

# L'électricité au combat, un enjeu stratégique ?

Tanguy LESTIENNE

Ingénieur en chef de l'armement, auditeur de la 67<sup>e</sup> session du Centre des hautes études militaires (CHEM).

**D**epuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, l'énergie et sa disponibilité sur les champs de bataille des guerres dites modernes sont déterminants aussi bien pour l'emploi des systèmes d'armes <sup>(1)</sup> que pour le soutien des bases avancées. Le cours de la Seconde Guerre mondiale a basculé lors de la bataille de Stalingrad (juillet 1942-février 1943), alors que les forces de l'Axe souhaitaient notamment prendre le contrôle des champs pétrolifères du Caucase pour compenser la faiblesse de leurs ressources. La défaite de Stalingrad et cette faiblesse structurelle de l'Axe en matière d'approvisionnement en carburants seront déterminantes pour la victoire des Alliés deux ans plus tard.

L'accès à l'énergie sur le champ de bataille reste un sujet majeur pour assurer la continuité des effets militaires. Il se cristallise aujourd'hui principalement autour de l'approvisionnement en carburant sur les zones d'engagement. L'enjeu est à la fois de ravitailler les véhicules terrestres, les moyens aériens ou navals, mais également de produire l'électricité nécessaire aux bases avancées ou aux systèmes d'armes électriques. Les Armées françaises, au travers du Service des essences des Armées, ont mis en place un réseau d'acheminement, de stockage et de distribution qui permet de sécuriser la conduite des opérations extérieures, en minimisant au maximum les points de vulnérabilité.

Si l'on se projette dans les dix à quinze ans, avec l'explosion de la numérisation et de la connectivité de nos systèmes d'armes, ainsi que de la forte montée en puissance de la mobilité électrique dans tous les milieux, il est probable que l'on assiste à une très forte hausse du besoin en énergie électrique en opération, alors même que l'utilisation, et donc la disponibilité des carburants classiques sera en diminution, notamment sous l'effet des politiques internationales sur le développement durable. Cette tension touchera bien évidemment l'ensemble des secteurs civils et militaires, et il semble admis aujourd'hui que la défense s'appuiera très largement sur le secteur civil pour tout ce qui concerne la recherche et le développement de nouvelles capacités de production et de stockage d'énergie électrique <sup>(2)</sup>. Cette « sous-traitance » de la défense vers le civil,

(1) Dans ce document, un système d'arme est défini par tout matériel nécessaire à préparer, projeter ou conduire une opération militaire (aéronef, blindé, navire, missile, système de commandement), ainsi que par les matériels de soutien associés (simulateur, banc de tests, outillage, documentation...).

(2) La Direction générale de l'armement (DGA) ne s'interdit cependant pas de réaliser certains travaux de recherche et développement (R&D) liés aux particularités l'environnement militaire.

qu'elle soit acceptée ou subie, a pour conséquence que très peu de travaux de niveau académique existent sur l'enjeu de l'alimentation électrique des systèmes d'armes futurs, ce qui en fait probablement un sujet émergent <sup>(3)</sup>.

L'innovation et les technologies de rupture doivent permettre à nos Armées de garder, dans la durée, un avantage décisif sur nos ennemis, et faire la différence sur le terrain. Intégrées dans nos systèmes d'armes, leur autonomie et la capacité des forces à les utiliser dans la durée sont probablement des enjeux aussi importants que leurs performances opérationnelles. L'objet de cette étude est donc de s'intéresser plus particulièrement aux enjeux liés à la place grandissante de l'énergie électrique dans les systèmes d'armes futurs, et de se poser la question si nous devons accompagner le développement et l'utilisation de ces matériels par une stratégie plus large sur la production, l'acheminement, le stockage, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique pour nos systèmes d'armes en opération, au-delà ou en complément des travaux réalisés par le secteur civil dans ce domaine.

### Situation actuelle et difficultés sur le terrain

« Si les Alliés ne veulent pas perdre la guerre, il faut que la France combattante, à l'heure suprême du choc germanique, possède l'essence aussi précieuse que le sang dans les batailles de demain ». C'est en ces termes que Clemenceau s'adresse au président Wilson le 15 décembre 1917 pour obtenir 100 000 tonnes de carburant pour alimenter la machine de guerre française à un moment charnière de la Première Guerre mondiale <sup>(4)</sup>. Si l'aide américaine est au rendez-vous, cet événement fait prendre conscience aux responsables français du besoin de réduire cette vulnérabilité énergétique grâce à une politique sur les ressources pétrolières qui aboutira en 1924 à la création de la Compagnie française des pétroles, future Total <sup>(5)</sup>.

Cette politique, qui a permis de sécuriser les approvisionnements de pétrole en France, continue à garantir à nos Armées indépendance et liberté d'action. Aujourd'hui, même si nos Armées dépendent encore très fortement des carburants, les sources d'énergie sont plurielles, et il convient de s'intéresser à leur gestion au sein du Ministère, et notamment celle de l'électricité.

### Références documentaires

Au sein du ministère des Armées, très peu de documents traitent de la gestion énergétique des emprises ou des matériels du ministère. Le Secrétariat général pour l'administration (SGA), au travers de la Direction du patrimoine, de la mémoire et des archives (DPMA) a rédigé récemment une stratégie énergétique pour l'infrastructure de la défense <sup>(6)</sup>. Ce document, qui complète et élargie une première stratégie de ce type

(3) Si la question de la mobilité électrique a fait l'objet de développements spécifiquement militaires dès le début du XX<sup>e</sup> siècle, elle ne s'est cristallisée que sur les sous-marins.

(4) MURAT Didier, *L'intervention de l'État dans le secteur pétrolier en France*, Technip, 1969, p. 16.

(5) Ce tournant n'est d'ailleurs pas le premier, car il suit celui pris près d'un siècle plus tôt pour sécuriser les approvisionnements de charbon pour les bâtiments à vapeur de la Marine nationale.

(6) Stratégie ministérielle de la performance énergétique 2018-2023.

élaborée en 2012, donne une visibilité très claire sur les cinq années qui viennent en termes de performance énergétique, de politique d'achat, d'autonomie, et d'analyse sur la place de l'électricité concernant les infrastructures de la défense en métropole. Elle est basée sur une connaissance fine de la consommation énergétique <sup>(7)</sup>, prérequis indispensable pour construire toute stratégie en matière de politique d'achat et de maîtrise des consommations énergétiques des infrastructures.

Toujours dans le domaine des infrastructures, mais concernant les opérations extérieures (Opex), deux initiatives récentes s'intéressent au sujet de l'énergie. La première, pilotée par l'État-major des Armées (EMA), a pour objet de rédiger une politique d'alimentation en énergie des bases opérationnelles et des postes de commandement en opération <sup>(8)</sup>. Elle concernera l'ensemble des Armées, directions et services et sera promulguée début 2019. La seconde est pilotée par la Direction générale de l'armement (DGA), et s'intéresse plus précisément à l'énergie électrique consommée et à son optimisation sur les théâtres d'opération. Il s'agit d'une Étude technico-opérationnelle (ETO) dont l'objectif est d'identifier les facteurs dimensionnants pour réduire la dépendance des forces terrestres en Opex vis-à-vis des capacités de production et d'acheminement de l'énergie électrique ainsi que de l'empreinte logistique associée. Les conclusions de cette ETO, appelée *Énertop* <sup>(9)</sup>, seront rendues fin 2019.

Enfin, concernant le domaine des systèmes d'armes, aucun document de référence n'a pu être identifié pour les Armées françaises. Par contre, un document particulièrement intéressant concernant ce domaine a été rédigé par le département de la Défense (*DoD*) des États-Unis. Intitulé *2016 Operational Energy Strategy*, ce document fournit une vision stratégique sur l'utilisation, l'optimisation et la sécurisation de l'énergie utilisée par les systèmes d'armes américains en opération et en entraînement, au travers de trois axes :

- développement capacitaire ;
- disponibilité énergétique sur le terrain ;
- utilisation opérationnelle des matériels.

Au bilan, si certaines initiatives de cadrage très pertinentes sont mises en place, il n'existe pas en France de document de référence fixant une vision stratégique traitant de l'énergie dans les Armées et services, et encore moins concernant l'énergie électrique.

### **Retour d'expérience**

Même si les équipements autonomes fonctionnant uniquement à l'électricité ne sont pas encore très nombreux, il semble important d'identifier quelles sont les premières leçons tirées de leur utilisation sur le terrain.

(7) Ce suivi a été mis en place dès 2008 par le Service de l'infrastructure de la Défense (SID).

(8) Lettre du sous-chef « performance » de l'EMA (septembre 2017).

(9) *ÉNERGIE électrique pour les infrastructures et systèmes Terrestres en OPérations extérieures*.

Le système *Félin* (*Fantassin à équipement et liaisons intégrés*) est un bon candidat, car il préfigure ce que pourrait être le combattant numérisé et connecté du futur. Les retours d'expérience ont mis en avant plusieurs points à améliorer. En Afghanistan, il a été constaté que ses batteries manquaient d'autonomie par temps de grand froid et qu'il pesait lourd. En forêt équatoriale guyanaise, *Félin* a bien résisté au milieu agressif de la forêt équatoriale et a montré des capacités similaires à celles observées en métropole, mais le problème majeur reste l'alimentation des batteries au-delà de 48 h. Au Mali, on atteint certaines limites puisque les combattants *Félin* portent en moyenne 45 kg par 40 ° à l'ombre. Quant aux batteries qui alimentent les optiques, leur autonomie passe de 3 heures à 45 minutes lors des périodes très chaudes : elles n'offrent donc pas l'autonomie souhaitable dans des opérations qui doivent s'inscrire dans la durée.

Dans le domaine des nano ou micro-drones, leur autonomie n'est aujourd'hui que d'une vingtaine de minutes. Au vu de leur caractère de plus en plus indispensable sur le terrain, notamment pour le renseignement des forces au contact, il semble impératif d'augmenter de manière très significative leur autonomie, même si, comme pour tout aéronef, il s'agira de trouver un compromis de masse entre le carburant (batterie) et la charge utile (capteurs, éventuels armements, etc.).

Enfin, concernant les programmes d'armement, la consommation électrique des systèmes d'armes est rarement prise en compte, notamment lorsqu'il s'agit d'ajouter de nouvelles fonctionnalités sur un système déjà existant. Cela peut diminuer, voire annuler l'intérêt de ces nouvelles fonctions, qui ne seraient peu ou pas utilisables. Par ailleurs, il n'existe pas de standardisation pour l'alimentation en électricité des systèmes d'armes qui ont besoin d'autonomie électrique. Au final, le Service interArmées de maintenance des matériels terrestres (SIMMT) a dénombré plus de 250 références de batteries. La seule initiative prise sur le sujet a été d'imposer aux nouveaux programmes de piocher dans ces 250 références et ne pas en rajouter de nouvelles <sup>(10)</sup>.

### **Électrification massive des systèmes d'armes dans les années à venir, souvent poussée par le secteur civil**

Jusque dans les années 1990-2000, l'innovation et les nouvelles technologies avait été majoritairement tirées par le secteur militaire. Pour ne prendre que quelques exemples, le développement de l'énergie nucléaire civile s'est appuyé sur la mise en place des armements nucléaires dans les années 1960, l'aéronautique civile a très largement bénéficié des avancées réalisées sur les avions de combat des années 1970 (motorisation, commandes vol électriques, vol transsonique, optronique, systèmes embarqués, etc.), tout comme les satellites civils d'observation de la Terre ou de télécommunication ont bénéficié des avancées technologiques réalisées pour les satellites militaires de communication et de renseignement.

(10) Fiche d'orientation du pôle Matériaux, composants, maîtrise des risques environnementaux (MCM) de la DGA, 2017

C'est probablement après la fin de la guerre froide, avec la baisse des budgets militaires, et le développement des réseaux de communication civils (développement d'*Internet* et de la téléphonie mobile) que la bascule a eu lieu. Aujourd'hui, dans de très nombreux domaines, l'innovation et les avancées technologiques sont très largement tirées par le secteur civil, les systèmes d'information et de communication n'étant qu'un exemple parmi beaucoup d'autres (drones, véhicules autonomes, Intelligence artificielle, espace, etc.). Il est intéressant de s'arrêter sur deux domaines majeurs et duaux de cette bascule de l'innovation, qui impacteront fortement le domaine militaire : la mobilité électrique et la numérisation.

### **Mobilité électrique**

La mobilité électrique est un domaine qui touche principalement les véhicules terrestres, mais qui tend à s'étendre également aux véhicules des autres milieux. La dynamique, lancée au début des années 2000, a mis une bonne quinzaine d'années à se mettre en place, mais semble maintenant bien lancée. Les technologies en termes de motorisation, de gestion de l'énergie électrique, de batteries et de leurs procédures de chargement arrivent dans une phase de maturité suffisante pour lancer une première industrialisation de ces véhicules. En 2017, le cap des 100 000 voitures électriques a été franchi en France, sur 36 millions de voitures immatriculées ; et dans le monde, ce sont 2 millions de voitures électriques ou hybrides qui circulent sur un total de 1,2 milliard de véhicules. La mobilité électrique n'est donc aujourd'hui qu'une petite part, mais bien réelle, notamment au regard des rares prototypes qui existaient avant 2009. Par ailleurs, avec les travaux de recherche et de développement sur la voiture autonome, sur la voiture connectée, silencieuse et propre, la voiture de demain ne pourra être qu'électrique <sup>(11)</sup>. La Chine et l'Inde, pays de plus d'un milliard d'habitants, où le besoin en mobilité de la population ne cesse d'augmenter, ne peuvent que miser sur le développement des voitures électriques pour éviter une dégradation supplémentaire de la pollution et le maintien de leur dépendance au pétrole. Même les industriels prennent les devants, avec Volvo qui a annoncé en 2017 que plus aucune voiture à essence ne sortirait de ses usines à compter de 2019 <sup>(12)</sup>.

Le secteur aérien est également en forte évolution, particulièrement dans le domaine des drones, de l'aviation légère et des équipements embarqués. Si les micro-drones sont directement « nés » avec une propulsion électrique, leur emploi se généralise rapidement dans un grand nombre de secteurs, civils ou militaires, et leur taille ne cesse d'augmenter, sans pour autant que la propulsion électrique ne soit remise en cause. Pour l'aviation légère, la quasi-totalité des projets de développement de nouveaux appareils sont électriques, avec un phénomène majeur de captation de l'innovation et du marché par la Chine, ce qui confirme la politique ambitieuse de ce pays sur la propulsion électrique. Enfin, sur les avions d'affaires et de ligne, on assiste à une très forte électrification des équipements embarqués. Ce phénomène a débuté dans les

(11) En 2040, selon l'Agence internationale de l'énergie dans sa publication *World Energy Outlook 2017*, environ 300 millions de véhicules électriques et 140 M de véhicules hybrides seront en circulation dans le monde.

(12) DUPONT-CALBO Julien, « Volvo enterre ses moteurs thermiques », *Les Échos*, 5 mai 2017 ([www.lesechos.fr/05/07/2017/lesechos.fr/030429718927\\_volvo-enterre-ses-moteurs-thermiques.htm](http://www.lesechos.fr/05/07/2017/lesechos.fr/030429718927_volvo-enterre-ses-moteurs-thermiques.htm)).

années 1980 avec l'avènement des commandes de vol électriques et des systèmes de navigation, et il poursuit aujourd'hui avec la numérisation des systèmes de contrôles, la connectivité (avec les organismes externes, ou au profit des passagers), et la suppression progressive de toutes les servocommandes hydrauliques par des systèmes électriques (freinage, activation des gouvernes, et même roulage au sol).

Ce virage technologique et industriel est amené à toucher le secteur militaire, d'une part parce que la mobilité électrique a de vrais intérêts pour la défense (discrétion sonore, fiabilité, entretien allégé, etc.) mais également parce que la défense n'aura pas les moyens de maintenir une filière technologique différente du civil. La signature en 2015 du contrat pour le développement et la livraison de sept *Chalandes multi-missions (CMM)* à propulsion hybride, dont un mode tout électrique, montre bien que le virage est déjà amorcé au sein de la Défense.

### **Généralisation de la numérisation et de la connectivité**

En deux décennies, la numérisation et la connectivité des objets se sont progressivement imposées sur l'ensemble des produits et services de notre quotidien. Ce phénomène touche de façon quasi-simultanée aussi bien le secteur privé que la vie professionnelle, avec une homogénéisation des pratiques et des services, qui induit un changement en profondeur de notre mode de vie et de notre rythme de vie. La Défense n'échappe pas à ce phénomène car les Armées cherchent à intégrer ce gain d'efficacité et de rapidité dans leur façon de travailler, de s'entraîner et de combattre.

Dans les années qui viennent, ce phénomène ne peut que s'amplifier. Les enjeux se concentreront sur la gestion et le stockage des grands flux de données, sur l'intelligence artificielle pour les analyser, et sur la connectivité pour échanger les informations entre les systèmes producteurs ou utilisateurs de données. Potentiellement, tous les objets de la vie courante et de la vie professionnelle intégreront des systèmes numérisés, dotés ou non de leur propre intelligence artificielle, et surtout seront connectés. Les objets deviendront tous des systèmes numériques, qui doivent bien évidemment être alimentés en électricité, et, dès qu'ils sont nomades, devront avoir une autonomie suffisante. Même si des progrès notables sont attendus en termes de consommation d'électricité pour la puissance de calcul, la connectivité impose des échanges basés sur du rayonnement électromagnétique pour lequel les lois de la physique imposent une énergie minimale nécessaire qu'il sera difficile de réduire.

Au paragraphe 82, la *Revue stratégique de Défense et de Sécurité nationale* de 2017<sup>(13)</sup> confirme que les Armées doivent prendre le virage de la numérisation et de la connectivité pour garder leur supériorité opérationnelle : « La révolution numérique en cours, stimulée par les usages publics et professionnels, devrait apporter les ruptures technologiques les plus importantes. L'hyperconnectivité, les technologies du *Big Data*, l'*Internet* des objets (*IoT*) et la robotique sont quelques exemples d'opportunités majeures pour la défense. L'intelligence artificielle, en particulier, est amenée à jouer un

(13) DANJEAN Arnaud (dir.), *Revue stratégique de Défense et de Sécurité nationale*, Dicod, 2017, 111 pages ([www.defense.gouv.fr/dgris/presentation/evenements/revue-strategique-de-defense-et-de-securite-nationale-2017](http://www.defense.gouv.fr/dgris/presentation/evenements/revue-strategique-de-defense-et-de-securite-nationale-2017)).

rôle central dans les systèmes d'armes, où elle contribuera de façon significative à la supériorité opérationnelle mais induira de nouveaux risques ».

Les activités d'innovation dans le secteur de la défense s'appuient déjà sur ces ruptures technologiques (combat info-centré, robotisation du champ de bataille, apport de l'intelligence artificielle pour le renseignement et la cybersécurité, soldat connecté, etc.). Le train est donc parti : numérisation et connectivité toucheront demain massivement nos systèmes d'armes.

#### ***Domaines plus spécifiquement militaires***

Si l'électrification massive de nos systèmes d'armes est principalement poussée par le secteur civil, d'autres domaines émergents et purement militaires dépendront également largement de l'énergie électrique comme la furtivité active, le canon électrique ou les armes à énergie dirigées. Le secteur de la guerre électronique, gros consommateur d'énergie électrique, fait aussi l'objet de nombreux travaux, à la fois à court terme (*Cuge*<sup>(14)</sup>) mais également à plus long terme pour accompagner le développement des futurs systèmes de combat (tous milieux), des systèmes de renseignement, et des capacités de protection et de sauvegarde.

### **Enjeux du développement durable sur nos matériels**

#### ***Des objectifs ambitieux poussés par la France***

Un des volets importants du développement durable concerne la transition énergétique. Elle suppose une modification structurelle profonde des modes de production et de consommation d'énergie. C'est un des volets de la transition écologique, née d'une volonté politique des gouvernements, poussés par leurs populations et certaines ONG qui souhaitent réduire les effets négatifs du secteur énergétique sur l'environnement. Cette politique, dirigée par le ministère de la Transition écologique, est basée sur quatre axes : la diminution progressive du recours aux énergies d'origine fossile et fissile, la mise en place d'énergies renouvelables, la réduction de la consommation d'énergie au moyen d'une amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et des technologies, et enfin, un changement des modes de vie. Suite à la Conférence de Paris sur les changements climatiques (*COP21*) fin 2015, la France a ratifié l'Accord de Paris en juin 2016 avec des engagements forts sur l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans la consommation nationale (30 % en 2030) et la réduction des gaz à effet de serre (- 40 % entre 1990 et 2030).

La politique volontariste du Gouvernement pour à la fois augmenter la part des énergies renouvelables (doublement du solaire, autoconsommation des ménages, parcs éoliens, etc.) et diminuer les gaz à effet de serre (soutien à l'industrie de l'automobile électrique, pénalisation des voitures polluantes, etc.) va participer progressivement à la transformation de la société civile.

(14) La *Capacité universelle de guerre électronique*, anciennement appelé *Charge utile de guerre électronique*, sera embarquée sur trois Falcon (Dassault) en remplacement des deux Transall *C-160 Gabriel*.

### **Vers la fin d'une situation d'exception pour les Armées**

Si la société civile doit s'adapter, il semble illusoire que la défense puisse rester longtemps en situation d'exception, et ne pas se conformer, in fine, aux exigences de la politique française en matière de transition énergétique. Plusieurs exemples dans le passé ont montré que, si des dérogations temporaires aux dispositions réglementaires ou législatives sont possibles, la défense doit toujours finir par s'adapter.

En effet, de plus en plus de textes proviennent de l'Union européenne, les dérogations et leurs échéances n'étant plus sous l'autorité seule de la France. Ainsi, les dérogations sur les systèmes de navigation et de communication de nos aéronefs militaires n'ont pas pu être prolongées et nos appareils les plus anciens ont dû être modifiés pour se conformer à la réglementation (précision de navigation, nouvelles approches *GPS*, nouvelles radios dites « 8.33 », etc.). Également dans le domaine des matières dangereuses et polluantes, la réglementation de l'Union européenne *REACH* <sup>(15)</sup>, mise en place en juin 2007, vise à identifier, déclarer, puis réduire l'utilisation de produits nocifs pour la santé et l'environnement. Bénéficiant initialement de nombreuses dérogations, les matériels militaires doivent maintenant être conçus, développés, produits, utilisés et démantelés en conformité avec cette réglementation.

### **Impact sur nos systèmes d'armes et notre alimentation électrique**

Il semble donc nécessaire que la DGA et les Armées prennent en compte, dans le cycle de vie de nos systèmes d'armes, notamment dans la phase d'utilisation, les principales contraintes des lois et réglementations sur la transition énergétique à chaque fois que c'est possible.

Il est également nécessaire que nous puissions nous assurer que la consommation énergétique de nos bases projetées, qu'elles soient permanentes ou temporaires, et de nos systèmes d'armes en entraînement ou en opération, s'approche au maximum les objectifs de la France en termes de transition énergétique.

### **Enjeux du stockage et de la production d'électricité : accompagner l'innovation et penser aux systèmes d'armes**

Devant la demande toujours plus grande en énergie électrique liée à la forte numérisation et connectivité de notre environnement civil et militaire, et à la montée en puissance de la mobilité électrique, une activité importante de recherche et de développement s'est mise en place depuis une vingtaine d'années. Elle a pour objectif d'identifier des solutions techniques permettant l'alimentation en électricité de ces systèmes, qui n'ont pas la possibilité d'être reliés en permanence à un réseau électrique fixe.

Deux types de solutions sont possibles pour alimenter en électricité un système non connecté à un réseau fixe : soit au travers d'un moyen stockage, soit au travers d'un moyen de production embarqué ou isolé. Pour les deux solutions, l'objectif reste

(15) *Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals.*



le même : fournir un maximum d'énergie électrique par unité de masse <sup>(16)</sup>, qui sera disponible sur une durée donnée.

Comme pour l'hyperconnectivité des objets ou la mobilité électrique, les travaux de recherche et de développement sur les domaines du stockage et de la production embarquée ou isolée d'électricité sont très majoritairement portés par le secteur civil, même si quelques initiatives sont portées par la défense.

### **Le stockage d'électricité**

Il s'agit ici principalement du domaine des batteries électriques. Ce domaine couvre une très large palette de produits, allant des objets nomades connectés jusqu'aux véhicules électriques, pilotés ou autonomes.

Pour bien comprendre les enjeux de la recherche sur les batteries, il est important de préciser qu'une batterie est composée de cellules élémentaires, dont le nombre et l'assemblage donneront les caractéristiques techniques de la batterie (principalement la tension et la puissance). La chaîne de recherche et de développement, d'industrialisation et de production peut être simplifiée de la façon suivante :

1. Les laboratoires travaillent pour développer de nouvelles cellules élémentaires, toujours plus performantes (combinaison de matériaux, architecture, masse, etc.).
2. Une fois la technologie mature, quelques sociétés se spécialisent dans la production de ces cellules élémentaires.
3. Les producteurs de batteries achètent ces cellules élémentaires et les assemblent pour en faire un produit qui corresponde aux besoins de leurs clients.

Aujourd'hui, ces trois phases sont assurées exclusivement par le secteur civil. La première phase, pour laquelle la France est bien positionnée avec un très bon niveau académique <sup>(17)</sup>, se concentre principalement sur le secteur Lithium-Ion, secteur qui va probablement concentrer la majorité des recherches sur les batteries dans les années qui viennent. À ce jour, excepté quelques évolutions d'architecture, aucune rupture technologique n'est en vue. Les chercheurs pensent rapidement doubler l'énergie massique des cellules pour atteindre environ 200 Wh/kg <sup>(18)</sup>, puis entre 300 et 400 Wh/kg dans les années qui viennent pour ce type de technologie <sup>(19)</sup>. Les producteurs de la deuxième phase concernent principalement des sociétés asiatiques (Samsung, Panasonic, LG, etc.), mais également Tesla, un acteur majeur qui a fait des batteries le cœur de sa stratégie de développement et ambitionne de devenir le numéro un outre-Atlantique

(16) On parle alors d'Énergie massique : mesurée en Wh/kg, il s'agit de l'énergie que fournit un kilogramme de la source énergétique considérée. Par exemple, une batterie d'énergie massique 100 Wh/kg pesant un kilogramme fournira 100 Wh d'énergie électrique avant d'être complètement déchargée.

(17) Notamment au travers du *RS2E - Réseau sur le stockage électrochimique de l'énergie*. C'est est un réseau de recherche et de transfert technologique français qui se consacre aux différents dispositifs de stockage d'énergie. Il dépend du CNRS et a été créé avec le soutien du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

(18) Voir note 16.

(19) L'énergie massique de l'essence étant autour de 2 000 à 4 000 Wh/kg, il est clair que ce n'est pas dans un avenir proche que les véhicules électriques équipés de batteries auront des performances analogues à ceux équipés de moteurs thermiques.

de ce secteur. Enfin, l'élaboration et la production des batteries dans la troisième phase sont réalisées uniquement au profit de clients civils.

Du fait des faibles quantités demandées, les industriels de la défense ne peuvent souvent pas obtenir le développement de batteries dédiées à leurs exigences spécifiques (robustesse à l'environnement et à la menace balistique, sûreté et sécurité de fonctionnement, etc.). Ils doivent donc d'abord identifier un produit civil sur étagère qui semble le mieux adapté à la performance attendue, puis ajouter une couche de protection pour répondre au cahier des charges du système d'armes. Cela conduit à intégrer dans nos matériels militaires des batteries qui ne sont optimisées ni en termes de performance, ni en termes de masse, et sans souci de standardisation.

Sur le domaine des batteries, il semblerait opportun de développer une compétence sur la troisième phase dans l'industrie de défense afin que la définition et la production des batteries puissent prendre directement en compte les exigences militaires en termes d'environnement et de performance. Cela permettrait notamment d'améliorer significativement le rapport performance/masse, qui deviendra un critère de plus en plus critique pour le combattant hyperconnecté.

Par ailleurs, la production des cellules élémentaires nécessite certains ingrédients qui pourraient devenir en tension sur le marché mondial (aujourd'hui le Lithium<sup>(20)</sup>, et probablement plus tard le Cobalt). Il pourrait être intéressant d'étudier les filières de matières premières à risques pour la production de cellules élémentaires, identifier les voies pour sécuriser leur disponibilité, et analyser la pertinence de développer une capacité industrielle civile au niveau européen pour garantir à moyen terme une souveraineté dans la production de cellules élémentaires.

Enfin, d'autres domaines font l'objet de recherche fondamentale ou appliquée pour le stockage d'électricité. Il s'agit notamment des matériaux supraconducteurs, capable de stocker une grande quantité d'énergie, et de la restituer sous forme impulsionnelle. Une étude récente confiée par la DGA dans le cadre d'un projet Rapid<sup>(21)</sup>, a montré avec succès l'adaptation d'une telle technologie, appelée *SMES*<sup>(22)</sup>, à des systèmes d'armes de type canon électromagnétique.

### **La production embarquée ou isolée d'électricité**

La production d'électricité embarquée ou isolée est aujourd'hui principalement réalisée au travers de turbines à gaz ou de moteurs thermiques entraînant un alternateur pour produire de l'électricité. C'est le cas pour la majorité des groupes électrogènes, ainsi que pour certains véhicules hybrides, quel que soit leur milieu d'évolution. Dans le cadre de la diminution progressive de l'énergie fossile, d'autres solutions plus ou moins matures existent.

(20) MAZZUCCHI Nicolas, « Transition énergétique et numérique : la course mondiale au lithium », *Recherches & Documents* n° 5/2018, Fondation pour la recherche stratégique (FRS), 25 pages ([www.frstrategie.org/](http://www.frstrategie.org/)).

(21) Rapid : Régime d'appui pour l'innovation duale ; financement par la DGA de projets innovants au profit de PME/TPE sur des sujets duaux.

(22) *Superconducting Magnetic Energy Storage*.

Nous avons d'abord les panneaux solaires, qui permettent un appoint d'électricité sur le terrain ou sur un véhicule, voire sur un équipement. Le défaut principal de cette solution est qu'elle doit impérativement être associée à un autre moyen de production ou de stockage d'électricité pour en assurer la continuité. À noter que la production asiatique (notamment chinoise) de cellules photovoltaïques est d'une telle ampleur que les prix pratiqués ont très fortement baissé ces dernières années, tuant la majorité de la concurrence mondiale. L'énergie éolienne est également un très bon appoint mais qui présente les mêmes défauts de discontinuité que l'énergie solaire.

La solution embarquée la plus prometteuse est probablement la pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène. L'intérêt principal de cette technologie est que l'énergie massique est très proche de celle des carburants classiques, et ne rejette que de l'eau dans l'atmosphère. La difficulté principale est liée au stockage de l'hydrogène, qui se fait soit à l'état gazeux sous forte pression (700 bars), soit à l'état liquide à très faible température ( $-250^{\circ}\text{C}$ ). Le développement de moyens de stockages adaptés fait l'objet de défis majeurs d'industrialisation, dont les coûts ne permettent pas encore l'accès à un marché très large.

Pour la défense, il y a probablement une opportunité à saisir pour que le développement de cette technologie à grande échelle puisse prendre en compte les spécificités militaires. Une étude amont est d'ailleurs en cours au profit du programme *Félin* pour adapter une alimentation utilisant une pile à combustible.

Enfin, certaines études sur la récupération d'énergie liée à la marche, grâce à des matériaux piézo-électriques dans des chaussures, ont été réalisées il y a quelques années. Ces études, bien que ne présentant pas de perspectives de récupérer de très grandes quantités d'électricité, pourraient cependant être un complément intéressant à d'autres formes de production, ou pour recharger de petits équipements individuels du combattant.

#### **Utilisation des matériels militaires et gestion de l'énergie électrique**

Si l'industrie de défense est particulièrement peu présente dans les domaines du stockage et de la production d'énergie électrique pour les systèmes d'armes, un certain nombre d'études sont réalisées sur les conditions d'utilisation des matériels militaires. Il s'agit en général de rechercher à économiser au maximum l'électricité nécessaire à leur fonctionnement, ou de développer des briques technologiques au profit de futurs systèmes électriques plus larges. Ces études sont principalement portées par la DGA dans le cadre de sa mission de préparation de l'avenir (Projets d'études amonts ou PEA, projets Rapid, etc.).

Dans le domaine des infrastructures, notamment en soutien à l'ETO *Enertop* évoquée au premier chapitre, le PEA *Genalt* étudie la façon dont la consommation électrique sur une base avancée en Opex pourrait être optimisée (et donc réduites) <sup>(23)</sup>,

(23) Sur la base de technologie de type mini-grid projetables. Voir également les travaux de l'*US Army (Energy Security and Sustainability Strategy, Washington, DoD, 2015)* ou ceux menés au sein du Centre d'excellence de l'Otan sur la Sécurité énergétique de l'Otan à Vilnius ([www.ensecce.org](http://www.ensecce.org)).

et comment pourraient être intégrées des sources d'énergie électriques renouvelables, comme le système *Solthair* <sup>(24)</sup>. Ces projets permettent à la fois de réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi de limiter la dépendance des bases avancées à une unique source d'énergie.

Dans le domaine des systèmes d'armes, pour le domaine terrestre, on peut évoquer le PEA *Sesame II*, avec *Félin* comme programme cible, dont l'objectif est de concevoir des prototypes portatifs de production d'énergie électrique sur la base de piles à combustible. Deux projets Rapid lui sont associés : *Morphy* pour la conception de réservoirs d'hydrogène portatifs rechargeables, et *Ogmios*, un exosquelette léger pour améliorer les performances du combattant. Dans le domaine naval, le PEA *SECU HT* a pour ambition de développer des solutions d'architectures électriques innovantes en vue de sécuriser et d'optimiser l'alimentation des navires à propulsion électrique, en augmentant la discrétion acoustique.

## Orientations

S'il est vrai que le domaine de l'énergie électrique, des systèmes d'armes qui en sont dérivés ou de leur optimisation fait déjà l'objet de travaux menés par différents services du ministère des Armées, il n'existe pour autant pas de vision globale et de long terme permettant de s'assurer que les besoins grandissants seront bien couverts, et que les forces disposeront des meilleures solutions pour leurs emprises et leurs systèmes d'armes.

Il semble donc essentiel que le ministère des Armées se dote d'un document de niveau stratégique, traitant de l'ensemble des sujets associés à l'énergie électrique au combat dans les dix à quinze ans qui viennent. Son objectif serait de fournir à l'ensemble des services du ministère, mais également aux industriels de défense et aux laboratoires de recherche, un cadre partagé et une direction commune de travail. Ce document devrait traiter au minimum les quatre sujets suivants :

- Le domaine étant dual, et très largement piloté par le secteur civil, il conviendrait tout d'abord d'attribuer une **répartition des rôles claire entre le civil et le militaire**, afin d'éviter toute duplication, mais aussi de favoriser les échanges entre les deux secteurs (réglementation, normalisation, contraintes militaires et civiles, travaux d'études, etc.). Il s'agirait également de définir une politique de l'innovation associée à une répartition des financements étatiques et industriels à définir par secteur. Au final, cela pourrait, entre autres, permettre l'émergence de solutions communes, notamment sur l'industrialisation.

- Le domaine étant critique pour le combat du futur, il conviendrait également de traiter du **niveau de souveraineté** que l'on souhaite conserver dans ce domaine, en national ou niveau européen. Cela permettrait de définir des priorités étatiques et industrielles claires en termes de recherche et de développement. Le sujet critique des

---

(24) Projet Rapid de centrale solaire thermique déployable faisant tourner un moteur innovant fonctionnant à l'air chaud.

matières premières <sup>(25)</sup>, ou celui des batteries sont de bons exemples pour identifier les éléments qui devraient être nécessaires à notre autonomie stratégique, avec en conséquence des orientations sur le secteur industriel civil, ainsi que sur la Base industrielle et technologique de Défense (BITD), nationale ou européenne.

- L'enjeu du **développement durable** et des lois de transitions énergétiques doivent être analysés, avec des orientations claires fournies aux Armées et services, afin que puisse être étudié l'impact à la fois sur le développement des systèmes d'armes futurs, mais aussi sur les procédures en opération, à l'instar de ce qui est déjà lancé sur les infrastructures de la Défense.

- Enfin, les **procédures de développement, d'acquisition et d'utilisation des systèmes d'armes** doivent faire l'objet d'adaptations afin de prendre en compte leur électrification massive. Il s'agit ici par exemple de la standardisation des moyens d'alimentation et de stockage sur la base d'exigences types, de la maîtrise de la consommation électrique (objectifs de consommation, capacités de mesures de consommation, optimisations). Il peut s'agir également d'exigences sur la protection des systèmes d'armes et sur la réduction de vulnérabilités nouvelles qui peuvent apparaître (diversification des sources d'alimentation des bases avancées, sécurisation de l'alimentation des clouds et autres centres de calculs du combat info-centré, sécurité des satellites de communication, etc.).

Une fois approuvé, un tel document devrait être complété d'un plan de mise en œuvre, offrant des recommandations pratiques et concrètes à ceux chargés de l'implémenter.

\*\*

En 1917, le choc lié au manque de pétrole pour nos Armées alors au cœur du combat décisif pour la victoire a été à l'origine de la mise en place d'une politique nationale volontariste pour sécuriser dans la durée notre approvisionnement en pétrole. Demain, c'est l'accès durable à l'énergie électrique qui sera essentiel pour nos Armées. S'il est admis que cet accès est aujourd'hui garanti par une politique portée par le secteur civil, il semble essentiel que la défense se dote également d'une vision stratégique sur les sujets touchants à l'énergie au combat, notamment électrique. Il n'est en effet pas opportun de se lancer dans l'hyper numérisation et l'hyperconnectivité des systèmes d'armes sans aborder en parallèle leur autonomie énergétique, les deux sujets formant un *continuum* indissociable. Une telle vision permettra de fournir à tous les acteurs, civils ou militaires, publics ou privés, des orientations claires et partagées sur les sujets de dualité, de souveraineté nationale ou européenne, de matières premières, de transition énergétique, ou de l'acquisition et de l'utilisation des systèmes d'armes. Ce sont l'innovation et les hautes technologies qui feront la différence demain sur le terrain. Elles ne seront véritablement efficaces que si elles peuvent être alimentées dans

---

(25) PITRON Guillaume, *La guerre des métaux rares, La face cachée de la transition énergétique et numérique*, Les Liens qui Libèrent, 2018, 296 pages.

la durée, en répondant aux contraintes de poids, d'endurance, de sécurité, d'environnement, de protection et de discrétion dont auront besoin nos forces Armées sur le terrain. Nos forces pourront alors mener leurs combats avec la supériorité technologique et la résilience énergétique dont elles ont besoin.

#### Éléments de bibliographie

- MONTAGNON Pierre, *La bataille de Stalingrad*, Édition du Rocher, 2012, 216 pages.
- MURAT Didier, *L'Intervention de l'État dans le secteur pétrolier en France*, Technip, 1969.
- IACONA Estelle, TAINE Jean et TAMAIN Bernard, *Les enjeux de l'énergie après Fukushima*, Dunod, Paris, 2012, 240 pages.
- AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE, *Digitalization & Energy*, Paris, OCDE, 2017 ([www.iea.org/digital/](http://www.iea.org/digital/)).
- MAZZUCCHI Nicolas, « Transition énergétique et numérique : la course mondiale au lithium », *Recherches & Documents* n° 5/2018, Fondation pour la recherche stratégique (FRS), 25 pages ([www.frstrategie.org/](http://www.frstrategie.org/)).
- PITRON Guillaume, *La guerre des métaux rares, La face cachée de la transition énergétique et numérique*, Les Liens qui Libèrent, 2018, 296 pages.
- COLLECTIF, *European Defence Research: The case for an EU-funded defence R&T programme (Report)*, European Union Institute for Security Studies, février 2016, 110 pages ([www.iss.europa.eu/sites/default/files/EUISSFiles/GoP\\_report.pdf](http://www.iss.europa.eu/sites/default/files/EUISSFiles/GoP_report.pdf)).
- GUMMETT Philip et REPPY Judith, *The Relations Between Defence and Civil Technologies*, Winston House, NATO ASI Series, 1987.
- « Terrestre : un secteur innovant », *TTU on line*, 20 octobre 2017 ([www.ttu.fr/terrestre-secteur-innovant/](http://www.ttu.fr/terrestre-secteur-innovant/)).

#### Entretiens

- Ingénieur en chef (ICA) Roland JOUANNIC et son équipe, Direction générale de l'armement (DGA).
- M<sup>me</sup> Coroline SENZIER, Safran.
- Colonel Vincent BUTTOLO, Centre interarmées de concepts, de doctrines et d'expérimentations (CICDE).
- Ingénieur en chef des études et techniques de l'armement (ICETA) Eric PFANNSTIEL, CICDE.
- Lieutenant-colonel Claire DEBEAUX, Centre de doctrine et d'enseignement du commandement (CDEC).