L'énergie électrique embarquée

Bernard Collin
Capitaine de vaisseau (h)

La recherche et le développement des chantiers de construction de navires se sont focalisés ces dernières années sur un concept de navires « tout électrique ». Ainsi le projet Advansea, porté par DCNS, vise un navire de 120 mètres et de plus de 4 000 tonnes, capable d'atteindre 28 nœuds et doté d'une puissance électrique de 20 MW soit nettement plus que les navires d'aujourd'hui.

Cette dernière devrait couvrir les besoins de la propulsion, mais aussi des systèmes d'armes dont certains très futuristes : un laser à « létalité variable » ainsi que des canons électriques dont les charges d'énergie permettront de propulser des obus en remplaçant la poudre. Quelle est la situation actuelle ?

Parler aujourd'hui du «navire tout électrique», c'est commettre un abus de langage ou faire œuvre d'anticipation. Pour de nombreuses années encore, les navires ne disposeront pas d'une soute à ampères-heures où il suffirait de puiser pour alimenter la propulsion, les armes, les équipements et les servitudes. Une énergie primaire est toujours nécessaire, mais il est vrai qu'on la transforme de plus en plus en énergie électrique avant de la distribuer.

Actuellement, le «tout électrique» se rapporte à la propulsion qui utilise des « arbres électriques » selon le joli mot employé pour le *Normandie* (le paquebot de 1936). Ils se substituaient déjà aux longues « lignes d'arbres » qui continuent de donner bien des soucis, comme l'avarie du porte-conteneurs géant *Emma Maersk* vient de le rappeler, en février 2013.

Il n'en est pas moins vrai que de plus en plus de clients se présentent à l'usine électrique embarquée qui, d'une part substitue sa production à la combustion (cuisines), à l'explosion (moteurs), à la pyrotechnie (canon) ou à la détente thermique (turbines et catapultes), et qui d'autre part permettra d'alimenter des innovations (armes laser et hyperfréquence, blindage électromagnétique, destructeur de déchets au plasma).

C'est ainsi que les concepteurs des CVN 78 (Gerald R. Ford) ont consacré un réacteur nucléaire de 300 MW à la satisfaction des besoins électriques nouveaux

susceptibles d'apparaître au cours du demi-siècle de vie de ces bâtiments. La nécessité de produire ces mégawatts sous-entend que l'électricité n'est pas l'énergie primaire embarquée, stockée en quantité suffisante et susceptible d'être délivrée de façon continue ou sous forme impulsionnelle. Production, stockage et distribution de l'électricité sont les problèmes à résoudre en amont des « clients».

Les quelques points abordés dans cet article concernent ces clients, actuels ou potentiels, de l'énergie électrique embarquée, ainsi que les moyens susceptibles de mettre cette énergie à leur disposition.

Le stockage

Le premier client qui vient à l'esprit est le sous-marin dont l'impératif de discrétion fait rechercher une autonomie énergétique qui, aujourd'hui encore, n'est que temporaire. Certes on a dépassé les 100 nautiques franchissables par les *Gymnote* et *Farfadet* à la fin du XIX[e] siècle, mais les batteries lithium-ion associées à un système AIP (Air Independent System) limitent encore à trois semaines en immersion à basse vitesse une patrouille de sous-marins Scorpène.

Ce sont ensuite des préoccupations écologiques qui amènent les bâtiments de surface vers une propulsion hybride où la partie électrique est de plus en plus significative.

Le *Princesse Benedikte*, premier *ferry* germano-danois à utiliser temporairement une propulsion purement électrique, dispose de 415 batteries lithium-polymère dont les 27 tonnes sont installées en pontée et produisent 2,7 MWh.

Le *Waterspreeuw*, du type Damen Patrol Vessel 1304 Hybrid, est doté d'un propulseur de 130 kilowatts (plus un propulseur d'étrave de 11 kilowatts) alimenté par 13 batteries au lithium polymère qui autorisent une autonomie de 6 heures à 10 km/h.

On est loin d'une autonomie opérationnelle, mais depuis les batteries plomb/acide, les ratios sont passés de 160kg/kWh à 8kg/kWh pour les batteries au lithium polymère.

L'objectif industriel actuel est de diviser encore par 2 ce ratio pour atteindre les 250 Wh au kilogramme.

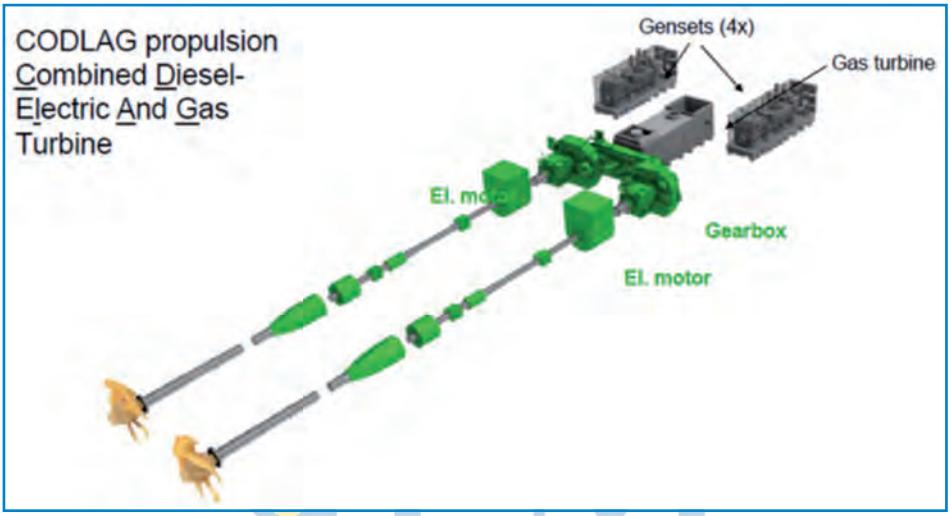
Quant aux piles à combustible, elles peinent à atteindre leur maturité en termes de puissance, d'autonomie et de sécurité pour une version navalisée. A titre d'exemples : la pile à combustible HydroGen4 fournissant 93 kW au véhicule de General Motors se compose de 440 cellules connectées en série ; l'hydrogène est stocké sous 700 bars. La version U32 que Siemens propose pour les sous-marins allemands U212 affiche 120 kW et assurerait 18 jours en plongée.

La propulsion

Le « tout électrique » même limité à la propulsion nécessite donc une source primaire ; dès lors, le sujet n'est pas nouveau puisque c'est en 1933 qu'Alsthom-Belfort installe à bord du *Normandie* un système turboélectrique

bénéficiant de l'expérience des porte-avions USS *Lexington* et USS *Saratoga* livrés en 1927 avec un système General Electric Co. Le câblage électrique se substituait aux longs arbres d'hélice et permettait de répartir les masses de l'appareil propulsif avec moins de contraintes et plus de sécurité.

Ainsi, les 29 chaudières du *Normandie* alimentaient en vapeur les turbo-alternateurs qui eux-mêmes alimentaient les moteurs de propulsion en courant triphasé 5 500 V, le tout réparti en 6 tranches. Le volant de manœuvre commandait la vitesse de la turbine entraînant l'augmentation de la fréquence du courant et donc la vitesse des moteurs ; à 30 nœuds, chaque nautique coûtait deux tonnes de mazout.

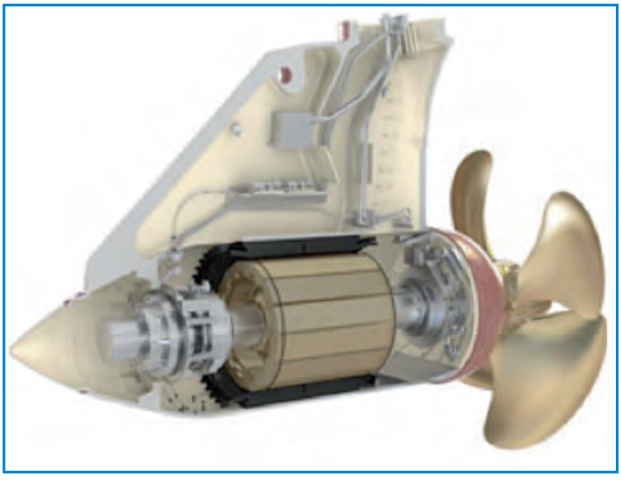


D.R.

Schéma de la propulsion d'une FREMM

Quatre-vingts ans ont passé et les diesels, les turbines à gaz, les alternateurs, les redresseurs-onduleurs à thyristors, les moteurs à induction et le câblage haute tension permettent de fournir les 20 MW nécessaires aux *pod* d'un navire de 20 000 t pour le propulser à 20 nœuds, tandis que 8,8 MWT permettent aux FREMM françaises (5 600 t) d'atteindre 15 nœuds avant l'entrée en action de leur turbine à gaz.

D.R.



L'utilisation de ce type de propulsion permet de réduire la vulnérabilité grâce à la dispersion des moyens dans le bord et à la multiplication des postes de commande ; elle permet aussi de sérieuses économies en personnel : le matériel exige moins d'interventions sur place et le contrôle du fonctionnement se fait à distance, de façon centralisée.

Écorché d'un POD

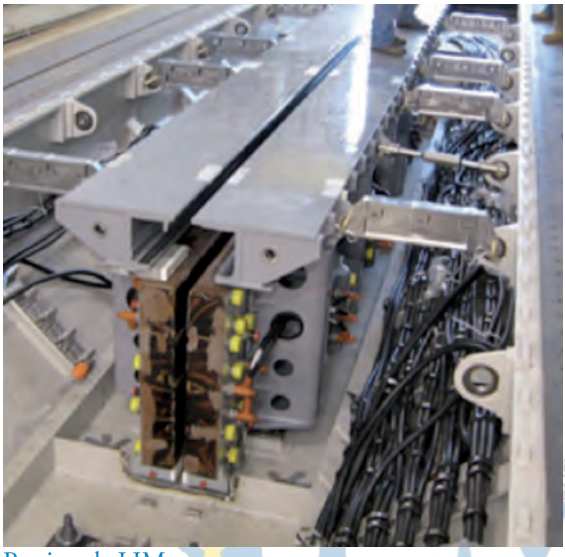
Les catapultes

Description

L'EMALS (*Electromagnetic Aircraft Launch System*) du CVN-78 *Gerald R. Ford* est une totale nouveauté. En aval du réacteur nucléaire affecté aux besoins en électricité du bord, l'EMALS est composé de quatre principaux éléments :

1) Un moteur à induction (*linear induction motor* [LIM]) qui consiste en un double alignement de plusieurs douzaines de solénoïdes séparés par une fente de moins de 10 cm. Ces deux longerons jouent sur 90 m le rôle du rotor d'un moteur conventionnel, prenant en sandwich une navette de 6 m en aluminium solidaire du sabot qui sera relié à l'aéronef.

D.R.



Portion de LIM

Depuis son point de départ et au fur et à mesure du déplacement du sabot, seuls les solénoïdes voisins de la navette sont alimentés selon une séquence qui minimise la consommation.

Dans la plus grande partie de la catapulte, les bobines supraconductrices sont disposées à intervalles réguliers et synchronisent leurs courants avec la bobine solidaire du sabot pour atteindre l'accélération souhaitée. Dans la seconde partie, cette accélération est maintenue constante par des bobines disposées à distances croissantes. Environ 50% de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie cinétique de la charge projetée.

Sur les 90 m de la catapulte, le LIM accélère un avion de 45t pour lui faire atteindre 130 nœuds, puis le sabot stoppe sur une distance de 5 à 6 m avant de reculer doucement pour reprendre sa position initiale. Techniquement, une accélération de 14g peut être obtenue, encore faut-il qu'elle soit supportable par le pilote et sa machine.

2) Un sous-système de stockage d'énergie (*Energy storage subsystem de Curtiss-Wright*). Étant donné que le LIM réclame une grande puissance électrique en quelques secondes, quatre volants d'inertie (disques-alternateurs montant à 6 400 tr/min) sont nécessaires pour emmagasiner 100 mégajoules chacun en 45 secondes à partir du réseau du bord et les restituer au LIM pendant les trois secondes du catapultage qui nécessite 122 MJ.

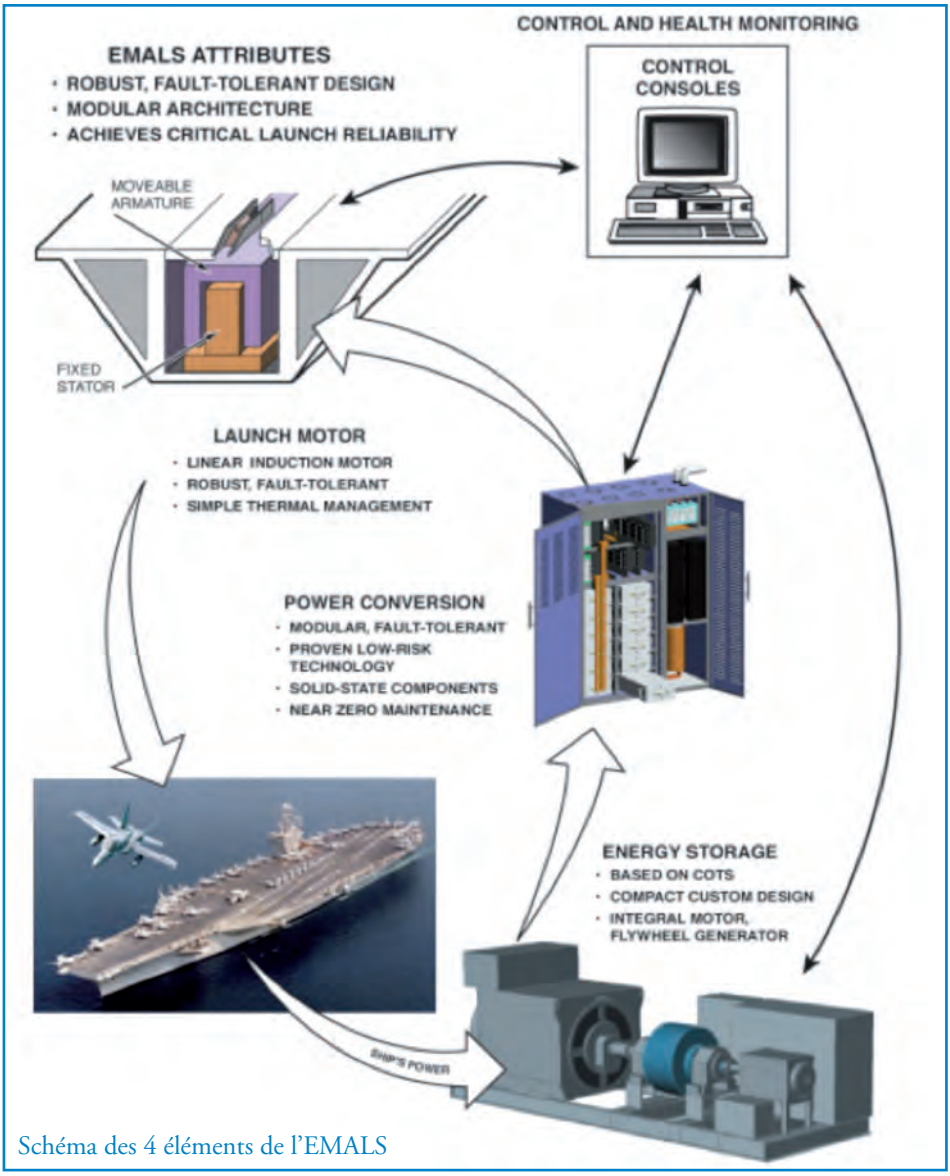
3) Un cycloconvecteur qui pilote, en fréquence et en tension, l'énergie électrique distribuée en séquence aux solénoïdes du LIM.

4) Des consoles qui permettent de contrôler la bonne distribution de

l'énergie pendant les 45 secondes de chaque cycle et de s'assurer de la constance de la force de traction pendant le catapultage.

Intérêt

L'intérêt de ce nouveau système est d'en diminuer le poids, l'encombrement, le coût d'utilisation et la maintenance ; d'améliorer les performances des catapultes et d'augmenter la gamme des aéronefs pilotés ou non pilotés susceptibles d'être mis en œuvre à partir d'un porte-avions. L'accélération étant progressive, les contraintes sur les cellules des aéronefs sont moins sévères, et d'autre part elle peut être calibrée



D.R.

Schéma des 4 éléments de l'EMALS

en fonction de la masse de l'appareil à mettre en l'air. La vitesse en bout de course peut varier de 28 à 103 m/s (D = +/-1.5 m/s).

Enfin, la suppression de la vapeur entraîne un moindre besoin en eau douce (environ 600 kg de vapeur par coup) et donc en désalinisation.

État d'avancement

Dès la fin 2011, les essais effectués au *Naval Air Systems Command* (NASC) test center de Lakehurst (New Jersey) avaient permis de faire décoller un F/A-18E avec des charges utiles (missiles, bidons…), un E-2D Advanced Hawkeye, un T-45C Goshawk de BAE Systems/Boeing et un C-2A Greyhound de Northrop Grumman.

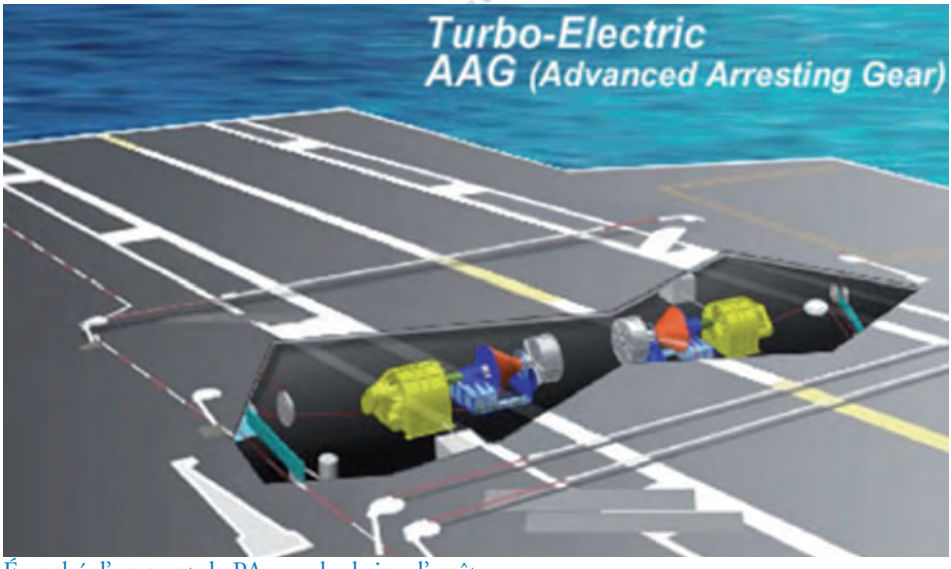
Pendant ce temps, dans les chantiers de Huntington Ingalls Industries Inc. (HII) à San Diego, General Atomics Electromagnetic Systems Group (GA-EMS) procédait au montage à bord du CVN 78 *Gerald R. Ford* des divers composants de l'EMALS. Les 12 ensembles de stockage et de fourniture d'énergie ont été livrés entre mai 2011 et janvier 2012, bien avant que le bâtiment en construction ne prenne la forme d'un porte-avions puisque la partie supérieure de l'étrave n'a été mise en place que le 9 avril 2013 à la suite de l'îlot (26 janvier 2013).

Les brins d'arrêt

En même temps que les catapultes abandonnent la vapeur, les brins d'arrêt hydrauliques sont remplacés par un système électromagnétique (AAG = *Advanced Arresting Gear*).

Le programme développé par General Atomics vise à réduire la tension maximale supportée par le brin d'arrêt ainsi que le choc enduré par la crosse d'appontage et par la cellule de l'aéronef lors de la décélération.

D.R.



Écorché d'un pont de PA sous les brins d'arrêt

La technique utilisée fait appel à un combiné turboélectrique : des turbines hydrauliques couplées à un gros moteur à induction absorbent l'énergie d'une façon contrôlée. L'installation comprend trois sous-systèmes :

1. une *water turbine* passive ;
2. une machine tournante spécifique ;
3. un moteur générateur constitué d'un rotor cylindrique enserré entre deux stators concentriques ; il fournit un fort couple et une faible inertie, c'est lui qui permet d'adapter le système au type d'appareil recueilli.

Le nouveau système permettra de recueillir une plus grande gamme d'aéronefs, avec une plus grande fiabilité, tout en réduisant le personnel et la maintenance nécessaires.

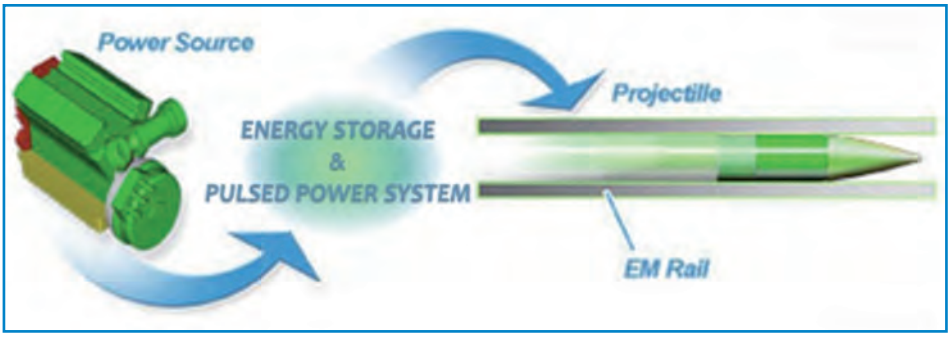
Les armes

L'utilisation de l'électricité au profit des systèmes d'armes n'est pas une nouveauté : les conjugateurs ou les Ward-Léonard ne datent pas d'hier mais les innovations sont intervenues dans deux domaines qui ne sont ni le calcul ni le pointage : il s'agit d'utiliser l'électricité pour transmettre la vitesse initiale à un projectile balistique (canon électromagnétique *Railgun*) ou pour se substituer aux charges militaires cinétiques (arme hyperfréquence, laser de puissance ou haute énergie).

Le canon électromagnétique EM Railgun

Plusieurs millions d'ampères sous plusieurs milliers de volts sont nécessaires pour imprimer une très grande vitesse initiale à un projectile inerte. Les 32MJ qui ont été obtenus en avril 2013 à Dahlgren sont à rapprocher des 122 MJ exigés par l'EMALS.

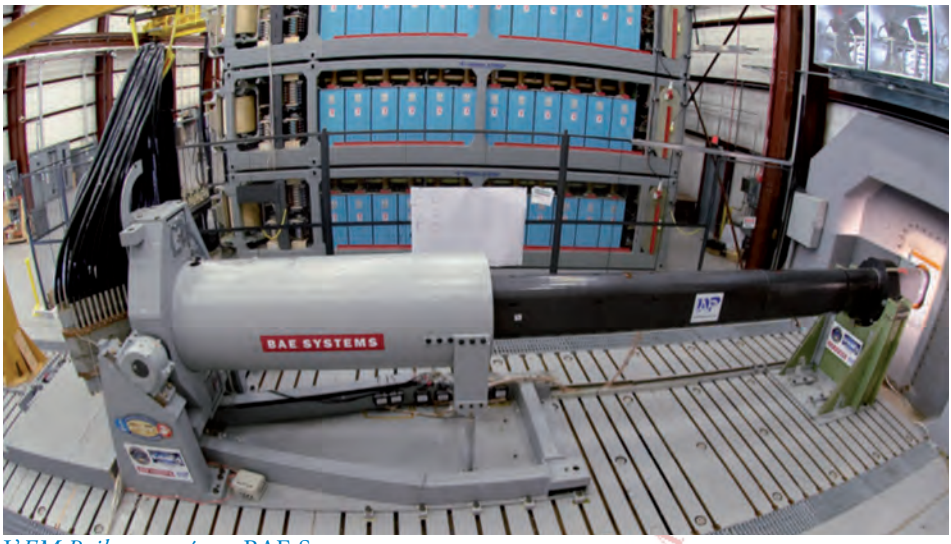
Le canon électromagnétique utilise la force d'interaction entre un courant électrique et un champ magnétique (loi de Lenz – Faraday). L'objectif est d'atteindre 64 MJ, une vitesse initiale de Mach 7 propulsant un projectile d'une dizaine de kg (dépourvu de charge explosive) à 200 nautiques en 6 min, à une cadence de 10 coups/minute et avec une précision de 5 mètres.



D.R.

Schéma des 4 éléments d'un EM Railgun

D.R.



L'*EM Railgun* testé par BAE Systems

La première quinzaine du mois de juillet 2013 a constitué une étape importante en marquant la fin de la phase 1 du contrat de l'US Navy (ONR) qui mettait en concurrence General Atomics et BAE Systems. L'attribution de la phase 2 échoit à BAE (allié à IAP et SAIC) pour un montant de 34,5 millions de dollars. BAE utilise des bancs de condensateurs pour stocker l'énergie alors que son concurrent utilisait des alternateurs contrarotatifs.

Après avoir démontré la faisabilité du tir d'un coup, il s'agit maintenant de passer à des tirs répétitifs en résolvant les problèmes thermiques et de rechargement. L'horizon pour l'installation à bord est 2020/2025.

En France, c'est l'Institut de Saint-Louis (ISL + DCNS + MBDA) qui a les compétences sur le sujet. Il affiche un délai de 15/20 ans entre l'étude exploratoire et l'intégration à bord.

Le laser

Les armes laser envisagées pour équiper les bâtiments sont des armes d'autodéfense destinées à abattre des drones aériens et à neutraliser des petites embarcations.

Leur intérêt opérationnel est d'avoir une durée de trajet quasi nulle et donc de confondre but actuel et but tiré ; leur intérêt économique est de ne nécessiter ni projectile ni soute à munitions ni dispositif de chargement, le prix du coup tiré est celui de l'électricité consommée. Mais les essais ont confirmé l'effet néfaste des turbulences atmosphériques et l'insensibilité de certains matériaux (aluminium) à l'illumination laser.

Les problèmes à résoudre concernent la fourniture de l'énergie électrique, le choix de la nature du laser et de sa fréquence, la finesse du faisceau, la quantité d'énergie transportée, la précision du pointage pendant la rafale d'engagement d'une cible.

L'affût supporte trois tubes laser :
- le premier faisceau est un « poisson pilote » qui permet d'apprécier les perturbations atmosphériques et de calculer les corrections de pointage pour en tenir compte,
- le deuxième faisceau assure la poursuite de la cible afin de permettre son illumination en un point précis pendant quelques secondes,
- le troisième faisceau transporte l'énergie nécessaire au dépôt d'une vingtaine de kW sur une partie sensible de l'embarcation ou du drone assaillants.

Compte tenu de la puissance exigée du rayon laser, de son rendement (10 à 20%) et du temps d'application du faisceau sur la cible (quelques secondes), des centaines de MJ sont nécessaires par engagement. On notera que le système à l'essai en 2013 comportait sa propre source d'énergie en *shelter*, évitant ainsi de mettre à contribution la gestion électrique du bord.

D.R.

L'arme laser essayée à bord de l'USS *Dewey*

Plusieurs types de laser peuvent être envisagés : laser à état solide, laser chimique, laser à électrons libres. Au bénéfice de la sécurité et de l'encombrement, c'est le laser à état solide qui est utilisé pour le matériel naval.

A la suite des essais conduits lors de l'été 2012 au large de San Diego à bord de l'USS *Dewey* (DDG 105), la Marine américaine a choisi l'USS *Ponce* (LPD 15)

D.R.

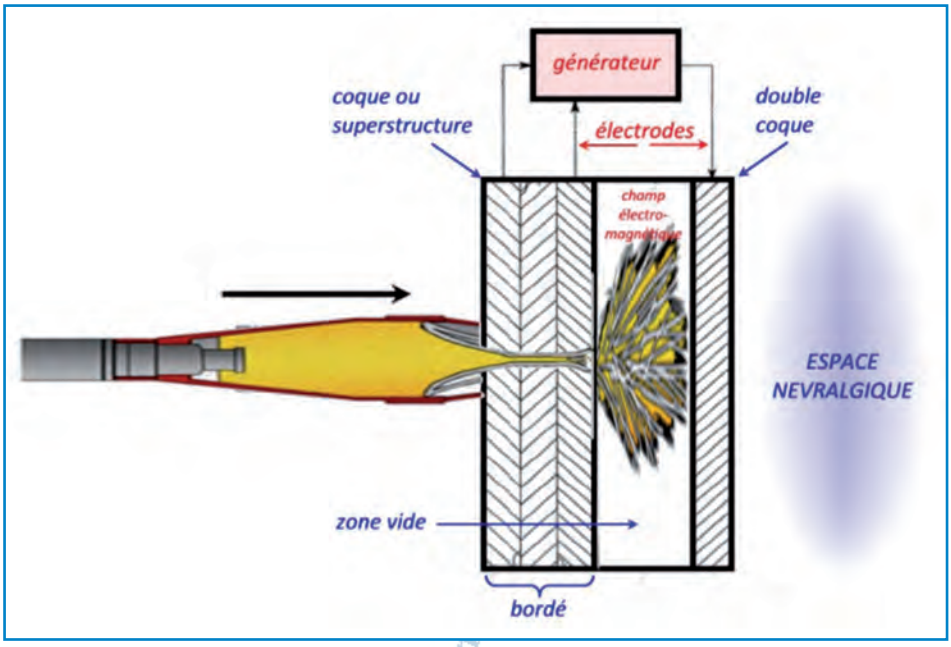
La plage AR de l'USS *Dewey* lors des essais

pour poursuivre les essais, avec comme objectif l'installation de l'arme laser en 2016 à bord des DDG *Arleigh Burke* et des *Littoral Combat Ships*.

La protection

Le CVN 78 *Gerald Ford* est partiellement équipé d'une ceinture électromagnétique (DAPS = *Dynamic Armor Protection System*). Il s'agit d'un blindage creux dans lequel circule une énorme charge électromagnétique déclenchée par l'impact d'un projectile.

D.R.



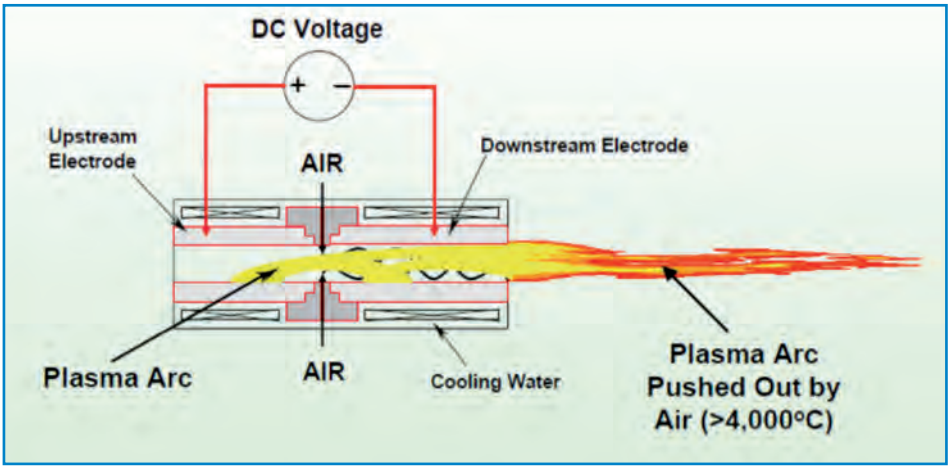
Dispersion d'un jet de plasma par un champ électromagnétique

L'objectif est de protéger certains locaux, soutes ou compartiments contre l'effet des charges creuses qui constituent la charge militaire de la plupart des missiles antinavires. L'effet dévastateur de la charge creuse est dû l'émission d'un jet de plasma de 5 000°C à 10 000 m/s.

Ce dard, après avoir percé la paroi extérieure de la coque est neutralisé par l'intense champ électromagnétique qui – tel le soufflement d'une bougie – disperse l'énergie du plasma entre les deux parois qui protègent ainsi le local contigu.

Les servitudes

Une utilisation intensive de l'électricité plus inattendue que les précédentes concerne la destruction des déchets. Il ne s'agit plus d'annihiler l'effet du plasma comme dans le DAPS mais au contraire de générer un plasma pour détruire des déchets préalablement déchiquetés ou broyés.



D.R.

Schéma d'une torche à plasma (Plasma Arc Torch)

Deux entreprises canadiennes – NSWC Carderock et PyroGenis – travaillent depuis plus de 20 ans sur l'utilisation du plasma pour effectuer une réduction propre des déchets. Après une installation civile sur le M/S *Carnival Fantasy*, c'est un marché au profit de l'USS *Gerald Ford* qui a permis de mettre au point une usine capable de traiter 3 tonnes de déchets par jour dans un encombrement cinq fois moindre qu'un incinérateur et avec un taux de rejet de 124 mg (CO) / MJ.

Une torche à plasma de 5000°C transforme carton, bois, plastique, canettes, bouteilles, aliments, huile de vidange … en gaz dépollués, en blocs vitrifiés et en lingots métalliques.

La mise en œuvre (simple commande marche/arrêt) et l'entretien (nettoyage des suies) ont satisfait l'équipe de l'USS *Carl Vinson* chargé de la recette en usine avant la livraison au *Gerald Ford* qui a eu lieu dès novembre 2011.

D.R.

Introduction dans le déchiqueteur

Influence sur l'architecture des bâtiments

Il faut en prendre son parti, l'élégance, l'harmonie des formes et des proportions ne seront vraisemblablement pas favorisées par l'emploi massif de l'électricité à bord des bâtiments. Si l'électrification de la propulsion permet aux architectes navals de mieux répartir les masses et les volumes qui lui sont nécessaires dans l'ensemble du bord, les armes et les équipements leur imposeront des contraintes qui leur feront sacrifier l'esthétique.

Terminons simplement par le cas de la détection. Les radars à plaque marqueront les mâtures de leurs exigences. Pour assurer la discrimination de petites cibles à grande distance puis leur poursuite sur tout l'horizon, ce sont plusieurs dizaines de MW que dépenseront ces plaques qu'il conviendra non seulement d'alimenter mais aussi de refroidir.

Que sera le navire "vraiment tout électrique" ? Comme d'habitude : un compromis entre les besoins de la mission, des armes, de la plate-forme … et des hommes qui continueront à le servir sous la garde de saint Elme.

IFM Institut français de la Mer