression dynamique, l'air entrant étant comprimé par la vitesse élevée de l'ordre de Mach 2,5 à 3 produite par un véhicule, le plus souvent un avion porteur, un booster de démarrage ou une charge propulsive et l'effet du cône de compression, cet air est ensuite mélangé à du carburant injecté qui s'enflamme en traversant une grille « accroches flammes » avant de pénétrer dans la chambre de combustion, puis d'être expulsé par la tuyère en produisant la poussée propulsive.



Dessin-BL

Admission et compression de l'air entrant	Injection Carburant dans l'air comprimé	Combustion Augmentation pression et température	Détente des gaz chauds Génération de la Poussée et de l'accélération
Vitesse relative de l'air > Mach1	V < Mach1	Vitesse air éjecté > Mach1	

Les statoréacteurs fonctionnent avec des carburants variés sous différentes formes liquides ou solides. Le carburant peut-être de type kéroïne ou propergol solide. Durant la Seconde Guerre mondiale, les Allemands ont testé l'utilisation de carburants de synthèse les plus improbables.

Différentes classes de statoréacteurs peuvent être distinguées en fonction du carburant utilisé. D'une manière générale, le carburant peut être stocké avant sa diffusion sous trois phases : gazeuse (en particulier pour l'hydrogène), liquide (*Liquid-fuelled ramjet ou LFRJ*) ou encore solide (*Solid-fuelled ramjet ou SFRJ*).

Un carburant de type « *full rich propellant* » est développé par des industriels pour réussir à relever les défis inhérents à la propulsion d'un obus avec un sta-

toréacteur. Le challenge consiste à concevoir un carburant qui résiste aux chocs mécaniques au moment du lancement. Ces carburants doivent avoir un taux de résidus nul et présenter un taux de combustion compatible avec les différentes pressions s'exerçant dans la chambre de combustion dans les différentes phases de fonctionnement.

Contraintes et accès aux hautes vitesses

Le principal inconvénient de ce type de propulseur est sa dépendance à un moyen de lancement pour atteindre la vitesse de démarrage de l'ordre de Mach 2 à Mach 2,5. La poussée initiale est apportée par un autre moyen, moteur-fusée pour une roquette et poussée à l'intérieur du canon pour l'obus. En revanche, une fois allumé, le statoréacteur peut imprimer des vitesses importantes puisque la puissance du propulseur s'accroît avec sa vitesse.

Après un lancement par un canon ou une fusée de démarrage, il va ainsi fournir une poussée permettant la propulsion en l'accélérant jusqu'à Mach 6. Cette vitesse ne constitue pas une vitesse maximum, puisque de nombreux engins à statoréacteurs hypersoniques atteignent des vitesses bien plus importantes. Toutefois, cette vitesse est notée à titre indicatif, car, l'échauffement supplémentaire occasionnée par la friction du flux d'air entrant à vitesse supersonique, venant s'ajouter à celui dû à la compression, le tout venant s'ajouter à la chaleur de combustion, la température du gaz en sortie de tuyère risque de dépasser la température limite des technologies actuelles de col. Pour surmonter cette difficulté technique, la compression de l'air entrant doit être attentivement régulée pour garantir de hautes vitesses et la simplicité du statoréacteur laisse place progressivement à ces hautes vitesses à une logique de fonctionnement plus complexe qui caractérise les super statoréacteurs.

Si la vitesse de l'air est supérieure à Mach 1 dans la chambre de combustion, il s'agit alors d'un superstatoréacteur ou en anglais *Supersonic Combustion Ramjet* ou *Scramjet*. Cette technologie est aujourd'hui utilisée pour les aéronefs hypersoniques. La structure animée par un superstatoréacteur doit résister à des chaleurs provoquées par la friction de l'air, le fameux « mur thermique ».

Schéma de principe d'intégration d'un statoréacteur dans un obus

Ci-après, un schéma de principe d'un obus à statoréacteur. Pour les grandes distances, la trajectoire, qui ne sera pas de nature balistique, nécessitera des organes de contrôle et de recalage du vol de l'obus pour préserver une précision compatible avec le traitement d'objectifs mobiles.



Dessin BL

Intérêt militaire

Allongement important de la portée des obus

Après une première phase balistique, une poussée supplémentaire est apportée par le fonctionnement du statoréacteur. La portée sera d'autant plus grande que le carburant dans le projectile permettra le fonctionnement efficace du statoréacteur. Actuellement le temps de fonctionnement des prototypes d'obus de 155 mm est d'une cinquantaine de secondes et la vitesse acquise est de l'ordre de Mach 3. La portée attendue d'un obus à statoréacteur dépasse les 100 km. Certains obus expérimentaux auraient effectivement atteint cette distance.

Ce qui peut paraître intéressant pour la mobilité de l'artillerie c'est d'atteindre de telles portées sans avoir besoin de tubes de canons très longs, voire en utilisant des tubes très courts, gage de mobilité . Cette possibilité ne semble pas être être prise en compte dans les expérimentations en cours.

Raccourcissement du temps de trajet des projectiles

La vitesse apportée par le statoréacteur propulse la munition à des vitesses largement supérieures à celle des obus ou roquettes traditionnelles, ce qui réduit le temps de trajet. La réduction du temps de trajet concourt à la fulgurance gage d'efficacité contre les objectifs furtifs.

Renforcement de l'effet cinétique des projectiles

La grande vitesse du projectile augmente son efficacité en fin de trajectoire en transférant à l'objectif impacté une énergie cinétique bien supérieure à celle d'un obus conventionnel ou d'une roquette de même calibre.

Charge militaire emportée significative

La charge militaire est moins importante que celle d'un obus de même calibre du fait de la place prise par le statoréacteur, toutefois, elle reste importante du fait

de l'absence de comburant. Actuellement, un obus de 155 mm avec statoréacteur emporte une charge militaire à peu près équivalente à celle d'un obus de 105 mm.

Pour les roquettes, la comparaison s'effectue sur des bases différentes, en effet, la place prise par le statoréacteur est largement compensée par la place occupée par le comburant nécessaire dans une roquette ou missile classique, mais inutile dans une roquette à statoréacteur qui utilise l'oxygène de l'air comme comburant.

Moindre usure des tubes d'artillerie

L'usage d'obus à statoréacteurs ne nécessite pas l'utilisation des charges les plus fortes, en effet, les charges qui permettent d'obtenir le déclenchement du statoréacteur de l'ordre de Mach 2,5 seront privilégiées. Par exemple pour le canon Caesar, dont la vitesse initiale en charge maximale est de 1000 m/s, une vitesse initiale de l'ordre de 800 m/s permettrait le tir des obus à statoréacteur en limitant l'usure des tubes engendrée par les fortes charges.

Les applications pour l'artillerie depuis l'invention du statoréacteur

Les premiers essais

En 1915 l'ingénieur hongrois Albert Fono, en s'inspirant de l'invention du statoréacteur par l'ingénieur français René Lorin, imagina d'augmenter la portée de l'artillerie par ce biais et prit un brevet en 1928 avec le français René Leduc.

En 1936 l'ingénieur allemand Wolf Trommsdorff proposa d'équiper un projectile d'artillerie avec un statoréacteur, son projet donna lieu à des expérimentations sur divers canons d'artillerie de calibres 88 mm, 105 mm, 122 mm, 150 mm. En 1942, un projectile à statoréacteur à carburant liquide a été testé le projectile a volé à 920 m/s (mach 3). Le concepteur s'est lancé finalement dans la conception d'un projectile à plus longue portée. Ce projectile, d'un calibre de 280 mm appelé C3 d'une longueur de 1,35 m et d'une masse de 170 kg, était dimensionné pour atteindre des vitesses allant jusqu'à mach 5,5 et porter à 350 km. Toutefois, ce dernier projet n'a pas fait l'objet d'un développement. Aucun projectile C3 n'a été tiré avec un canon K5 de 280 mm et aucun des prototypes n'a donné lieu à une utilisation opérationnelle. Les projectiles C3 ont, semble-t-il, intéressé les Russes qui ont capturé l'équipe de concepteurs, mais les expérimentations en Russie n'ont pas donné lieu à des tirs.

Norvège

Le 12 mai 2025, lors du salon de la défense FEINDEF à Madrid, la société norvégienne Nammo a dévoilé un obus d'artillerie de 155 mm à statoréacteur, une combinaison innovante de technologies d'artillerie et de missiles. Cet obus de 155 mm utilise un système de propulsion à statoréacteur à combustible solide pour atteindre des portées allant jusqu'à 150 kilomètres. Suite à des campagnes d'essais réussies et à un intérêt international croissant, l'obus d'artillerie à statoréacteur de 155 mm approche de la disponibilité opérationnelle.

États-Unis et Pays-Bas

Les US ont demandé à l'industriel Raytheon de coopérer avec l'organisation hollandaise TNO (*Netherland Organization for Applied Research*) pour travailler sur un obus de 155 mm capable d'une portée de 60 miles. Raytheon a été financé à la hauteur de 7,9 millions de \$ pour ce projet à la date du 11 mai 2020.

Raytheon déclare qu'il veut utiliser l'expérience acquise lors de la fabrication de l'obus M982 Excalibur, en particulier son système de navigation inertielles et son guidage GPS. L'obus XM1155 doit avoir la capacité de traiter des objectifs mobiles grâce à un système de guidage renforcé et multimode permettant le guidage terminal laser.

Des études sont menées par ailleurs pour développer un « ultra long-range super gun » et des roquettes à plus grand allongement. L'obus à propulsion par statoréacteur constituerait un point clé du programme *self-propelled ERCA XM1299*.

En mai 2025 Tiberius Aerospace³ dévoilait une munition d'artillerie de 155 mm dotée d'un statoréacteur et présentée comme révolutionnaire. Cette munition appelée Spectre pourrait atteindre une cible située à 150 km du lanceur en volant à Mach 3,5. Sur l'objectif traité, elle présenterait une erreur circulaire probable inférieure à 5 m en délivrant une charge militaire de 5,2Kg. Selon le constructeur, cette munition d'une longueur de 1,55 m resterait compatible des lanceurs conçus selon les normes de l'Otan.

L'Inde

L'entreprise ITT-Madras travaille sur la prochaine génération d'obus d'artillerie pour l'armée indienne. L'objectif poursuivi est de doubler la portée actuelle des canons avec munitions actuelles en gagnant en précision. Dans cette perspective, ils exploitent la technologie du statoréacteur.

³ Site Zone Militaire OPEX 360.COM Forces-terrestres/technologies Laurent Lagneau
22 mai 2025

Partant des obus courants portant à 24 km, ils veulent étendre la portée à 30 km avec des méthodes traditionnelles, puis 60 km avec un nouveau type de munition en redessinant les obus existants utilisant les technologies existantes en matière de statoréacteurs.

Il s'agit de fabriquer un obus de 155 qui soit compatible avec tous les lanceurs indiens de ce calibre. La volonté est de développer un modèle local à statoréacteur qui dépasse les performances d'obus Base bleed.

La Chine

En Chine, la société « Beijing Power Machinery Institute » développe un projectile à statoréacteur de 155 mm, le FAS-28 qui utilise du propergol solide comme carburant.

La Russie

Des travaux auraient été menés dans le passé avec la présentation en 2014 d'un obus télescopique, qui se déploie en vol de manière à alimenter une chambre de combustion et, en 2017, d'un projet d'obus à statoréacteur, le statoréacteur étant placé à l'avant de l'obus, le tout en calibre 152 mm. La portée annoncée de ce dernier serait de 70 à 80 km.

Points durs restant à lever et perspectives

Type de carburant

Il apparaît que des prototypes d'obus utilisent un carburant solide, toutefois, ce domaine fait l'objet d'études approfondies. La quantité de carburant embarquée est évidemment liée à la durée de fonctionnement, cette caractéristique pourrait favoriser le retour en grâce de gros calibres, en particulier le 280 mm bien connu et maîtrisé par les États-Unis⁴, avec cependant l'inconvénient d'une mobilité limitée par la masse et les dimensions de telles pièces.

Maîtrise du flux entrant

La qualité du flux d'air en termes de chaleur, pression et vitesse traversant le statoréacteur est primordiale, puisque le fonctionnement du propulseur en est directement tributaire. Dans cette perspective la conception des entrées d'air est

4 Il avait été développé dans les années 1950 pour le canon atomique M65 «Atomic Annie» destiné à tirer des obus nucléaires. Fabriqué à 20 exemplaires, il a été déployé dans les années 1960 en Allemagne de l'Ouest..

importante. Pour conserver la simplicité nécessaire à l'intégration dans un obus, il semble difficile d'envisager une régulation complexe du flux d'air et privilégier les dispositifs fixes. Pour les mêmes raisons, il semble que le superstatoréacteur (Scramjet) ne soit pas adapté aujourd'hui aux projectiles étudiés.

Maîtrise de la trajectoire

La maîtrise des trajectoires allongées par l'action des statoréacteurs nécessitera un système de guidage autonome des munitions ou un guidage terminal pour le traitement des objectifs mobiles.

Un des problèmes à surmonter est le montage d'un autodirecteur du fait de la géométrie particulière de l'obus dont la partie avant ou le nez est constitué par l'entrée d'air et le cône central inhérents au principe de fonctionnement des statoréacteurs.

Charge militaire

Du fait de la place prise par le moteur, la charge d'explosif sera réduite par rapport à un obus de 155 mm standard. L'expérience acquise avec les prototypes apprend que la charge militaire envisageable est équivalente à celle d'un obus de 120 mm standard.

Coûts d'acquisition

Ce mode de propulsion sera intéressant pour des obus ou roquettes à la condition que le coût d'acquisition de ces projectiles demeure faible par rapport aux missiles de portées équivalentes. Cette condition pourra être remplie si l'architecture des projectiles minimise les pièces mobiles. Le respect de cette condition pourrait être facilité par l'utilisation des techniques de fabrication additives pour confectionner des pièces à la géométrie complexe.

Par ailleurs, si le coût de ces munitions demeurait du même ordre que celui des obus et roquettes actuels, cela permettrait d'envisager leur utilisation pour des tirs de saturation à longue distance.

Facilité de fabrication

Cet aspect capital est à étudier à la fois sous l'angle des méthodes de fabrication traditionnelles et de l'utilisation de la construction industrielle de type additive qui facilite l'exécution de pièces complexes sans assemblages ultérieurs.

Conclusion

Un obus à statoréacteur est concevable, mais son développement se heurte à des butées liées à son principe même :

- si l'on reste en calibre 155 mm, la charge utile est alors très limitée par l'architecture de la munition et conduit à une efficacité terminale faible ;
- une charge utile plus importante impose un calibre supérieur, par exemple, 203 mm ; mais alors, on doit disposer d'un canon spécialisé. Dans une telle perspective d'augmentation du calibre, il faudrait que l'Otan normalise un nouveau calibre, 203 mm par exemple, opération compliquée, mais non impossible..

La technologie statoréacteur est bien adaptée à la roquette d'artillerie. Celle-ci doit disposer d'un étage d'accélération amenant la roquette à une vitesse permettant l'amorçage du statoréacteur, elle doit également suivre une trajectoire non parabolique, à altitude quasi fixe pour conserver une architecture de statoréacteur simple.

Les munitions de sauvegarde à effet antidrones

La question des munitions d'artillerie à effet antidrones pour la sauvegarde des positions de batteries et tirées par l'armement principal doit être replacée dans le cadre plus général de l'autoprotection des pièces d'artillerie.

Les canons étant désormais le plus souvent utilisés isolés et non en batterie, l'équipe de pièce ne peut, le plus souvent, compter que sur elle-même pour son autoprotection.

Les menaces contre les plateformes d'artillerie

La contre-batterie

Les tirs de contre-batterie nécessitent la mise en œuvre d'un système de capteurs, radars de contre-batterie, détecteurs acoustiques, moyens d'observation visible/IR ou de renseignement électromagnétique. L'omniprésence des drones constitue un nouveau risque de détection et de localisation des pièces d'artillerie à prendre en compte.

Le couplage des moyens de détection des tirs d'artillerie au système de commandement de l'artillerie permet de réduire le délai entre la détection de la menace et le déclenchement du tir de contre-batterie. La maîtrise de ce délai est essentielle du fait des temps de vol des projectiles.

Le radar de contre-batterie suit le projectile pendant sa trajectoire initiale ascendante. Des exemples de tels matériels sont COBRA (Fr/Al/R-U), ARTHUR (Suède), l'AN/TPQ-37 Firefinder (États-Unis), Zoopark-1 (Russie).

Pour la détection acoustique, on peut citer le système de localisation de l'artillerie par acoustique — SL2A (France) et le système de reconnaissance d'artillerie optique (visible et IR), acoustique et sismique 1B75 Penicillin (Russie). L'intérêt principal de cette technologie passive est sa discréetion, contrairement au radar de contre-batterie dont l'émission électromagnétique est détectable — ce qui fait du radar de contre-batterie une cible de choix, en particulier du fait de son prix —, mais la portée des détecteurs acoustiques est réduite, la précision de localisation faible et le temps de réaction nettement supérieur à celui des radars de contre-batterie.

La détection des émissions électromagnétiques du lanceur a également un temps de réaction important qui permet à la plateforme de tir de quitter sa position avant le tir de contre-batterie. La discréetion électromagnétique rend ce type de détection inefficace.

Les drones

La menace pour l'artillerie était, jusqu'à il y a peu, essentiellement constituée des tirs de contre-batterie. L'apparition des drones d'attaque sur le champ de bataille constitue une nouvelle menace pour les pièces d'artillerie en faisant régner une menace air-sol d'un nouveau type.

Cette menace peut encore évoluer avec l'apparition des essaims de drones.

Les parades envisageables face à la contre-batterie

La mise hors de portée des lanceurs

L'accroissement des portées de l'artillerie permet de mettre les lanceurs hors de portée d'un tir de contre-batterie, avec l'inconvénient de privilégier le tir aux plus grandes portées qui engendrent aussi une forte usure des tubes. Cet avantage est plus facile à concrétiser si l'adversaire ne possède pas une artillerie performante en portée (l'artillerie opère derrière les lignes de combat, si on recule l'artillerie en la faisant tirer à sa limite de portée, elle ne pourra être atteinte par l'artillerie adverse équivalente que si celle-ci avance près de la ligne de combat).

La mobilité

Dans le cas du CAESAR, le délai entre l'arrivée sur la position de tir (moins

de 60 secondes pour la mise en batterie) et le départ (moins de 40 secondes pour la sortie de batterie), après avoir délivré une série de six coups, est réduit à moins de trois minutes, rendant peu efficaces les tirs de contre-batterie. En effet, si le premier obus tiré est détecté et trajectographié sur la partie ascendante de sa trajectoire, et en considérant le temps de traitement et de transmission de la position de tir à une pièce d'artillerie adverse, la préparation du tir, ainsi que le temps de vol des obus du tir de contre-batterie, ceux-ci arriveront après le départ du CAESAR de sa position.

Si cette parade est efficace face à un tir d'artillerie, elle ne l'est pas face à un drone qui survolerait le secteur où le canon est en batterie, le drone arrivant plus tôt sur l'emplacement désigné et étant en mesure de suivre le déplacement du canon.

Les parades envisageables face aux drones

Dans tous les cas analysés ci-dessous, la détection du drone ou de l'essaim constitue un problème majeur du fait de la faible taille du drone, de sa discréption acoustique (pour les drones électriques), électromagnétique et optique (visible et IR), de sa capacité à utiliser le terrain et de sa rapidité.

Le brouillage

Le brouillage des moyens de navigation par satellite pour les drones qui utilisent ce type de moyen de navigation sans télécommande peut empêcher le drone de rejoindre l'objectif qui lui est désigné.

Le brouillage des liaisons radiofréquences ou le *hacking* de la télécommande ne concerne que les drones qui sont radiopilotés, ce qui peut cependant être le cas dans la phase terminale d'attaque de la cible.

Le CAESAR 8x8 peut, par exemple, être équipé de brouilleurs.

Le camouflage

Le camouflage de la pièce d'artillerie rend plus difficile l'attaque par un drone. L'utilisation de la végétation ou du relief, ainsi que de moyens de camouflage, peuvent mettre en échec la détection.

Les obscurcissants

L'usage d'obscurcissants est de nature à gêner la détection par un drone du canon en déplacement. Le CAESAR 8x8 peut être équipé de lanceurs de fumigènes.

Cependant, si camoufler le canon est une chose, il ne lui est pas possible de

manœuvrer pour changer rapidement de position tout en restant à l'ombre de son écran de fumée contrairement à un blindé ou un véhicule de combat d'infanterie ou de transport de troupes.

Le leurrage

Des leurres automoteurs, éventuellement contrôlés par radio ou GPS, permettent d'imiter de manière réaliste les véhicules. Ces leurres présentent des signatures infrarouges (IR) et des surfaces équivalentes radar crédibles et peuvent tromper les forces ennemis.

L'émission d'une impulsion électromagnétique (IEM)

L'émission d'une impulsion électromagnétique peut détruire de nombreux appareils électriques et électroniques non protégés dans une zone de quelques dizaines à quelques centaines de mètres, dont les drones. Son emploi n'est possible contre un drone ou des drones en essaim qu'à une distance suffisante du canon à protéger afin d'éviter son endommagement.

Les lance-filets

Leur portée est faible, mais sans doute suffisante pour l'autoprotection d'une pièce d'artillerie.

L'emploi d'un drone intercepteur

C'est une opération trop complexe à mettre en œuvre pour une fonction d'autoprotection.

La destruction du drone ou la neutralisation de ses capteurs par une arme laser

La performance est obtenue :

- par la finesse du faisceau laser couplée à une performance élevée de poursuite qui permettent le dépôt d'une densité de puissance forte sur la cible sans nécessiter une puissance laser importante ni un groupe de refroidissement imposant ;
- et par le maintien de la tache sur la cible.

L'effet thermique sur la cible est atteint après quelques secondes; ce délai est compatible avec une action d'autoprotection d'une pièce d'artillerie.

Son aptitude à protéger « tous azimuts » la pièce d'artillerie est intéressante, de même que sa rapidité de mise en œuvre.

Un tel dispositif, qui nécessite d'être associé à un moyen de détection des drones et disposer d'une protection contre le souffle du tir, est crédible, comme le montrent les travaux récents de CILAS avec le développement de HELMA-LP, annoncé comme efficace jusqu'à 500 m. Des essais ont déjà été conduits avec certaines unités du Commandement des opérations spéciales sur des distances dépassant la portée théorique. La réduction de la masse et du volume permettrait de se rapprocher des dimensions d'un lance-roquette portable, compatible d'une installation pour l'autoprotection d'une pièce d'artillerie.

L'éblouissement de l'optique du drone peut se contenter d'un laser de plus faible puissance.

La suppression de la menace par arme de petit calibre

De même que l'on installe sur les deux nouveaux véhicules de l'armée de Terre (GRIFFON et JAGUAR) un tourelleau équipé d'une arme de petit calibre (12,7 ou 7,62) pour contribuer à son autoprotection, leur installation sur une pièce d'artillerie dans un but de lutte anti-drones est envisageable. Le CAESAR 8x8 peut, d'ailleurs, être équipé d'une arme secondaire.

Un fusil à pompe tel que l'Escort BTS 12 pouvant tirer en mode semi-automatique avec des cartouches contenant 160 billes de tungstène permettrait de réaliser des tirs de saturation contre un drone à courte portée (50 m, voire davantage avec le fusil à pompe Benelli Supernova).

La suppression de la menace par un dispositif actif dédié

Un tel dispositif est constitué de systèmes de détection de la menace (radar, visible, infrarouge), et d'un système d'interception. Ce dernier, dans le cas d'une menace de type drone, pourrait projeter une gerbe de billes dans la direction d'attaque.

Le projet de technologie de défense Prometheus (Nexter et Thales) vise à mettre au point un système de protection globale des blindés en combinant trois technologies : la protection passive polyvalente, la protection réactive et la protection active. Il pourrait équiper les blindés français (EBRC Jaguar, VBMR Griffon, VBMRL Serval, VBCI et char Leclerc) à partir de 2026. Une adaptation pour l'autoprotection des canons d'artillerie face aux drones pourrait être envisagée sous réserve que l'encombrement et le poids restent dans des limites acceptables pour la fonction recherchée ici (le système israélien TROPHY pèse environ 2,2 tonnes).

Enfin, la présence éventuelle de l'équipe de pièce à l'extérieur à proximité du canon rend l'emploi de ce type de dispositif problématique.

PROSPECTIVE ARTILLERIE
— 5 — *POINTS DE FOCALISATION ILLUSTRATIFS*

La suppression de la menace par l'armement principal de la pièce d'artillerie

Peut-on imaginer une munition tirée par le canon et capable de détruire un ou plusieurs drones menaçant la pièce d'artillerie ?

Il faut distinguer deux cas : la menace drone qui vient de la direction principale de la menace sur le champ de bataille et qui est donc grossièrement celle des tubes, et un second type de menace qui est tous azimuts du fait de l'agilité des drones une fois parvenus sur leur zone d'attaque.

Dans le premier cas, on peut envisager de les traiter avec des projectiles adaptés et le débattement des tubes peut sans doute suffire. La mise en direction d'un canon tel que le CAESAR se fait principalement en orientant le camion porteur dans la direction du tir, la capacité de pointage en gisement de l'arme une fois le porteur à l'arrêt est limitée : dans le cas du CAESAR 8x8, elle est de ± 530 millièmes ($\pm 30,0^\circ$).

Mais lorsque la menace drone provient de n'importe quelle direction, les pièces d'artillerie équipées d'une tourelle sont seules en mesure de s'orienter rapidement face à la menace drone.

Certains missiles antimissiles sont équipés de têtes transportant des billes, barreaux ou fléchettes qui se dispersent à partir du point d'explosion en un cône qui va toujours grandissant dans le prolongement de la trajectoire du projectile avant son explosion.

Le char Leclerc dispose de munitions 120 CAN pour sa défense rapprochée ; l'obus projette à 1410 m/s un nuage de 1100 billes en tungstène, sa portée maximum est de 500 m.

On peut imaginer un obus canister au calibre 155 mm qui projetterait un nuage de 1500 billes en tungstène dans la direction du drone ou de l'essaim de drones.

Bien que les tubes d'artillerie de 155 mm soient rayés, la vitesse de rotation du projectile de l'ordre de 40 à 50 tours par seconde en sortie de bouche pour une Vo de 800 m/s ne conduit pas à une dispersion des billes rédhibitoire. Avec une Vo de l'ordre de 250 m/s, la gerbe de billes — en dehors de tout dispositif d'accroissement de la dispersion — produirait une ouverture de la gerbe de l'ordre de 1 degré et donc pour un obus projetant 1500 billes, à une densité de billes de l'ordre de 5 par mètre carré à 500 m, 2 secondes après le tir. À cette distance, la gerbe de billes couvre une zone de 9 m de rayon, sans doute trop faible pour détruire un essaim, mais suffisante face à un drone unique volant en direction du canon. Mais si le drone est téléopéré, une évasive lui permettrait d'échapper à la gerbe de billes, compte tenu de la vitesse du drone (de l'ordre de 30 m/s).

Une analyse du délai entre la détection du drone ou de l'essaim et l'interception est nécessaire, prenant en compte la mise en direction du canon, la préparation et le chargement de la munition canister et le tir.

Conclusion

Les pistes semblant les plus intéressantes pour assurer l'autoprotection d'une pièce d'artillerie sont :

- face aux tirs de contre-batterie : la faible durée de l'action de tir;
- face aux drones et essaims de drones : le brouillage et l'installation d'un armement secondaire.

Étude sur la conception d'un canon électromagnétique mobile

Au stade actuel des travaux et à l'horizon de l'étude, la conception d'un canon électromagnétique terrestre mobile n'est pas envisageable. La source d'énergie nécessaire nécessiterait plusieurs camions.

Seule l'application navale (attaque vers la terre, destruction de drones d'attaque, destruction de drones navals, destruction de missiles antinavires subsoniques ou de missiles balistiques hypervéloces) paraît envisageable à l'horizon 2035-2040.

Étude d'un système de drone projetable sur sa zone d'action

Intérêt du déploiement de drones par une munition d'artillerie

Les drones, tels que ceux que l'on peut envisager de déployer en essaims, sont des drones légers, ayant de ce fait une portée ou une autonomie sur zone réduite. Pour un drone ayant une autonomie de 30 minutes et se déplaçant en transit à 100 km/h, il mettra 18 minutes pour rejoindre une zone d'intérêt à seulement 30 km et ne pourra y fonctionner que 12 minutes. Le même, déployé par une munition d'artillerie, sera positionné au-dessus de la zone d'intérêt (jusqu'à la portée maximale de la munition d'artillerie) en quelques minutes et disposera ainsi de l'intégralité de son autonomie sur zone (30 minutes).

L'obus cargo à munitions téléopérées

Description du concept

Il s'agit d'envisager une munition d'artillerie cargo non guidée qui puisse livrer à sa portée utile un module téléopéré compatible avec les caractéristiques du vol de ces projectiles. Après le dépotage d'une salve de munitions au-dessus d'un objectif, un essaim de drones se forme. Cet essaim est constitué de quelques drones de communication qui assurent le relais radio, de quelques drones d'observation de la zone d'objectifs attaqués d'une majorité de munitions téléopérées (MTO). Par exemple, une salve de 40 coups mettant en œuvre un essaim de 3 drones relais, 6 drones d'observation, 31 modules dronisés d'attaque de type MTO.

Le mode d'action est le suivant, l'essaim se constitue automatiquement après le dépotage, les modules relais prennent de l'altitude, les drones d'observation se répartissent à la verticale de la zone d'objectif. Dès que la communication est établie, l'opérateur entre dans la boucle et valide les objectifs détectés, les modules d'attaques sont activés, ils enregistrent la désignation de leur cible validée et l'attaque est prononcée. En fin d'attaque, les modules d'observation rendent compte des résultats de l'attaque dans une logique de BDA (*battlefield damage assessment*), puis en fonction de leurs caractéristiques, soit s'autodétruisent, soit se posent avec les modules relais pour constituer des points d'observation ou de relais au sol. La vie de l'essaim peut être limitée à l'action des engins apportés par la première salve ou prolongée par des coups tirés sur la même zone pour en prolonger ou étendre l'action. Cette même action peut être complétée par des tirs d'efficacité ou de précision bénéficiant de la présence des modules d'observation.

Avantages du concept

Cette hybridation de munitions d'artillerie non guidées avec des modules dronisés permet de tirer parti de la résistance de ces munitions cargo au brouillage électromagnétique et laser et de n'exposer les modules qu'après le dépotage durant peu de temps et sur la zone des objectifs. Par ailleurs, la création d'un essaim multifonctions permet un pilotage de la fonction feu de l'essaim préservant l'homme dans la boucle de décision pour le choix des objectifs et leur traitement. D'un point de vue technologique, les munitions cargo existent et les industriels maîtrisent leur fabrication, la conception de modules compatibles d'un emport par obus et roquettes dépend pour une part de solutions technologiques défrichées lors de la conception des munitions BONUS.

Points durs à lever

Le concept invite à développer deux principaux domaines, la constitution d'un essaim et son télépilotage et la conception des modules dronisés de communication, d'observation et d'attaque embarqués dans les obus ou roquettes cargos.

Le télépilotage d'un essaim est aujourd'hui maîtrisé par des spécialistes des spectacles aériens depuis quelques années et ce savoir-faire se développe et se diffuse rapidement de manière universelle. Toutefois, ces ballets de drones utilisent des drones à la trajectoire préprogrammée sans intervention de modification du « plan de vol » au cours du spectacle. Le télépilotage d'un essaim de drones à vocation létale est un pilotage d'ensemble dont la maîtrise dans une logique éthique exige le développement de techniques qui restent aujourd'hui à approfondir. La résistance de l'essaim de drones au brouillage constituera également un défi à relever.

La conception des différents modules dronisés constitue le principal défi du concept. Comme rappelé ci-dessus, la maîtrise des modules BONUS constitue une base de connaissance solide et les technologies des sous-ensembles concernés ont beaucoup évolué depuis les années 1990, en particulier la miniaturisation de l'électronique et la tenue à l'accélération lors du tir. Les études menées pour la conception des modules intégrés aux missiles hypersoniques peuvent sans doute servir le projet. Dans un premier temps on considérera qu'un seul MTO sera emporté dans un obus cargo, par la suite, les progrès de la miniaturisation permettront d'envisager des obus cargo emportant plusieurs drones.

La roquette guidée à têtes éjectables autoguidées et multiples (TEAM)

Description du concept TEAM

Il s'agit de doter une roquette guidée de capacités très significativement accrues d'efficacité sur l'objectif, d'insensibilité aux contremesures et de pénétration des défenses sol-air en la munissant de plusieurs (typiquement trois) têtes éjectables autoguidées et multiples (TEAM). Une fois larguée par la roquette à quelques kilomètres de l'objectif, chaque TEAM est capable d'une trajectoire préprogrammée en direction de l'objectif puis autoguidée jusqu'à faire impact sur un sous-ensemble de l'objectif attaqué, par exemple l'un des conteneurs quand il s'agit d'un poste de commandement ou l'un des véhicules quand il s'agit d'une batterie sol-air.

Un véhicule TEAM est un petit véhicule aérien autoguidé sans homme dans

la boucle (longueur inférieure au mètre, masse de l'ordre de 15 kg) pré-guidé au moyen d'une référence inertielle bas coût et enfin guidé jusqu'à l'impact grâce à un imageur optronique.



Ses senseurs inertIELS et d'imagerIE sont bas coûT, faisant appEl aux technologies civiles, telles que celles des équipementiers de l'automobile.

Le senseur optronique est doté d'un traitement d'images avancé dont l'architecture émulant celle d'un réseau neuronal lui offre une capacité de reconnaissance automatique de cibles. Lors de sa conception, le réseau de neurones subit un entraînement massif sur une banque d'images semblables à celles des objectifs attaqués dans tous les contextes envisageables. Cet apprentissage profond le rend capable de reconnaître toute cible d'intérêt en tirant parti des progrès des techniques d'Intelligence artificielle (IA).

Enfin, doté d'une charge militaire multi-effets et d'une fusée d'impact électronique, un véhicule TEAM est capable de transpercer toute cible semi-durcie puis de produire un effet létal après traversée de l'enveloppe de la cible.

Avantage du concept

Capacité de pénétration des Défenses sol-air (DSA) de l'objectif

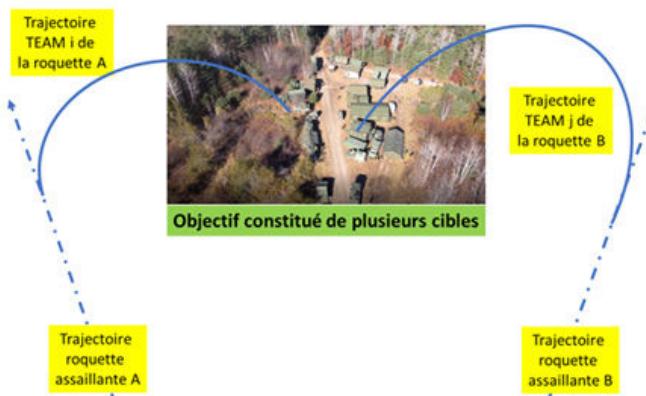
Une roquette guidée classique est vulnérable aux DSA de l'objectif de type *Counter-Rocket Artillery Mortar* (C-RAM) en raison, d'une part, de sa détectabilité par les radars d'alerte dans la première partie de sa trajectoire et, d'autre part, de son Mach terminal relativement limité (inférieur à 2) ainsi que de sa faible capacité de manœuvre pour se dérober en phase finale.

En revanche, une roquette TEAM peut suivre une trajectoire balistique présentant une importante distance nodale par rapport à l'objectif visé qui diminue considérablement l'efficacité de la DSA dudit objectif.

À plusieurs kilomètres de l'objectif, la roquette mère disperse ses TEAM qui suivent des trajectoires préprogrammées en direction des cibles constitutives de

l'objectif, puis les acquièrent au moyen de leur capteur optronique jusqu'à faire impact sur elles pour produire des dégâts dévastateurs.

Il convient de noter que ce type de trajectoire d'attaque commençant par une importante distance nodale est la base des tactiques utilisées par les missiles antinavires pour franchir les défenses surface-air qui leur sont opposées.



Les objectifs attaqués (PC, batteries Sol-Air...) constituant des objectifs de valeur dans la profondeur, ils méritent d'être attaqués par plusieurs roquettes TEAM afin de diviser les moyens de défense de l'adversaire.

Insensibilité aux contre-mesures électromagnétiques

L'efficacité militaire du concept TEAM ne nécessite pas une grande précision de navigation de la roquette mère.

En effet, il lui est seulement demandé d'approcher la zone de l'objectif avec une précision de quelques centaines de mètres, puisque l'impact sur les cibles constitutives de l'objectif est à la charge des véhicules TEAM qui sont autoguidés sur imagerie. Le guidage optronique avec acquisition de cible est réalisé par réseau neuronal entraîné sur une vaste base de données images en extension permanente du fait des capacités des capteurs photographiques et de leur multiplication.

Pour cette raison le concept TEAM n'est pas sensible aux brouilleurs électromagnétiques qui protègent les objectifs de valeur vis-à-vis des assaillants utilisant des moyens satellitaires pour leur guidage.

Insensibilité au camouflage des cibles

Comme on l'a vu précédemment, le réseau de neurones subit un entraîne-

ment massif sur des images réelles et des images synthétiques générées par les techniques d'IA. Cet apprentissage profond rend le réseau neuronal capable de reconnaître toutes les cibles d'intérêt (qu'il s'agisse d'un conteneur constitutif d'un Poste de Commandement, d'un *Tactical Operational Center* [TOC], d'une batterie sol-air, d'un véhicule lanceur de munitions sol-air ou d'une citerne d'un dépôt logistique...), malgré leur diversité et la diversité des environnements naturels et artificiels, y compris les moyens de camouflage mis en œuvre par l'adversaire.

Ainsi, le concept TEAM est insensible aux techniques de camouflage optronique hors leurrage.

Efficacité sur l'objectif

Les objectifs de valeur situés dans la profondeur, Poste de Commandement, Batterie sol-air, Dépôt logistique... sont des objectifs étendus constitués de multiples cibles élémentaires, conteneurs, véhicules, citernes...

Ils pourront être mis hors de fonction par un nombre réduit de roquettes grâce à la multiplicité des véhicules TEAM dispersés.

Maturité du concept

Le concept TEAM suppose de mettre en système des technologies disponibles (roquette guidée, petit véhicule aérien piloté, senseurs inertIELS et d'imagerie bas coût d'origine civile, traitement d'images utilisant les techniques de l'Intelligence artificielle, charges militaires multi-effets) ou des technologies qui furent maîtrisées, mais n'ont plus été mises en œuvre depuis quelques décades (dispersion de charges depuis roquettes en supersonique).

La maturité du concept est grandement aidée par le fait que l'environnement mécanique subi par les véhicules TEAM est incomparablement moins sévère que celui qui serait subi dans le cas d'un emport par obus cargo.

Enfin, il convient de noter que la variété des technologies à combiner fait de la roquette TEAM un thème propice à une coopération entre deux ou trois Nations réunies par une volonté commune d'acquérir un outil de supériorité dans la bataille des feux dans la profondeur.

Déploiement par un drone porteur

Un drone à voilure fixe de la classe 50 kg est en mesure d'emporter une charge utile de 15 kg. Sa portée est de l'ordre de 300 km si on veut le récupérer, et de 800 km si on accepte sa perte. Sa vitesse est de l'ordre de 100 km/h.

Il pourrait emporter une dizaine de micro-drones ayant chacun une autonomie

de l'ordre de 30 minutes et portant une charge militaire de 200 g.

Conclusion

Pour les obus comme pour les roquettes, la technologie des applications cargo est parfaitement maîtrisée et la grande expérience enregistrée en ce domaine mérite d'être exploitée. Les munitions dronisées de type munitions téléopérées vont poursuivre leur développement comme décrit ci-dessus et donner lieu à des réalisations étonnantes pouvant occasionner des surprises tactiques du fait de leurs trajectoires curvilignes imprévisibles. Toutefois, leur vulnérabilité aux moyens d'artillerie sol-air eux-mêmes en progrès, la fragilité de leurs liaisons face au brouillage des télécommunications et l'exposition de leur électronique embarquée au rayonnement des armes à énergie dirigée réduisent leurs capacités d'action et ce phénomène déjà constaté sur le terrain va s'amplifier.

Deux tendances découlent de cette vulnérabilité au brouillage : d'une part les munitions téléopérées pourront être délaissées pour des munitions autonomes. D'autre part ces munitions seront de plus en plus souvent utilisées en essaim pour bénéficier de la résilience offerte par une formation de modules interagissant et remplissant leur mission de manière coordonnée.

Cette fragilité des drones durant leur traversée du champ de bataille dans sa profondeur pour atteindre leur zone d'objectifs alors qu'ils présentent tant d'intérêt au moment de l'attaque constitue un dilemme qui peut être levé en s'inspirant des deux solutions proposées dans la seconde partie de l'étude.

Sans revenir sur la description des deux systèmes obus ou roquettes et sans préjuger de leur réalisation que le groupe de travail recommande, on peut dès à présent envisager deux concepts pour leur emploi opérationnel éventuel dans une logique de formation d'un essaim d'attaque au-dessus de la zone d'objectif.

- Le premier réside en une utilisation de manière supervisée. Les modules de télécommunication, d'observation et d'attaque sont pilotés dès que l'essaim est formé, le choix des cibles est validé par les opérateurs du système grâce à une liaison radio établie de manière fugace au moment de l'attaque et maintenue momentanément durant la mission de l'essaim sur zone.
- Le second consiste en une action décentralisée, le système remplit sa mission de manière totalement automatique sans que l'homme soit dans la boucle. Dans ce dernier cas, le système devient totalement insensible au brouillage des télécommunications.

Dans le cas français, il apparaît aujourd'hui que la solution en mode supervisé serait de nature à garantir le respect des règles éthiques tout en assurant une

forte efficacité à ces tirs de saturation discriminée. En effet, ces moyens nouveaux associés à ce mode d'action en essaim apporteraient des perspectives nouvelles à la manœuvre des feux. Cette manœuvre basée sur une maîtrise locale des trajectoires permettrait dans un proche avenir de couvrir de larges zones en traitant efficacement des objectifs détectés reconnus et identifiés avec une véritable souplesse dans l'utilisation de capacités déjà détenues pour une grande partie. Quant à la solution totalement automatique, elle est utilisable dès lors que les objectifs attaqués sont suffisamment séparés des implantations civiles pour restreindre les risques de dégâts collatéraux à un niveau compatible avec les règles d'engagement.

Étude d'un système de missile hypersonique

Le premier type de missile sol-sol hypersonique envisageable consiste en un véhicule :

- mis en vitesse par propulsion anaérobie;
- puis, effectuant l'essentiel de sa trajectoire hors de l'atmosphère;
- enfin, entrant dans l'atmosphère avec une pente contrôlée pour éviter une élévation de température trop importante.

Le missile russe Orechnick est un exemple de ce concept.

Une telle trajectoire ne permettant pas de rejoindre un objectif situé à moins de 1 000 km en raison de sa partie exoatmosphérique, ce type de missile hypersonique ne peut remplir de mission d'artillerie tactique ou opérative. Il est, en revanche, adapté aux applications sol-sol stratégiques.

Le second type de missile sol-sol hypersonique envisageable consiste en un véhicule effectuant une trajectoire endoatmosphérique grâce à une propulsion par statoréacteur à combustion supersonique.

Le missile russe ZIRCON est, à ce jour, le seul missile de ce type en service.

La complexité et le coût de la technologie de propulsion par statoréacteur à combustion supersonique cantonnent également ce second concept aux applications sol-sol stratégiques.

— 6 —

Aspects industriels

Capacités industrielles

Comme on l'a vu, l'acquisition de la supériorité des feux dans la profondeur nécessite de gagner la confrontation entre les munitions sol-sol, de tous types, et les missiles antiaériens. Or l'espoir que des produits plus performants peuvent permettre d'acquérir une supériorité opérationnelle et de l'emporter rapidement devient de plus en plus vain.

Dans un conflit majeur et long, cette confrontation dépend donc des capacités industrielles de chacun des deux adversaires.

Une des clés de ces capacités réside alors dans la disponibilité des matières premières et composants critiques, et dans l'accès à une énergie abondante et bon marché pour transformer ces matières premières en composants.

L'autre clé repose sur une Base industrielle et technologique de Défense (BITD), française ou européenne, revue dans une logique de souveraineté, donc de non-dépendance. Elle doit donc être solide et complète (sites de conception avec leurs scientifiques et ingénieurs et sites de production avec leurs ingénieurs, techniciens et compagnons) pour concevoir, développer et qualifier les systèmes, équipements et composants, puis assembler en série les composants en équipements et intégrer ces derniers en systèmes cohérents. Plus boucle courte

De ce fait, pour assurer la parité avec ses concurrents stratégiques dans la bataille des feux dans la profondeur et, plus généralement, en matière de conflit conventionnel, les pays européens doivent se ménager un accès à des ressources minérales et énergétiques abondantes et abordables, renforcer leur BITD et remettre les sciences, les techniques et l'esprit de défense au centre de leur système éducatif.

Spécificités des systèmes d'artillerie à effet canon

Le conflit de l'Ukraine, même si la France n'y a pas participé directement, peut illustrer les problématiques particulières relatives aux capacités industrielles de ce secteur.

Concernant les canons du CAESAR, la cadence de production était de 2 par mois avant le conflit de l'Ukraine, notamment pour satisfaire les nombreux contrats export. Elle est passée à 8 par mois pour contribuer aux demandes de l'Ukraine, notamment grâce au passage en 2 x 8, voire 3 x 8 sur certains postes. On peut donc quantifier à 10 par mois la cadence maximum accessible en passant en 3 x 8 sur tous les postes et en donnant une certaine priorité à ce type de canon au sein même de la canonnerie. Ce ne devrait pas être suffisant pour une économie de guerre, et il faudra également pouvoir réduire la durée de cycle, encore aujourd'hui un peu supérieure à un an en incluant la réalisation des ébauches de tube et de culasse, même si celle-ci a été fortement réduite ces dernières années.

Concernant les munitions de 155 mm, la cadence de production de KNDS Ammo était de 2 000 par mois avant le conflit de l'Ukraine. Elle est passée à un potentiel de 10 000 par mois, mais celui-ci est fortement dépendant de l'approvisionnement en ébauches de corps forgés et en explosif, pour contribuer aux demandes de l'Ukraine. Ceci a pu être obtenu grâce à l'investissement d'un deuxième centre automatisé d'usinage et de ceinturage des corps d'obus en France et d'un troisième en Belgique, ainsi que grâce à l'utilisation d'une installation de coulée d'explosif en Italie.

Mais pour faire face aux besoins d'une économie de guerre, il faut maîtriser l'ensemble de la chaîne, et donc impérativement investir dans les moyens qui constituent aujourd'hui des goulets d'étranglement : réalisation des blocs Base Bleed, poudre propulsive et étuis pour charges modulaires. Une solution peut aussi être que KNDS Ammo France, en tant que maître d'œuvre, conclue des partenariats avec d'autres fournisseurs stratégiques.

Spécificités des systèmes de missiles sol-sol

Les roquettes guidées et les missiles balistiques de courte portée, d'un côté, et les missiles antiaériens, de l'autre, mobilisent des équipements de propulsion, de légalité et de guidage intégrant des composants technologiquement complexes, à savoir, notamment, des blocs de propergol solide, des chargements d'explosifs composites, des microprocesseurs et des structures en aciers spéciaux.

GOCO (*Government Owned – Company Operated*), une piste à explorer ?

En ce qui concerne les munitions d'artillerie tirées par canon et dans une logique d'économie de moyens, les quantités à produire seront toujours des quantités nécessaires pour la dotation de l'Armée française, pour le temps de paix, et pour faire face à un début de conflit.

Par ailleurs, les drones constituent un domaine en évolution technologique rapide. Il est de ce fait peu avisé de constituer des stocks qui se révéleraient rapidement obsolètes. Or, en cas de survenue d'un conflit de haute intensité, il doit être nécessaire de disposer de capacités de production de masse, mobili-sables à court préavis.

Pour répondre rapidement à l'augmentation des volumes de production, les entreprises ont besoin d'installations, d'équipements, d'outillages, de matières premières et d'une main-d'œuvre qualifiée.

Mais, d'une part, les grandes entreprises subissent une forte pression de leurs actionnaires pour un retour sur investissement aussi certain que possible et, d'autre part, les petites entreprises ne peuvent pas se permettre les coûts initiaux importants nécessaires à la mise en place de l'infrastructure de produc-tion nécessaire.

Quelles que soient les promesses de commandes annoncées, les entreprises hésitent à investir dans des lignes de production capables de produire en masse, car elles craignent que le ministère des Armées, Bercy ou le parlement réduise les commandes ou que le monde change et que la défense ne soit plus une priorité aussi forte. Les exemples abondent de réduction de cibles et d'étalement dans le temps de la production.

Au-delà des investissements en capital, les délais entre la notification d'un marché et la livraison des matériels ne permettent pas de répondre à un besoin urgent si les moyens de production n'existent pas. La création *ex nihilo* d'une chaîne de production, l'approvisionnement de composants à délais de livraison longs ou sujets à des restrictions d'accès peuvent empêcher les chaînes de production de monter rapidement en puissance. Le recrutement et la formation des personnels nécessaires à la mise en œuvre des moyens de production constituent également des freins à une montée en cadence de production rapide.

Une solution proposée par les auteurs est de réfléchir sur le concept de GOCO (*Government Owned – Company Operated*) utilisé aux États-Unis depuis

la Seconde Guerre mondiale pour la défense (fabrication du F-35, fabrication de munitions) ainsi que ,plus récemment, pour la production de vaccins, et examinée par d'autres pays, tels que l'Inde.

Dans ce modèle, l'État investit dans des installations qui garantissent la sécurité nationale et créent des emplois et les actifs appartenant donc à l'État sont exploités par des entreprises privées. Les missions sont définies par le ministère, et le secteur privé bénéficie d'une totale indépendance pour les mettre en œuvre en appliquant ses meilleures pratiques. Celles-ci n'ont pas besoin d'investir dans les terrains, les bâtiments et les outils de production. Ces installations, si elles demeurent sous-employées, ne pèsent pas sur les comptes des entreprises. Le risque lié au sous-emploi de ces moyens industriels repose donc alors sur l'État. Cela ne résout pas complètement le problème de la main-d'œuvre. Colbert avait en son temps développé les arsenaux pour s'adapter à ce type de contrainte telles qu'elles apparaissaient déjà à son époque, mais cette solution n'est plus adaptées au fonctionnement actuel de l'économie des pays développés..

Le même mécanisme de financement par l'État peut être mis en œuvre pour les ressources stratégiques et les composants à long délai d'approvisionnement afin de permettre un démarrage rapide de la production de masse.

L'entreprise contractante doit aussi être financée pour garantir la disponibilité d'une main-d'œuvre qualifiée mobilisable pour la production (« réserve »).

Une attention doit être également portée aux sous-traitants afin qu'ils puissent, eux aussi, monter en cadence de production rapidement.

Si l'entreprise remporte des contrats à l'export qui nécessitent la mise en œuvre de l'installation et que celle-ci est sous-utilisée et donc disponible, une redevance serait versée à l'État pour l'utilisation des moyens de production dont il est propriétaire.

Les réflexions actuelles sur la défense, tant en France qu'au niveau européen, pourraient aborder la question de l'évaluation de l'intérêt des GOCO et de leur financement en France et en Europe.

GOCO ou autre formule, l'État (ou l'UE) est par nature forcément impliqué dans cet aspect industriel, il est le seul client direct, il a droit de veto sur les exportations, le caractère cyclique de cette industrie est sans commune mesure avec les autres industries, un seul exemple, la consommation (et donc malgré d'éventuels stocks importants) peut être multipliée par un facteur voisin de 100 dès les premiers jours d'un conflit, ce qui en temps de paix est un investissement, devient consommable (chars, etc.)

Recommandations

Préparer la détermination du futur standard de l'artillerie à effet canon, par des échanges avec nos principaux alliés et par des études amont expérimentales, nationales dans un premier temps.

Mener des études système permettant de faire des choix de variantes d'obus (à propulsion additionnelle ou pas, à correction de trajectoire 1D ou 2D ou pas...), mais conserver la complémentarité entre obus guidés et non guidés pour pouvoir traiter différentes cibles dans une plus grande profondeur.

Étudier plus avant, en coopération avec des partenaires européens, le concept TEAM de roquette guidée délivrant plusieurs petits véhicules aériens autoguidés sans homme dans la boucle (préguidage au moyen d'une référence inertie bas coût et guidage jusqu'à l'impact grâce à un imageur optronique capable de reconnaissance automatique de cibles par utilisation de l'Intelligence artificielle).

Lancer une réflexion sur la création de moyens industriels en « GOCO » pour la production de certains produits en vue de faire face à une économie de guerre.

Conclusion

L'artillerie, portant l'effet militaire à distance, est un domaine qui a toujours provoqué la rencontre d'ingénieurs, voire d'architectes avec des guerriers. Les évolutions de cette arme sont étroitement liées aux découvertes scientifiques; ainsi, après les armes de jet de l'antiquité et du bas moyen âge, le haut moyen-âge et la Renaissance ont vu naître les premiers canons utilisant les poudres, les XVIIe et XVIIIe siècles, l'apparition des premiers systèmes d'artillerie, le XIXe, l'allonge des trajectoires et les obus à balle. La Première Guerre mondiale a poussé à la maîtrise des trajectoires courbes, des gros calibres et des projectiles à fusées ou à chargements chimiques fumigènes ou toxiques, la Seconde Guerre mondiale a apporté la mobilité aux systèmes, leur spécialisation contre les avions et l'augmentation des portées avec les roquettes et premiers missiles. À la fin du XXe siècle, la chaîne artillerie, avec ses moyens de mesures divers et ses calculateurs, permet de réaliser des tirs d'emblée sans réglage, d'une grande précision avec une concentration efficace des feux de nombreuses batteries.

Au XXIe siècle, les munitions de précision avec autodirecteurs et gouvernes apportent une capacité de tir au but inédite jusqu'à présent. Par ailleurs, les munitions boostées ou autopropulsées ou potentiellement tirées avec des canons électromagnétiques confèrent à l'artillerie une allonge supérieure. Enfin, les drones ou munitions rôdeuses, maraudeuses, pilotés ou autopilotés, donnent la possibilité de créer des trajectoires imprévisibles, tandis que les armes à rayonnement permettent de générer des effets de manière continue et économique. Ces évolutions ne doivent pas faire oublier que les systèmes canon de type CAESAR, avec des projectiles efficaces, peu coûteux et difficiles à intercepter, apportent une rusticité et une facilité de fabrication toujours d'actualité.

Le groupe de réflexion espère que les recommandations et suggestions de l'étude permettront de faciliter les choix qui doivent être faits dès à présent avec réalisme au profit de notre armée. En particulier, un concept d'une munition d'artillerie permettant la saturation discriminée (l'homme restant dans la boucle quand nécessaire) et efficace d'une zone d'objectifs blindés et non blindés est

proposé. Cette suggestion qui se veut innovante et réaliste, mettra à profit des compétences déjà détenues et misera sur les progrès qui ne manqueront pas d'être réalisés à moyen terme dans le domaine des munitions autoguidées ou téléopérées et la formation des essaims de modules aériens robotisés.