

— ÉTUDES MARINES —

Les opinions émises dans les articles n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs.

Directeur de la publication
Vice-amiral Thierry Rousseau

Rédacteurs en chef
Cyrille P. Coutansais
Enseigne de vaisseau Hélène Dupuis

Avec la précieuse collaboration du Service prépresse de la Marine nationale
pour les infographies

Centre d'études stratégiques de la Marine (CESM)
Case 08 – 1, place Joffre – 75700 Paris SP 07
01 44 42 82 13 – cesm.editions.fct@intradef.gouv.fr

— ÉTUDES MARINES —

RUPTURES

N°12 – Juin 2017
Centre d'études stratégiques de la Marine

SOMMAIRE

PRÉFACE

Vice-amiral Thierry Rousseau 6

L'HUMAIN

« La mer apprend à penser flou »

Entretien avec Michel Serres 12

Sept milliards et demi d'humains aujourd'hui, combien demain ?

Gilles Pison 20

Les ruptures RH de la Marine

Commissaire principal François Millet 30

LES RESSOURCES

L'éolien en mer

Vincent Guénard 40

Ressources minérales marines : de nécessaires innovations et ruptures technologiques

Alexandre Luczkiewicz 50

LA TECHNIQUE

- «L'industrie 4.0, c'est la 4^e révolution industrielle»**
Entretien avec Olivier Scalabre 64
- La fabrication additive: une révolution au XXI^e siècle**
Joël Rosenberg 72
- La cybersécurité du navire de transport: un enjeu essentiel pour l'avenir?**
Sébastien Le Vey 80
- Les drones au service de la mer: un outil en pleine évolution?**
Océane Zubeldia 88
- «Nous sommes au commencement d'une nouvelle ère»**
Entretien avec Jacques Rougerie 96

PRÉFACE

Vice-amiral Thierry ROUSSEAU

Directeur du Centre d'études stratégiques de la Marine

Comme leur nom l'indique, les *Études marines* ont vocation à traiter de tous les sujets intéressant ou concernant la mer, à condition, et c'est le cas pour la très grande majorité d'entre eux, que la Marine nationale soit concernée.

Avec le recul que m'autorisent près de trois années comme directeur de la publication, je remarque que la plupart des présentations à vocation pédagogique sur la mer et à propos de la Marine présentent des ruptures autour d'enjeux divers.

Ici même, nous avons régulièrement abordé cette dimension, par exemple sous un angle technologique (*Abysses* - juin 2015), géographique (*Outre-mer* - décembre 2015) ou stratégique (*Marines d'ailleurs* - juin 2016).

Terminer 40 ans de carrière et ces trois dernières années passionnantes ponctuées d'*Études marines* semestrielles sur un éclairage de ces ruptures en mer permet d'illustrer que nous entrons vraiment dans un monde nouveau. Et comme la question fondamentale est celle de la place de l'Homme dans ce monde, j'ai demandé à deux académiciens d'ouvrir et de fermer cette *Étude*. Qu'ils soient tous deux remerciés de leur accessibilité, de leur fidélité et de leur sympathie permanente pour les marins. Leur exigence constante vers la réflexion, l'engagement et la beauté, si essentiels en mer, est pour nous un signe de confiance qui nous oblige.

Parlons ruptures! Non seulement ce sont des changements majeurs, mais ces derniers ne deviennent ruptures que lorsqu'après leur survenance plus rien n'est comme avant, tout est remis en question et qu'au minimum notre perception du monde est modifiée. La mer est habituée aux ruptures comme *La Mer dans l'Histoire* (hors-série d'*Études marines* - mars 2017) nous l'a récemment rappelé. Celles qui nous attendent pourraient marquer ce temps de «l'océanotemporain» qui y est défini.

Il est trop tôt pour connaître toutes les caractéristiques de ce monde nouveau qui perce et pour en appréhender ses conséquences, mais il est largement l'heure de commencer à y réfléchir: c'est l'objectif de ce numéro qui débouche sur encore plus de questions. Permettez-moi d'en aborder quelques-unes.

Aux ruptures liées à la technologie dont nous commençons à percevoir les effets semblent s'ajouter en priorité deux grands domaines: les ruptures liées aux ressources et celles liées à l'Homme.

Les ruptures liées à l'Homme sont soulevées par Michel Serres. En cohérence avec l'approche scientifique qu'il prône, aborder la question démographique a l'avantage

d'une parfaite maîtrise sur un temps déjà long. L'impact pour la Marine de cette évolution générationnelle est déjà pris en compte dans les réflexions de politique des ressources humaines, même si leurs conséquences ne peuvent pas, aujourd'hui, être totalement appréhendées. J'en vois par exemple une première, fondamentale : comment commandera-t-on, en particulier au combat naval, si rare et si intense, ces jeunes ? Et comment eux, à terme, commanderont-ils ? Le partage de cette nouvelle culture du commandement ne sera assurément pas la phase la plus aisée, mais la qualité de l'outil de formation de la Marine laisse espérer le meilleur, et peut-être l'exemplaire.

Les ruptures liées à la technologie sont les plus connues, car les plus concrètes, donc les plus présentes. Elles commencent déjà à poindre : au-delà des problématiques « cyber » et de l'arrivée des drones, quelle logistique des forces navales à la mer avec l'imprimante 3D ? À plus long terme, jusqu'où envisager l'autonomie des navires futurs, quelle intelligence en mer lorsque l'on y connaît l'importance de l'expérience ? Et, à encore plus long terme (quoique...), il serait idiot voire imprudent de négliger les perspectives offertes par la découverte des richesses technologiques ou « biotechnologiques » du monde marin, susceptibles encore d'apporter beaucoup à notre monde terrestre à peu près fini.

Les ruptures liées aux ressources découlent de ces deux dimensions de découverte et de nécessité pour l'Homme, donc de convoitises automatiquement générées. Ainsi des ressources minérales en mer aux énergies marines renouvelables qui, en plus de l'autonomie, apportent la production locale d'énergie, constituant autant de nouveaux enjeux stratégiques. Il faut donc au minimum veiller à préserver les ressources minérales qui sont le patrimoine de notre pays, mais aussi être vigilants concernant les énergies marines renouvelables dont la production passe par des câbles sous-marins pouvant devenir autant de cibles.

Une dernière particularité : tout cela va vite, très vite, et là est peut-être la véritable nouveauté. L'adaptation permanente est nécessaire à la fois pour prévenir les brutalités entraînées par ces ruptures, mais aussi pour les transformer en opportunités. Et nous devons, nous marins, prendre toute notre part à cette dynamique épuisante, ne serait-ce que pour deux raisons majeures : l'accès à la mer, même s'il est de plus en plus partagé, restera toujours difficile et l'affaire de professionnels, et la multiplicité des acteurs fait de la mer une source de convoitises qu'il conviendra toujours de réguler.

Il me reste à remercier tous ceux qui nous ont aidés à écrire cette *Étude* : sans eux, sans ce monde des amis de la mer et de la Marine, cette revue n'existerait pas et vous êtes nombreux à dire qu'elle manquerait. Vos encouragements sont notre soutien.

Quelques sujets évoqués dans ces pages feront assurément des thèmes passionnants pour de futures *Études Marines*.

Bonne lecture et merci pour votre fidélité!

Vice-amiral Thierry Rousseau

L'HUMAIN



L'Homme est au cœur
des phénomènes de ruptures.
© *Marine nationale / M. Tapon.*

« La mer apprend à penser flou »

Entretien avec Michel SERRES

Philosophe - Membre de l'Académie française

Études Marines: Dans Darwin, Bonaparte et le samaritain, vous identifiez comme une rupture majeure le basculement de notre monde dans une civilisation majoritairement urbaine...

Michel Serres: Oui, les chiffres sont bruts: en 1900, la France comptait 65 % de paysans, aujourd'hui nous sommes tombés à 3,6 %. Mais ce que les chiffres ne disent pas, c'est toute la civilisation qui a disparu avec cet effondrement. Les patois par exemple étaient majoritaires: 51 % des soldats de la guerre de 14 ne parlaient pas français et s'exprimaient en alsacien, breton, picard, gascon... Aujourd'hui, ces langues-là ont disparu ou à peu près. Et inversement, les citadins n'ont plus aucune idée de ce que c'est qu'une vache... C'est extraordinaire! Tout comme l'ignorance devant l'univers catholique, si lié à cette civilisation: si je prends 1 000 étudiants et que je prononce le mot eucharistie, 80 % ne savent pas ce que c'est. Il y a une sorte de décollage de cette culture-là. Pas seulement de la culture religieuse d'ailleurs, de la culture classique en général. Cette mutation peut se mesurer à travers un chiffre: 37 000. Vous savez qu'à l'Académie, nous avons à disposition tous les dictionnaires précédents depuis Richelieu. Et nous faisons des calculs sur le gradient entre deux dictionnaires successifs, qui s'établit en moyenne dans une fenêtre entre trois et cinq milles mots, et ce, depuis la fondation de l'Académie. Mais, entre le dernier dictionnaire et celui que nous préparons – chaque dictionnaire se réalise tous les quinze ans à peu près, le temps que la langue se dépose –, le gradient est de 37 000 mots. Nous avons contacté nos collègues portugais, anglais... Et c'est à peu près partout pareil. Il semble que ce soit dû aux métiers. Vous prenez les métiers de l'agriculture, 1 000 mots ont disparu: le maréchal-ferrant, le joug, les émouchettes... Dans la marine, c'est pareil. Le langage de Thomas Coville n'est pas celui d'un marin à voile du début du siècle ou même de marins à coque de fer des années 1950.

L'autre point souligné dans votre livre, c'est la paix, état singulièrement nouveau pour notre Vieux Continent.

Nous sommes en effet en paix depuis 70 ans, ce qui est unique dans l'Histoire. Parce que 70 ans de paix, en Europe, il faut remonter avant la guerre de Troie, au moins! L'humanité, en 4 000 ans, a connu 5 % ou 6 % de temps de paix et nous, tout d'un coup, on est en paix. Sauf que nous n'avons peut-être pas encore intégré cet état. Nos cerveaux, formatés par des millénaires « d'état de guerre », n'arrivent pas encore à appréhender que nous mourrons de bien autre chose. Si vous tapez sur internet « causes de mortalité dans le monde », vous allez voir apparaître un tableau avec des chiffres de l'ONU présentés par ordre décroissant et le dernier, qui est presque

négligeable, c'est « guerres et violences terroristes »... C'est un peu comme le jour où les cosmonautes ont fait voir la Terre depuis l'espace : cela change tout. Imaginez : jusqu'alors, quand l'être humain avançait sur Terre, l'horizon fuyait. Avec l'aventure spatiale, on découvre qu'à mesure que l'on monte, l'horizon commence à s'arrondir puis se finit. Les philosophes ont toujours pensé que nous étions des êtres finis dans un monde infini mais aujourd'hui nous savons que nous sommes des êtres infinis dans un monde fini. Reste à réaliser cette rupture, à se déshabituer de siècles, de millénaires de vision différente.

Vous insistez sur une autre rupture, liée à l'espérance de vie, en soulignant que nos arrière-grands-parents avaient à peu près dix ans d'espérance de vie commune...

Oui, une femme de 60 ans aujourd'hui est plus loin de sa mort qu'un nouveau-né en 1700. Alors, cela a des effets positifs – l'être humain a notamment du temps devant lui pour épanouir son individualité –, mais aussi des effets problématiques, singulièrement concernant la transmission des richesses. Si vous lisez un roman de Dickens ou de Balzac, le héros, à 30 ans, est en train de dilapider la fortune dont il vient d'hériter. Que se passe-t-il aujourd'hui ? Le grand-père va mourir, bien entendu, mais pour transmettre sa fortune à qui ? À sa fille qui a 60 ans. Donc le patrimoine aujourd'hui est en train d'avoir comme point d'accumulation des vieillards quand les jeunes n'en ont plus. Et cela change complètement l'économie, la banque, la fiscalité... Tout ! Les gens de votre âge n'ont plus d'argent et ne peuvent plus entreprendre : il faudrait changer les droits de succession rapidement là-dessus. Cela explique aussi la vague de conservatisme qui est en train d'envahir le monde : Poutine, Erdoğan, Trump, le *Brexit*, cela est dû aux vieux, à la bande de gens qui ont la trouille du monde contemporain !

Pour en revenir aux aspects positifs de l'espérance de vie, elle permet de construire l'individu.

L'invention de l'individu a été très longue. Je crois que c'est Saint Paul qui l'a inventé. À un moment, dans l'épître aux Galates, il dit : « il n'y a plus ni Juif, ni Grec, ni esclave, ni homme libre, ni homme, ni femme, mais toi et toi seul devant Dieu ». Cela n'était jamais arrivé. En écrivant cela, « il n'y a plus ni Juif, ni Grec », il essaie de défaire des appartenances. Mais une fois cet individu inventé, il n'est pas né pour autant. Il a fallu l'écrire, *Les Confessions* de Saint Augustin, celles de Rousseau, Descartes bien sûr et il a même fallu la photographie je crois. Parce que la peinture ne faisait que

montrer des appartenances : le roi, le banquier, le capitaine, etc. Avec la photographie, on dévoile son intimité : ses enfants, sa petite amie... Je crois que l'individu est né très récemment... De mon temps, on disait encore « je suis Gascon » ; on ne disait pas « je suis Michel Serres ». Regardez la carte d'identité, elle ne comporte que vos appartenances : il y a beaucoup de gens qui portent votre prénom, un peu moins votre nom. Certes, on est né tel jour mais il y a beaucoup de gens qui sont nés le même jour au même endroit. Aujourd'hui, ces appartenances ne font plus sens. Je donne beaucoup d'importance au fait que l'équipe de France de football ait fait grève à la Coupe du monde 2010. C'est un moment vraiment important, car cela signifie : « nous ne savons plus faire équipe ». Les appartenances anciennes disparaissent et le grand problème d'aujourd'hui c'est d'en recréer de nouvelles. C'est l'aventure la plus passionnante aujourd'hui.

Un signe que les appartenances se recomposent de manière souterraine est sans doute la manifestation post-attentat *Charlie-Hebdo*...

C'était un moment très émouvant, oui... Quatre millions de personnes dans les rues sans que le pouvoir n'ait donné d'ordre... Les gens ont eu besoin de se retrouver. C'est la première manifestation que je vois dans ma vie où il n'y avait pas de pour ou contre, juste des applaudissements de temps en temps et un silence... J'étais fier de la France. Je me suis dit voilà une société mûre, une société nouvelle, une société qui fait voir ce qu'elle est. J'étais vraiment bluffé... Les citoyens ne contestent plus l'État, ils l'ignorent. Et c'est d'ailleurs toute la difficulté : nos institutions, conçues pour la plupart sous Napoléon I^{er}, ne collent plus à la réalité, c'est entendu, mais qu'imaginez-vous à la place ? C'est sans doute le problème le plus difficile à résoudre aujourd'hui. On ne quittera pas le régime démocratique, c'est certain, mais il faut lui trouver une forme nouvelle, plus directe. C'est très difficile, on mettra peut-être longtemps à trouver le moyen de concrétiser cette idée en puissance dans le monde numérique, cette idée de démocratie directe, participative. Comme solution, on évoque souvent la démocratie athénienne et ses systèmes de tirage au sort, mais c'était une cité, ils n'étaient pas très nombreux, ils pouvaient à la rigueur se connaître tous. Et puis il y avait des esclaves, donc on avait du temps à consacrer aux débats, à la chose publique. Alors évidemment, avec l'intelligence artificielle, la robotisation, nous entrons dans ce que j'avais prédit il y a une quinzaine d'années, la fin du travail, ce qui peut nous laisser plus de temps pour l'engagement démocratique, associatif, etc. Mais il faut penser tout cela, il y a toute une philosophie politique à fonder, à refonder.

/...

Et ceci dans un contexte où notre rapport au temps s'accélère, où on ne prend plus le temps de s'arrêter, de prendre du recul.

Oui, cela complique les choses. D'ailleurs, j'ai beaucoup critiqué Sartre en son temps à cause de cela. Il voulait à toute force que l'on s'engage. Il l'a fait et du coup, pris dans un mouvement perpétuel, il a raté le monde contemporain. Je suis frappé par le fait que le nombre de propositions de nouvelle société ait été considérable au XIX^e siècle et nul au XX^e : on a inventé le fascisme et le nazisme, c'est assez pauvre !

Peut-être sommes-nous aussi en déficit de passeurs, de personnes qui aident le citoyen à comprendre les évolutions techniques. Au XIX^e, nous avons quelqu'un comme Jules Verne par exemple...

Il nous manque un Jules Verne. C'est certain. Mais pour une raison très profonde, je crois, très, très profonde : nos représentants politiques, nos journalistes, nos administrateurs – ceux au fond qui ont le pouvoir depuis maintenant un bon demi-siècle – sont formés aux sciences humaines et exclusivement aux sciences humaines. Or, le monde moderne que nous évoquons s'est construit sous la pression de la chimie, la biochimie, des sciences de la vie et de la terre, de l'informatique, de la géophysique, rien que des sciences dures. Et ces messieurs n'en savent pas un seul mot. Cela fait une rupture terrible. C'est la raison pour laquelle le monde institutionnel ne comprend plus les évolutions que nous vivons. Il faudrait un programme de mathématiques à l'ENA... Ou de physique théorique, quantique. Au XVIII^e par exemple, Laplace, le grand théoricien de la mécanique céleste, est devenu préfet. Il faudrait une instance, pas loin du gouvernement, qui soit à même de réexpliquer ce qu'ils ne savent pas. Je serais pour un Conseil des Sages, aux côtés du Sénat ou de je-ne-sais-quelle institution, qui serait formé de quelques scientifiques. La question du climat touche à ces problèmes-là. Ce sont des problèmes hautement politiques mais qui sont en dernière analyse des problèmes de statistiques. Il faut être assez bon pour dominer ces problèmes-là. Quand vous pensez par exemple que l'État a aujourd'hui ce projet de mettre au nord de Paris une université exclusivement dédiée aux sciences humaines – le campus Condorcet – et de laisser au sud l'université d'Orsay, exclusivement réservée aux sciences dures. Vous vous rendez compte du recul que cela représente pour la recherche ? C'est fou ! Il faudrait les couper en deux et les marier.

Nous voudrions aborder maintenant la mer : vous sentez-vous toujours marin après votre expérience dans la Marine nationale ?

Je pense que je le serai toujours. Je ne sais pas si vous connaissez les rites anciens de l'Église catholique, mais il y avait un sacrement qu'on appelait l'ordre. C'était l'apprenti-prêtre qui devenait prêtre. Il y avait dans ce sacrement de l'ordre un mot qui m'a toujours frappé, c'est « tu es *sacerdos in aeternum* ». Tu es prêtre pour l'éternité. Je n'ai pas été marin très longtemps, mais dès que vous êtes marin, vous l'êtes pour l'éternité. C'est le sacre dans l'absolu. Vous faites partie d'un autre monde. Par la suite, j'ai un peu navigué, beaucoup sur les paquebots, mais je suis marin pour l'éternité... Je suis attaché à la Marine comme une branche à l'arbre.

Cette expérience a forgé votre regard de philosophe ?

C'est l'homme qui change en entier, pas seulement le philosophe. C'est la conduite humaine, corporelle, autant qu'intellectuelle, culturelle ou linguistique... Le changement est global. On apprend à penser flou. La mer, ce n'est pas du solide, c'est du fluide; et tout ce qui est fluide est original. Dès que vous m'avez appelé en me parlant de la mer, j'ai dit oui tout de suite. Je suis votre ami, il y a une famille de marins. Chaque fois que je vais faire une conférence à l'École navale, je suis ému.

Quel a été votre parcours dans la Marine ?

J'ai navigué sur *La Surprise* et *Le Jauréguiberry* sur lequel a été tourné *Le Crabe Tambour*. Je suis d'ailleurs allé voir quatre fois le film ! Pour bien repérer si c'était toujours le même bateau, la même course, etc. Et puis ensuite, j'ai été à Djibouti; c'était après la guerre de Suez, le canal était fermé. J'ai passé un certain temps à réparer le bateau, à l'exercer, puis à remonter la mer Rouge pour aller rouvrir le canal. À l'époque, on était au sextant: on prenait la hauteur à midi et à la première étoile le soir, mais c'était flou, enfin c'était tellement approximatif... Mais la merveille, c'est que d'erreur en erreur, on rentrait au port !

/...

Quel regard justement portez-vous sur toutes ces nouvelles technologies qui permettent désormais aux marins de rester en contact avec la terre?

C'est une rupture majeure, c'est évident : il y a à peine trente ans, le marin partait et « au revoir ». On attendait sur la plage qu'il revienne... Ou qu'il ne revienne pas ! Et quand c'était les voiliers, cela dépendait du vent et puis des naufrages. Mais on ignorait les naufrages. Ils partaient pour ne jamais revenir. Vous vous rendez compte ? Aujourd'hui, le marin va encore plus loin, mais il est toujours là. Quand j'étais dans la Marine, je me suis donc retrouvé à Djibouti. Et j'avais une petite amie, forcément. Seulement elle était étudiante à Bordeaux. Alors on s'écrivait et quand on s'écrivait et qu'on est amoureux, on décrit son état d'âme ou on répond à l'état d'âme de la demoiselle. Mais l'état d'âme date de deux mois ! En fait, je crois que la véritable correspondance amoureuse date du portable. C'est-à-dire que je peux réagir à ton émotion de maintenant et je peux vraiment faire communiquer mon état d'âme et ton état d'âme. Il y a là une rupture intéressante de l'espace et du temps : il n'y a plus d'espace, il n'y a plus de temps. Enfin c'est un autre temps, une autre simultanéité, comme dirait Einstein. Ce qui n'exclut pas des appartenances. Auparavant il y avait l'appartenance exclusive du bord, il n'y avait que cette société de possible. Il m'est arrivé de naviguer plus de 40 jours sans voir la terre, eh bien, si tu ne t'entends pas avec ton voisin, tu es mort. Il y avait une sorte de nécessité. Aujourd'hui, il y a plusieurs appartenances : il y a l'esprit du bord mais le marin a aussi sa famille, ses relations à terre. Une sorte de respiration possible.

Enfin vous aurez connu, rien que dans votre vie, un nombre de ruptures absolument considérable.

Oui et je crois que c'est une chance. À l'École navale, j'ai connu ce que l'on appelait autrefois les mathématiques classiques, le calcul infinitésimal, etc. Ensuite, à l'École normale, je suis en section lettres et je vais fréquenter mes copains scientifiques, parce qu'évidemment, ça me manquait un peu, ce qui me permet de découvrir l'analyse structurale, les mathématiques modernes... Donc, j'ai appris deux mathématiques, ce qui m'a fait un bien fou. Puis l'informatique est arrivée avec ses algorithmes. D'autre part, au cours des années 1970, j'ai fait la connaissance de Jacques Monod¹ qui m'a ouvert à l'ADN. J'ai eu la chance d'avoir beaucoup de parcours intellectuels qui m'ont habitué à changer de regard. Du coup, on les voit les ruptures : on se dit que cette physique-là n'est peut-être pas la seule... Cette biologie-là n'est peut-être pas la seule...

1. Prix Nobel de médecine en 1965.

C'est d'autant plus précieux qu'à la lecture de votre livre, on a le sentiment que les ruptures sont souvent indiscernables, fruit d'inventions bien souvent anonymes...

En effet, qui a inventé la roue par exemple? La sécurité sociale, l'essuie-glace ou même internet? Autant d'anonymes et, quand l'inventeur est connu, il est bien souvent victime de son invention. Prenez Semmelweis – sur lequel Céline a fait sa thèse – : ce gynécologue avait deux services, l'un tenu par les bonnes sœurs et l'autre par les étudiants en médecine. Or, il y avait une différence de mortalité énorme entre les deux services : on mourait moins chez les bonnes sœurs, ce que l'on ne pouvait attribuer à la prière! À force d'observation, il finit par demander à ses étudiants en médecine de se laver les mains entre le moment où ils dépècent les cadavres pour l'anatomie et le moment où ils accouchent les femmes. Ils ne se lavaient pas les mains! Le résultat a été spectaculaire, mais il a été destitué de son poste et est mort misérable. La société de l'époque, le corps médical dans son ensemble, ne saisissant pas la raison scientifique de cette baisse de mortalité, préféra le taxer de charlatanisme. La vérité met du temps à percoler dans une société qui a toujours beaucoup d'inertie.

On le voit encore aujourd'hui avec les fameux « ciseaux moléculaires », ce Crispr-Cas9 apte à modifier facilement le génome. C'est une révolution mais difficilement compréhensible.

Je crois qu'on ne peut pas l'imaginer. Je suis assez vieux pour avoir connu des professeurs de physiologie à la Sorbonne disant : « Vous savez, à l'Institut Pasteur, ils dépensent en pure perte les deniers de l'État en travaillant sur des molécules qui n'existent pas. » Et c'était l'ADN. Voilà, tout simplement. La loi de Newton a été refusée par l'Académie des sciences pendant cent ans! Et pour des raisons parfaitement rationnelles : comment imaginer qu'une force puisse se propager à distance? C'est de la magie. Il a fallu Laplace pour qu'ils se rendent à l'évidence. Sans doute allons-nous connaître une rupture de ce point de vue, liée à la collaboration entre générations. Je dis souvent : « Qu'est-ce que la science? La science c'est ce que le grand-père enseigne à son petit-fils. Qu'est-ce que la technologie? C'est ce que le petit-fils apprend à son grand-père. » Cet apport mutuel, cet équilibre nouveau entre les âges laisse espérer une humanité apte à relever la série de transformations que nous vivons.

Propos recueillis par l'EV2 Hélène Dupuis et Cyrille P. Coutansais

Sept milliards et demi d'humains aujourd'hui, combien demain ?

Gilles PISON

Professeur au Muséum national d'Histoire naturelle

Chercheur associé à l'Institut national d'études démographiques (INED)

D'après les Nations unies, la population mondiale franchira le seuil de 7,5 milliards d'individus en 2017. Elle n'en comptait qu'un milliard en 1800 et a donc été multipliée par sept et demi en un peu plus de deux siècles. Selon ces mêmes sources, elle devrait continuer de croître et pourrait atteindre plus de 11 milliards à la fin du XXI^e siècle. Les scénarios haut et bas encadrant ce scénario moyen conduisent respectivement à 17 et 7 milliards en 2100. Pourquoi la croissance devrait-elle se poursuivre? La stabilisation est-elle envisageable à terme? Quelle proportion des 7,5 milliards d'aujourd'hui vit sur les côtes, exposée aux risques de submersion, et quelle sera-t-elle demain? Telles sont quelques-unes des questions que nous allons aborder.

La croissance est liée à la transition démographique

Pendant des millénaires, la population n'a augmenté que très faiblement en raison d'un quasi-équilibre entre les naissances et les décès. Épidémies, famines frappaient à intervalles réguliers, faisant osciller la durée de vie moyenne entre 20 et 25 ans, en raison notamment d'une très forte mortalité infantile. Il fallait, pour équilibrer ces décès, une fécondité moyenne élevée, de l'ordre de 6 enfants par femme. Cet équilibre a été rompu il y a deux siècles dans le monde occidental. Avec l'essor économique, les premiers progrès de l'hygiène et de la médecine, ainsi que la mise en place des grands États modernes, les épidémies et les famines disparaissent progressivement d'Europe et d'Amérique du Nord. La mortalité, entre autres infantile, diminue. Les familles étant toujours aussi nombreuses, les naissances excèdent dorénavant les décès et la population s'accroît. Après une ou plusieurs générations, les adultes prennent conscience que la plupart des enfants échappent désormais à la mort. Ces derniers deviennent par ailleurs une charge dès lors qu'il faut les envoyer à l'école jusqu'à un âge élevé. Avec la diffusion des idées du siècle des Lumières, qui prônent l'individualisme et la critique des contraintes religieuses, un nouveau comportement se répand à travers l'Europe et l'Amérique du Nord: la limitation volontaire des naissances. Le nombre d'enfants par femme diminue, mais la mortalité poursuivant sa baisse, les naissances restent supérieures aux décès et la population continue de croître. Ce n'est que dans les générations ultérieures que cette croissance ralentit progressivement, lorsque le nombre de décès se stabilise et est rejoint par celui des naissances. La « transition démographique », comme on appelle ces changements des conditions de vie et des comportements, est alors achevée. Dans l'équilibre théorique moderne, qui n'a été observé dans aucun pays mais vers lequel tendent les pays développés, la fécondité serait proche de deux enfants par femme, la durée de vie moyenne égale ou supérieure à 70 ans et les naissances égaleraient à peu près les décès.

Cette histoire que les nations développées ont connue, les autres pays la vivent à leur tour, ce qui explique que leur population soit en pleine expansion et alimente la croissance démographique mondiale.

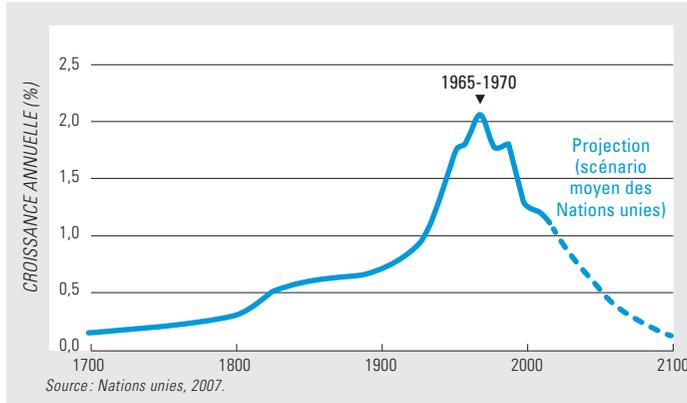
La croissance démographique va se poursuivre tout en décélérant

La population mondiale continue d'augmenter, mais à un rythme de plus en plus faible. La croissance démographique a atteint un maximum de plus de 2 % par an il y a cinquante ans, elle a diminué de moitié depuis (1,1 % en 2015) et devrait continuer de baisser jusqu'à la quasi-stabilisation de la population mondiale dans un siècle, autour de 11 milliards d'habitants d'après le scénario moyen des Nations unies.

L'accélération de cette croissance depuis deux siècles tient à l'entrée successive des différentes régions du monde dans la transition démographique. Le maximum d'il y a cinquante ans correspond à une période où la fécondité était encore élevée dans tous les pays du Sud, où les femmes mettent au monde entre 5 et 7 enfants en moyenne chacune. Ces pays avaient vu leur mortalité baisser depuis quelques années ou décennies en raison des avancées de l'hygiène et de la médecine et des progrès socio-économiques, même si elle restait beaucoup plus élevée que dans les pays du Nord. Il en résultait un excédent des naissances sur les décès qui alimentait une croissance démographique soutenue. Ce phénomène était à l'époque connu des seuls démographes, le grand public n'en ayant pris conscience que plus tard, lorsqu'il lui a été présenté comme une « explosion démographique ». Plus exactement, c'était le signe que les pays du Sud entraient à leur tour dans la transition démographique, de façon plus rapide que les pays du Nord des décennies auparavant. Des taux d'accroissement de l'ordre de 3 % par an (doublement en 23 ans) n'étaient pas rares, alors que dans l'Europe de 1880 à 1914, ceux qui restaient durablement autour de 1,5 % par an étaient exceptionnels.

Les démographes anticipaient le fait que la baisse de la mortalité dans les pays du Sud serait suivie tôt ou tard d'une baisse de la fécondité, comme cela avait été le cas dans les pays riches. La limitation volontaire des naissances avait mis du temps à se diffuser en Occident – apparue dès la fin du XVIII^e siècle dans certains pays, bien avant la contraception moderne, elle n'a touché l'ensemble de la population que dans la deuxième partie du XX^e siècle – et on pensait qu'il en serait de même dans les pays du Sud, y compris avec des programmes de contrôle des naissances. Les ethnologues confortaient ce point de vue en décrivant les sociétés de ces pays comme très attachées aux familles nombreuses et nullement prêtes à limiter leurs naissances.

Taux de croissance de la population mondiale de 1700 à 2100



Une surprise : la chute rapide de la fécondité en Asie et en Amérique latine

Les démographes ont été surpris quand les enquêtes ont révélé que la fécondité avait commencé à baisser très rapidement dans beaucoup de pays d'Asie et d'Amérique latine dans les années 1960 et 1970. Ils ont dû notamment revoir sensiblement à la baisse leur projection démographique pour ces continents, même si cette diminution de fécondité ne se manifestait pas immédiatement sur la croissance en raison de l'inertie démographique – tant que la population compte une proportion importante de jeunes adultes, même si chaque couple a peu d'enfants, le nombre total de naissances reste élevé.

Un des résultats est qu'en 2015 la fécondité mondiale n'est plus que de 2,5 enfants en moyenne par femme, soit deux fois moins qu'en 1950 (5 enfants). Mais la moyenne actuelle de 2,5 enfants recouvre une grande diversité de situations. La fécondité la plus basse est à Taïwan (1,0 enfant par femme) et la plus élevée au Niger (7,5 enfants). Dans la plupart des pays ou régions du monde, dont bon nombre du Sud, qui rassemblent au total plus de la moitié de l'humanité, la fécondité se situe en dessous du seuil de remplacement de 2,1 enfants par femme. C'est le cas au Vietnam (2,0 enfants par femme), au Brésil (1,8), en Iran (1,7), en Chine (1,6), en Thaïlande (1,5). Même en Inde, où la moyenne est de 2,4 enfants par femme, plusieurs États rassemblant au total plusieurs centaines de millions d'habitants (dont l'Andhra Pradesh, le Bengale occidental, le Karnataka, le Kerala, le Maharashtra, le Pendjab et le Tamil Nadu) sont aussi tombés sous le seuil de remplacement.

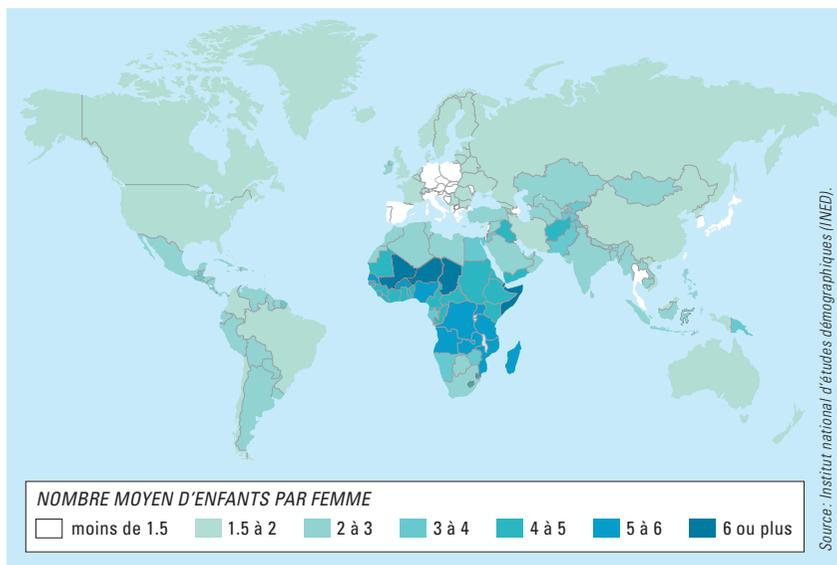
Parmi les régions à (encore) forte fécondité, supérieure à trois enfants par femme, on trouve presque toute l'Afrique intertropicale et les régions se situant dans une bande allant de l'Afghanistan jusqu'au nord de l'Inde en passant par le Pakistan. Il s'agit, pour la plupart, des régions les moins développées de la planète. C'est là que l'accroissement de population sera le plus important au cours de ce siècle, même si, comme partout ailleurs, la limitation volontaire des naissances devrait s'y généraliser à terme.

L'essor démographique de l'Afrique malgré le sida

L'un des grands changements démographiques à venir est le formidable accroissement de la population de l'Afrique qui, Afrique du Nord comprise, pourrait plus que quadrupler en un siècle, passant de 800 millions d'habitants en 2000 à 4,4 milliards en 2100 d'après le scénario moyen des Nations unies. Alors qu'un homme sur six vit aujourd'hui en Afrique, ce sera probablement un sur quatre en 2050 et peut-être un sur deux à un sur trois en 2100.

La baisse de la fécondité, amorcée dans les années 1980 dans quelques pays d'Afrique australe et orientale, se diffuse lentement ailleurs au sud du Sahara et touche les villes

Taux de fécondité dans le monde en 2015



plus que les campagnes, où vit encore la majorité de la population. Si la baisse de la fécondité y est pour l'instant plus lente que celle observée il y a quelques décennies en Asie et en Amérique latine, cela ne vient pas d'un refus de la contraception. Beaucoup de femmes africaines, même en milieu rural, souhaitent limiter ou espacer leurs naissances, mais souvent elles ne bénéficient pas de services adaptés pour y arriver. Quant aux programmes nationaux de limitation des naissances, ils sont peu efficaces, manquent de moyens, et surtout souffrent d'un défaut de motivation de leurs responsables et des personnels chargés de les mettre en œuvre sur le terrain. Beaucoup ne sont pas persuadés de l'intérêt de limiter les naissances y compris au plus haut niveau de l'État. C'est là une des différences avec l'Asie et l'Amérique latine des années 1960 et 1970, et l'un des obstacles à lever si l'on veut que la fécondité baisse plus rapidement en Afrique subsaharienne.

L'urbanisation croissante

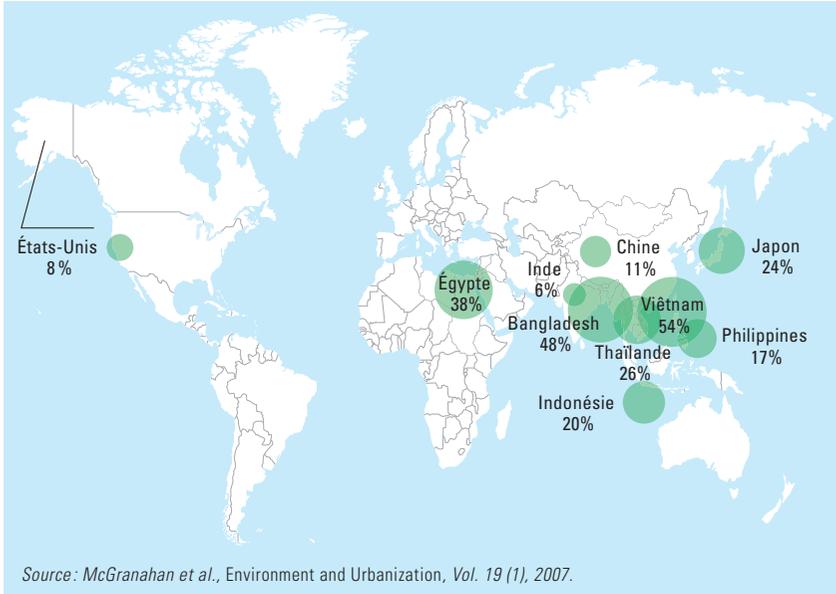
L'humanité a franchi un seuil historique en 2007 : la majorité des hommes vit désormais en ville. Seulement un homme sur dix l'habitait en 1900, et trois sur dix en 1950. De cinq sur dix en 2007, ils devraient être six sur dix en 2030. L'urbanisation progressive du monde devrait se poursuivre. Tout l'accroissement démographique à venir devrait être absorbé par les villes, de plus en plus nombreuses et de plus en plus grandes. Pour ce qui est de la campagne, la population humaine y vivant ne devrait plus guère augmenter, elle pourrait même diminuer.

L'urbanisation est plus ou moins avancée selon les continents : les plus développés, l'Europe, l'Amérique du Nord, sont très urbanisés (respectivement 74 % et 82 % de la population y vit en ville en 2015), mais l'Amérique latine, quoique moins développée, l'est également (80 %). En revanche, l'Afrique et l'Asie comptent encore une majorité de ruraux. Mais les urbains devraient bientôt y être majoritaires comme ailleurs et ces continents, les plus peuplés, abriteront demain la majorité des grandes cités.

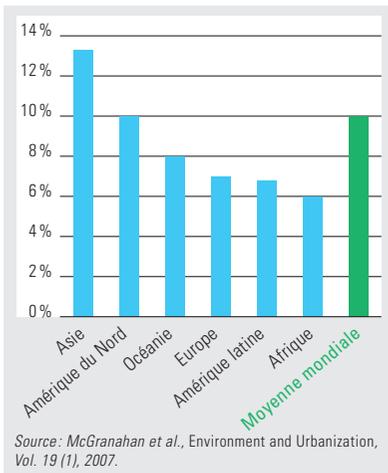
L'humanité concentrée sur les côtes

Historiquement, les humains, quand ils étaient agriculteurs et éleveurs, vivaient à côté de leurs champs et des pâturages de leurs animaux, pour la plupart éloignés de la mer. C'est l'urbanisation puis l'industrialisation qui les ont rapprochés des côtes, ce qui rendait les communications et le commerce plus faciles.

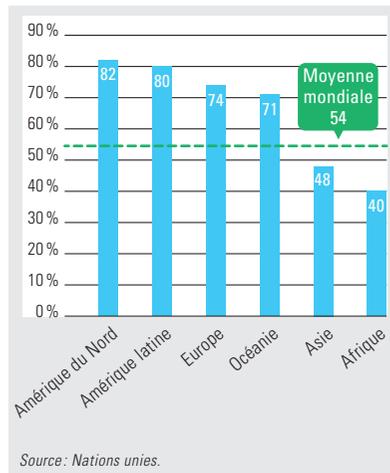
Proportion de la population vivant en zone côtière de faible altitude



Proportion de la population vivant en zone côtière par continent en 2000



Proportion de la population vivant en ville par continent en 2015



Mais vivre près de l'eau, notamment dans la zone côtière de faible altitude, expose aux inondations et aux submersions en cas de grosses tempêtes, notamment lorsqu'elles se combinent à de fortes marées ou à des hausses du niveau des fleuves. La fréquence de ce type d'événement risque d'augmenter avec le changement climatique et l'élévation du niveau des océans.

Pour examiner combien d'humains vivent aujourd'hui exposés aux risques d'inondation et de submersion sur les côtes et quelle part de la population totale ils représentent, considérons la bande côtière située à moins de 10 mètres d'altitude au-dessus du niveau de la mer, bande qui peut dans certaines régions aller loin à l'intérieur des terres, comme dans le cas des deltas. Elle couvre 2 % de la superficie totale des terres émergées, mais abrite 10 % de la population mondiale en 2000 et 13 % de la population urbaine. Près de deux villes de plus de 5 millions d'habitants sur trois sont situées dans cette zone. Les trois quarts de la population y résidant vivent en Asie alors que ce continent n'abrite que 60 % de la population mondiale. S'y trouvent notamment les grandes plaines inondables très peuplées que sont les vallées du Gange et du Brahmapoutre, qui forment ensemble le plus grand delta du monde, et les bassins du Mékong et du Yang-Tsé-Kiang, qui ont chacun une population importante. L'Asie comprend aussi de vastes régions côtières sujettes à des cyclones, comme le Bengale, les côtes de la mer de Chine méridionale, le Japon et les Philippines, qui abritent de nombreuses agglomérations très peuplées.

La proportion de la population vivant en zone côtière de faible altitude varie du simple au double selon le continent : elle est la plus élevée en Asie (13 %) et la plus faible en Amérique latine (6 %), avec des niveaux faibles également pour les autres continents relativement peuplés : Afrique (7 %), Europe (7 %), Amérique du Nord (8 %) et un niveau plus élevé, 10 %, pour l'Océanie.

Les pays abritant les populations vivant en zone côtière de faible altitude les plus nombreuses sont les trois pays les plus peuplés du monde, la Chine, l'Inde et les États-Unis, mais aussi des pays ayant une forte population et où la proportion vivant en zone de faible altitude est relativement élevée. C'est le cas notamment du Vietnam (où cette proportion est de 54 % en 2000), du Bangladesh (48 %) et de l'Égypte (38 %), pays ayant tous de vastes deltas fortement peuplés et qui font partie des 10 pays avec le plus d'habitants vivant dans cette zone¹.

1. Les îles ont souvent une part importante de leur population vivant en zone de faible altitude, certaines même, comme les atolls, ont toute leur population vivant quasiment au niveau de la mer, ce qui la rend particulièrement vulnérable au changement climatique. Mais même additionnés, les territoires insulaires n'abritent qu'une très faible part de la population mondiale vivant en zone côtière de faible altitude.

Les pauvres sont les plus menacés

Si vivre près des côtes expose au risque d'inondation et de submersion, toutes les franges de la population ne sont pas touchées de façon égale, les sous-groupes les plus pauvres étant les plus vulnérables. Dans les villes des pays du Sud, les habitants les plus modestes sont souvent obligés de s'installer en zone inondable car ils n'ont pas les moyens d'habiter ailleurs. Les sous-groupes favorisés qui habitent des quartiers huppés situés cependant en zone inondable ont les moyens de se protéger. Ils peuvent aussi s'échapper en cas d'inondation comme on l'a observé lors de l'ouragan Katrina à la Nouvelle-Orléans en 2005 ; ses victimes, des personnes restées sur place, étaient presque exclusivement des pauvres.

Les pays ayant une importante population vivant en zone côtière de faible altitude ne sont pas tous aussi vulnérables. Les riches Pays-Bas, qui luttent depuis longtemps contre les eaux de la mer, ont jusqu'ici trouvé les moyens de s'en protéger et il est probable qu'ils arriveront à s'adapter à la montée du niveau de la mer même si cela aura un coût important. Le Bangladesh en revanche, dont une partie importante est également menacée par les eaux, est plus vulnérable, car moins développé et moins bien armé pour faire face aux conséquences du changement climatique.

Il est difficile de bâtir des scénarios et de calculer des projections de la population qui vivra demain en zone littorale de faible altitude exposée aux risques de submersion. La première source d'incertitude tient au scénario de relèvement du niveau des mers et la seconde, aux projections démographiques elles-mêmes. Ces dernières nécessitent de formuler des hypothèses sur les évolutions de la fécondité et de la mortalité par type de milieu, urbain et rural, et par localisation, en bord de côte ou à l'intérieur des terres, mais aussi sur les migrations entre l'intérieur des terres et la côte, ceci pour chaque pays. Or, les hypothèses dans ces domaines ne peuvent être que très incertaines, contrairement à celles sur les évolutions de la fécondité et de la mortalité à l'échelle d'un pays entier, plus aisées à formuler et aussi *a priori* plus solides, même si elles présentent également une part d'incertitude notamment au-delà de quelques années ou décennies. S'il est donc difficile de proposer un chiffrage de la part de l'humanité qui vivra demain en zone littorale de faible altitude, il est très probable qu'elle sera plus élevée qu'aujourd'hui, le développement économique et l'urbanisation, qui vont se poursuivre, n'ayant fait que l'augmenter jusqu'ici. La Chine, par exemple, qui abrite la population vivant en zone de faible altitude la plus nombreuse, a justement connu une croissance de celle-ci particulièrement rapide ces dernières décennies, trois fois plus rapide pendant les années 1990 que la croissance démographique totale du pays. Le développement et la libéralisation de l'économie

ont favorisé l'urbanisation, notamment le long des côtes, et attiré les migrants, ces mouvements ayant été accélérés par la création de zones économiques spéciales en bord de mer qui ont renforcé l'avantage des côtes. On imagine mal que ces tendances s'inversent dans les prochaines décennies, en Chine ou ailleurs. Des politiques visant à aménager les zones littorales habitées et à promouvoir un développement des villes adapté, pour les rendre moins vulnérables aux inondations et aux submersions, sont certes souhaitables pour limiter les risques, mais empêcheront-elles leur augmentation avec le changement climatique ?

L'avenir de la population mondiale est en grande partie tracé à court terme. Les projections démographiques sont en effet relativement sûres lorsqu'il s'agit d'annoncer l'effectif de la population dans les dix, vingt ou trente prochaines années. La plupart des hommes qui vivront alors sont en effet déjà nés, on connaît leur nombre et on peut estimer sans trop d'erreurs la part de ceux aujourd'hui en vie qui ne le seront plus. Concernant les nouveau-nés qui viendront s'ajouter, leur nombre peut également être estimé car les femmes qui mettront au monde des enfants dans les vingt prochaines années sont déjà nées, on connaît leur effectif et on peut faire également une hypothèse sur leur fécondité. Au-delà des cinquante prochaines années, l'avenir est en revanche plein d'interrogations. Le modèle de la transition démographique, qui a fait ses preuves pour les évolutions des deux derniers siècles, ne nous est plus guère utile à cet horizon lointain.

Si les hommes peuvent dès maintenant réfléchir à l'équilibre à trouver à long terme, l'urgence est au court terme – les cinquante prochaines années. Il est illusoire de penser pouvoir beaucoup agir sur le nombre d'individus à cet horizon. S'il augmente, c'est à un rythme décélérant de lui-même, les hommes ayant fait le choix d'avoir peu d'enfants tout en leur assurant une vie longue et de qualité. L'humanité n'échappera cependant pas à un surcroît de 2 à 3 milliards d'habitants d'ici 2050, en raison de l'inertie démographique que nul ne peut empêcher. Il est possible d'agir en revanche sur les modes de vie, et ceci sans attendre, afin de les rendre plus respectueux de l'environnement et plus économes en ressources. La vraie question, celle dont dépend la survie de l'espèce humaine à terme, est finalement moins celle du nombre des hommes que celle de leur mode de vie.

Les ruptures RH de la Marine

Commissaire principal François MILLET

Bureau « Politique RH » de la Direction du personnel militaire de la Marine

Réfléchir aux ruptures stratégiques dans le milieu de la défense conduit tout naturellement à appréhender leurs conséquences dans les domaines tactique, technologique, capacitaire, logistique et même financier. La dimension RH, quant à elle, est rarement évoquée. Les bouleversements stratégiques aujourd'hui à l'œuvre ont évidemment des effets sur les ressources humaines au point même d'envisager l'hypothèse d'un phénomène de rupture RH. Le contexte géostratégique a en effet une incidence directe sur le niveau d'engagement opérationnel et donc l'activité des marins; quant aux ruptures technologiques, elles influent directement sur leur quotidien, dans la façon de travailler au sein des unités, à terre ou embarquées. Le « tout technologique » permet une optimisation poussée des équipages et modifie profondément leurs structures RH: l'automatisation conduit à réduire le nombre de marins nécessaire à la mise en œuvre de systèmes performants, mais nécessite un accroissement qualitatif des compétences. L'ampleur des évolutions que la Marine traverse aujourd'hui constitue, de ce point de vue, une véritable « révolution ».

À ces transformations s'ajoute un niveau de réformes continu et soutenu depuis 2008. La démarche adoptée, conjuguant déflation des effectifs et amélioration de l'efficacité, a profondément transformé et parfois déstabilisé l'environnement de travail des marins. La portée de ces différents bouleversements s'accroît avec l'émergence des générations Y puis Z qui tolèrent difficilement la coupure avec internet et semblent moins bien accepter que par le passé les contraintes liées au statut de militaire, en particulier la séparation d'avec ses proches. La place de la vie privée est devenue tellement centrale qu'elle conduit à une fragilisation du modèle RH. Au point, si l'on n'y prend garde, de s'apparenter à un début de fracture? S'il convient de ne pas noircir faussement le tableau d'ensemble et d'insister sur la qualité du personnel, les exemples actuels de certaines grandes marines amies, notamment la marine britannique, peuvent néanmoins alerter et doivent, au moins, sensibiliser à cette potentielle menace.

Analyser le paysage RH actuel pour en comprendre les ressorts avant d'examiner les moyens d'infléchir ce qui apparaît comme une nouvelle tendance de fond constitue une réflexion dont la Marine ne peut faire l'économie: c'est le moyen de garantir son attractivité et *in fine* sa soutenabilité.

L'attractivité, un enjeu majeur pour une armée professionnelle

L'écosystème RH de la Marine est dynamique pour préserver la jeunesse des équipages. Il se caractérise par sa logique de flux: près de 10% du personnel est renouvelé tous

les ans. L'institution recrute ainsi chaque année dans les mêmes volumes que LVMH, entreprise de 150 000 personnes, soit près de quatre fois sa taille.

La question de l'attractivité est donc essentielle pour une armée professionnelle qui ne peut fonctionner qu'avec l'adhésion pleine et entière de son personnel. Or, la Marine observe aujourd'hui un certain plafonnement en termes d'attractivité qui se traduit par des difficultés de recrutement, mais aussi de fidélisation.

Des exigences devenues anachroniques ?

Le métier de marin est exaltant mais exigeant. Les sujétions, notamment celles liées aux absences, souvent longues, sont nombreuses. Certes, ces caractéristiques ne sont pas nouvelles, elles sont aussi anciennes que le métier de marin. Mais elles sont indéniablement moins bien acceptées que dans un passé proche. Le décalage avec la société est plus douloureusement ressenti. Les griefs les plus fréquemment rencontrés sont, pêle-mêle : l'incertitude des programmes et l'imprévisibilité des absences, la forte disponibilité, la déconnexion des réseaux sociaux, l'éloignement du cocon familial, la mobilité géographique, l'usure liée au manque de récupérations, la charge de travail ou encore l'activité des conjoints malmenée par les absences et les déménagements. Soit autant de ruptures avec la vie civile qui doivent, dans la mesure du possible, être dépassées ou, à tout le moins, dont les effets doivent être limités pour conserver un niveau satisfaisant d'attractivité.

Un contexte de réformes déstabilisantes et de surchauffe opérationnelle

Outre ces impondérables qui fondent depuis toujours le métier de marin, le tempo des réformes qui se succèdent depuis la professionnalisation des armées et s'accélérent depuis 2008 a bouleversé en profondeur l'environnement de travail pour finalement contribuer à la fragilisation de la politique de fidélisation. L'instabilité des organisations, conséquence directe des réformes continues, les politiques de déflation des effectifs ont indéniablement altéré le moral. Confronté à une baisse objective de la qualité du soutien de proximité, le personnel peut en outre avoir le sentiment d'être contraint en permanence de s'adapter à de nouvelles procédures de travail.

En sus de ces bouleversements structurels, l'intensification de l'activité opérationnelle, tout particulièrement depuis trois ans, use le personnel. Le rythme des opérations à la mer est très soutenu avec une présence de la Marine sur cinq théâtres (Atlantique

nord, golfe Arabo-Persique, Méditerranée orientale, Méditerranée centrale, golfe de Guinée) au lieu des deux prévus par le Livre blanc. À ces nombreuses opérations s'ajoute la contribution à la Défense maritime du territoire (DMT) qui mobilise jusqu'à 10 % des effectifs quotidiennement, alors même que les missions de dissuasion nucléaire et de surveillance de notre immense ZEE¹ sont toujours assurées. Si cette activité leur donne du sens et favorise l'attractivité, elle fatigue les marins, use leurs familles et nuit *in fine* à leur fidélisation.

Ces exigences, inhérentes au métier de marin mais amplifiées par l'étendue des réformes, le contexte opérationnel et le décalage avec la société civile, ne sont-elles pas devenues anachroniques ? Qu'importe finalement la réponse, car c'est bien le seul ressenti des marins et de leur famille qui constitue le juge de paix du niveau acceptable des contraintes à partir duquel il convient de fonder la réflexion RH.

Des marins plus difficiles à fidéliser

Les difficultés de recrutement, mais surtout de fidélisation, peuvent préfigurer une potentielle fracture RH. La baisse significative de l'attractivité de l'embarquement constitue à cet égard un avertissement préoccupant. Dorénavant, le phénomène est en effet durable et tend à se généraliser. Il doit alerter notamment quand d'autres signaux se font jour. Ainsi, la volonté de progresser, pourtant au cœur de la dynamique RH de la Marine, semble s'essouffler au point d'observer un taux de sélection parfois faible dans des filières particulièrement techniques.

Le poids des sujétions apparaît comme le facteur déterminant de cette moindre attractivité. Il suffira d'évoquer l'absence du domicile de 50 % des marins des forces en déploiement hors du port-base plus de 125 jours par an. Cette sujétion est assurément moins bien acceptée qu'auparavant. La volatilité des programmes d'activité des unités est difficilement vécue, alors que dans le même temps la durée du travail, en moyenne 54 heures hebdomadaires², contribue évidemment à l'usure du personnel.

La mobilité géographique demeure une des contraintes majeures intrinsèques au statut militaire. Si cette contrainte est en baisse significative grâce à une politique volontariste de l'institution depuis plusieurs années, elle reste néanmoins importante compte tenu de la forte mobilité fonctionnelle d'une Marine resserrée qui se distingue par sa haute

1. Zone économique exclusive.

2. Durée moyenne prenant en compte l'activité professionnelle dont les gardes/permanences et les périodes à la mer où le marin est à bord 24h/24 et 7j/7.

technicité. Elle a un fort impact sur l'emploi du conjoint, l'accès au logement familial et se traduit par un taux de célibat géographique élevé, autant de facteurs qui pèsent lourdement sur la fidélisation.

De façon générale, la conciliation des vies professionnelle et personnelle (V2P) est aujourd'hui plus difficile à garantir dans la mesure où les aspirations du marin et de sa famille ont changé. Il est plus sensible aux contraintes de la vie militaire. Il se compare davantage au monde professionnel civil. Le jeune marin doit concilier son travail avec celui de son conjoint. Dans le même temps, il aspire à s'investir de façon plus régulière dans sa vie familiale et sa vie sociale. Cette « dimension personnelle » doit être mieux appréhendée et prise en compte par l'institution.

Le déséquilibre ressenti entre sujétions (durée des absences, imprévisibilité des programmes, charge de travail, moyens jugés insuffisants, surcharge administrative) et compensations (rémunération, reconnaissance, parcours professionnels, conciliation vie professionnelle et vie privée) entraîne un affaiblissement de l'attractivité. Alors que la vie de marin creuse l'écart avec la société, ou du moins est ressentie comme tel, un nouvel équilibre sujétions/compensations doit être recherché et ce d'autant plus que la jeunesse issue des générations Y et Z y est encore davantage sensible.

Le vivier des *millennials*, « génération sans pareille³ »

Centré sur lui-même, hyperconnecté, indéterminé et inconstant ? Le héraut des générations associées à une lettre des profondeurs de l'alphabet n'a pas bonne presse. Si elle ne doit pas être caricaturée, il faut pourtant s'essayer à caractériser cette génération qui constitue déjà la base de nos marins les plus jeunes et le vivier de la Marine de demain. Cet examen est indispensable pour la comprendre et, *in fine*, l'attirer et la fidéliser. Surtout la fidéliser.

Cette génération semble d'abord se caractériser par sa dualité et ses aspirations à première vue contradictoires : ouverte au monde mais recentrée autour de son unité familiale et enfermée dans les réseaux sociaux et le monde virtuel, à la recherche de stabilité mais disposée à expérimenter plusieurs vies professionnelles, « zappeuse », volatile et consommatrice de l'éphémère, mais en quête de missions qui portent du sens. Des aspirations irréconciliables comme peuvent être amenés à le penser les plus sceptiques sur les motivations de cette classe d'âge ? À moins que cette ambivalence

3. Une terminologie que nous empruntons au livre de Jean-François Sirinelli, éditions Tallandier, 2016.

ne soit tout simplement le signe d'une stricte exigence de la part d'une nouvelle génération qui se place dans une démarche contractuelle : elle est prête à donner abondamment mais réclame beaucoup en retour, avec un niveau de compensations qui soit à la hauteur de celui des contraintes.

Au cœur de ce contrat, la préservation de la vie privée apparaît comme essentielle et non négociable. Elle fait partie intégrante de l'équation RH. L'arbitrage entre développement personnel, familial et professionnel est devenu une règle que le gestionnaire ne peut occulter. « On épouse la Marine quand on entre dans l'institution » : la boutade ne prête plus guère à sourire. Le marin épouse définitivement... son conjoint. Il souhaite à présent pleinement participer à l'éducation de ses enfants, la famille fait « partie du sac ». La problématique de l'emploi du conjoint, généralisée aujourd'hui, est également centrale. Il limite de fait la mobilité et le rythme de travail du marin qui participe à part entière aux aspects logistiques liés au quotidien des enfants.

Le marin a tendance, plus que par le passé, à développer des projets personnels indépendamment de ses objectifs de carrière. Ces constats convergent tous vers la nécessité de mieux concilier vies professionnelle et privée pour permettre au marin de s'épanouir aussi en dehors de son travail.

Vers une gestion individualisée, souple et prévisible et... davantage de moyens humains

À grands traits, esquissons les principales pistes qu'emprunte et doit encore approfondir la Marine pour prendre en compte cette nouvelle donne. L'institution doit en effet adapter son modèle de façon continue pour maintenir un système RH stable et durable face aux signes de fragilité, au défi lancé par une jeunesse aux nouvelles aspirations. À côté des leviers traditionnels (mesures de condition du personnel renforcées et mieux ciblées, dispositif de rémunération rénové, promotion de la place des armées au sein de la Nation et des valeurs qu'elles incarnent) qu'il est temps de rendre plus souples en donnant davantage de liberté au gestionnaire, on doit tendre vers une gestion plus particularisée. Chaque marin doit être considéré dans son individualité pleine et entière, comme un cas unique : les parcours doivent être, dans la mesure du possible, personnalisés, adaptés, modulés et diversifiés en fonction de chacun. Il faut par ailleurs s'astreindre à donner plus de visibilité sur le court terme en rendant l'activité plus prévisible. Étendre le concept du double équipage pour cycler l'activité constituerait à cet égard un axe d'amélioration fructueux. Plus

de visibilité sur le long terme est une autre nécessité, avec l'idée sous-jacente de baliser davantage les parcours en les adaptant, dans la mesure du possible évidemment, aux contraintes et aspirations de chaque marin. De façon générale, il convient de réfléchir à des outils innovants pour faciliter la conciliation de la V2P : prévoir du temps partiel, ouvrir des temps de pause dans les carrières pour permettre la réalisation de projets (familiaux, personnels...), développer le télétravail, accompagner les conjoints sont, à titre d'exemple, des pistes de réflexion à approfondir tout en évitant l'écueil de la banalisation de l'état militaire.

Parallèlement à la mise en œuvre d'une gestion plus individualisée, l'amélioration des conditions de travail constitue une autre ambition que doivent porter les décideurs. Outre des moyens budgétaires complémentaires au profit du maintien en condition opérationnelle (MCO), du soutien au sens large et des conditions de vie quotidienne en unités, le besoin de recapitaliser en potentiel humain apparaît à cet effet indispensable. Les déflations d'effectifs des dernières années ont sans doute été excessives ; une recapitalisation en effectifs supplémentaires est vivement souhaitable.

Agiter le spectre d'une rupture RH serait aujourd'hui exagéré : la Marine est un très bel outil en ce qu'elle remplit avec succès ses missions grâce à des marins compétents, professionnels, motivés et fiers de servir leur pays. Ces qualificatifs attestent tous de l'attractivité réelle de la Marine et de sa capacité de fidélisation. Mais une certaine tendance, qu'il serait dangereux d'occulter, se dessine. Car si les marines sont mortelles, elles le sont par leurs RH. Composer avec la nouvelle donne de la génération 2020 doit constituer un *leitmotiv* de la politique du personnel pour que le marin – et sa famille – trouvent leur compte au sein de l'institution et ne deviennent pas son talon d'Achille.

LES RESSOURCES





Le parc éolien Belwind situé en mer du Nord.
© Hans Hillewaert.

L'éolien en mer

Vincent GUÉNARD

Ingénieur « éolien en mer »

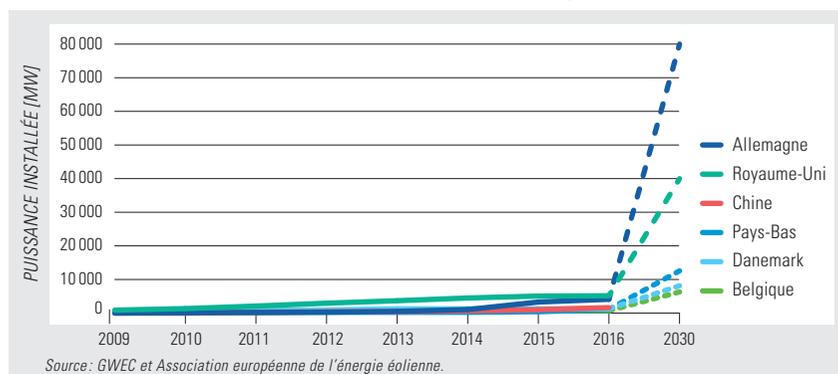
Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME)

Les émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) couvertes par le protocole de Kyoto ont atteint près de 49 milliards de tonnes équivalent CO₂ en 2010 selon les dernières données du GIEC¹. Elles ont augmenté de 80 % entre 1970 et 2010, principalement en raison du doublement de la consommation d'énergie dans le monde dont la grande majorité est liée à la combustion d'énergies fossiles.

L'Union européenne a pris conscience de l'impact de la production énergétique sur les émissions de GES dès 2008 en adoptant le plan climat-énergie qui consiste à diminuer de 20 % les émissions de GES, à réduire de 20 % la consommation d'énergie et à atteindre 20 % d'énergies renouvelables (EnR) dans le bouquet énergétique d'ici à 2020².

Dans le cadre de cette directive, la France s'est engagée à porter la part des énergies renouvelables de sa consommation énergétique finale d'à peine 10 % en 2005 à 23 % en 2020, objectif qui se déclinait en 27 % d'EnR électriques. La France s'est par ailleurs fixé des objectifs ambitieux de développement des EnR à 2030 dans le cadre de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte qui prévoit une part de 32 % d'EnR dans la consommation d'énergie finale en 2030, dont 40 % pour la part d'EnR dans la production.

État du marché mondial de l'éolien en mer et scénario moyen à l'horizon 2030



L'éolien en mer revêt dans cette perspective une importance nouvelle. Il connaît en effet un fort développement en Europe et en Chine avec un taux de croissance annuel sur la période 2010-2015 de plus de 30 %. Ce taux est de 20 % sur l'année 2016 avec

1. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
2. Directive n°2009/28/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009.

2,2 GW supplémentaires installés, dont un quart vient de Pékin. Dans ce contexte, le Royaume-Uni reste le *leader* mondial avec plus de 5 GW installés (soit 36 % du parc total mondial), suivi par l'Allemagne (4,1 GW, 28 % du parc total) et la Chine (1,6 GW, 11 % du parc total).

L'éolien en mer en France

Avec plusieurs milliers de kilomètres de côtes répartis sur quatre façades maritimes en métropole - mer du Nord, Manche, Atlantique et Méditerranée – et en Outre-mer, la France bénéficie d'un potentiel de développement des énergies marines renouvelables parmi les plus importants d'Europe. Par ailleurs, notre expertise en matière énergétique et maritime est reconnue dans le monde entier et nous disposons de zones portuaires particulièrement adaptées à la construction d'infrastructures dédiées à cette activité.

Pour répondre aux objectifs fixés dans le cadre communautaire et valoriser les ressources énergétiques en énergies marines comme ses savoir-faire industriels et scientifiques, la France s'était fixé l'objectif ambitieux de porter la capacité installée de l'éolien en mer à 6000 MW en 2020. Cet objectif a donné lieu au lancement de deux appels d'offres; le premier a désigné quatre projets lauréats en 2012: Saint-Nazaire (EDF-EN, 480 MW), Saint-Brieuc (IBERDROLA, 496 MW), Courseulles-sur-Mer (EDF-EN, 450 MW) et Fécamp (EDF-EN, 498 MW). Le deuxième a abouti à deux lauréats en 2014: les îles d'Yeu et de Noirmoutier (ENGIE/EDR, 496 MW) et Dieppe-Le Tréport (ENGIE/EDPR, 496 MW).

Le ministère de l'Environnement, de l'énergie et de la mer a souhaité poursuivre le développement de l'éolien en mer en lançant en 2016 une troisième procédure de mise en concurrence concernant deux zones au large de Dunkerque et de l'île d'Oléron. Ces appels d'offres vont contribuer à atteindre les objectifs fixés par la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) de porter la capacité installée de l'éolien en mer à 3000 MW en 2023.

Dans l'étude de l'ADEME publiée en 2015 « Vers un mix électrique 100 % renouvelable en 2050 », une estimation des gisements permet de mettre en évidence que l'éolien flottant (destiné à des profondeurs supérieures à 50 m) est beaucoup plus prometteur que l'éolien en mer posé. Le gisement exploitable est de 46 GW pour l'éolien flottant et de 20 GW pour l'éolien posé, soit respectivement 195,5 TWh/an et 80,3 TWh/an productibles. L'éloignement des côtes à des distances supérieures à 15 km fait baisser la pression des contraintes sur les autres activités (notamment la pêche professionnelle)

ce qui rend les projets potentiellement plus acceptables. L'intérêt du flottant réside aussi dans l'installation des éoliennes puisque la plupart des solutions de flotteur permettent un montage de la turbine à quai et une installation en une seule phase limitant les travaux et opérations en mer. L'éolien flottant est aussi moins dépendant des conditions de sol, conditions qui sont assez hétérogènes au large des côtes françaises et nécessitent des études spécifiques pouvant remettre en cause certaines options technologiques.

Analyse coûts / avantages de l'éolien en mer

Impacts énergétiques

Les bénéfices énergétiques de l'éolien en mer sont très importants puisque ce mode de production est déployé à grande échelle dans des zones à fortes ressources éoliennes. La part de la production électrique espérée des six projets lauréats des deux premiers appels d'offres se situera ainsi entre 6 et 9 % de la consommation régionale, ce qui permet de confirmer que l'éolien en mer peut contribuer significativement à l'indépendance énergétique du pays. Au niveau national, l'ensemble de ces six parcs peut subvenir à 2,5 % de la consommation d'électricité.

Part de production des projets

Région	Parc éolien	Puissance [MW]	Productible [TWh/an]	Consommation d'électricité (2006-2015) [TWh/an]	Part de l'éolien dans cette consommation [%]
Normandie	Fécamp	498	1,8	26,3	6,8
	Courseulles-sur-Mer	450	1,5		5,7
	Dieppe – Le Tréport	496	2,0		7,6
Pays de la Loire	Saint-Nazaire	480	1,7	24,1	7,0
	Les 2 Îles	496	1,9		7,9
Bretagne	Saint-Brieuc	496	1,9	20,3	9,4
France		2 916	10,8	439,4	2,5

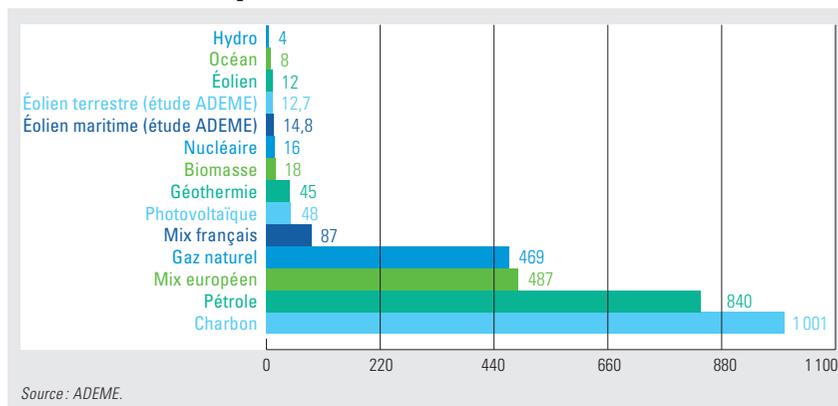
Source : ADEME.

Impacts environnementaux

Les études d'analyse du cycle de vie (ACV) de l'éolien en mer français conduites par l'ADEME en 2016 montrent que la moyenne des émissions des six parcs lauréats a été estimée à 14,8 g eqCO₂/kWh ce qui place cette filière parmi les plus prometteuses pour réduire les émissions de GES des moyens de production d'électricité et lutter contre le changement climatique.

La phase de construction d'un parc éolien en mer peut certes avoir des impacts potentiellement négatifs sur l'environnement, notamment sur les mammifères (cétacés, phoques) et les poissons. Mais grâce aux mesures d'atténuation mises en place suite aux études d'impacts, ceux-ci sont restés très limités lors de la construction des parcs au Danemark ou au Royaume-Uni. La composante littorale des travaux est également conçue pour minimiser les impacts.

Taux d'émissions de CO₂ par kWh



En fonctionnement, les éoliennes peuvent avoir un impact sur les mammifères marins et les poissons à cause des vibrations générées, des émissions électromagnétiques dans les câbles d'export d'électricité ainsi qu'un impact sur l'avifaune du fait des risques de collisions et du phénomène d'évitement des parcs. Les études de suivi des parcs en mer existants, effectuées sur plusieurs années, ont conclu que ces effets ont été négligeables jusqu'à présent.

En outre, un effet de type « récif artificiel » associé aux fondations des éoliennes a été très nettement observé au sein des parcs déjà construits, et ce, après un an seulement. Selon ces observations, l'implantation de parcs éoliens en mer semble favoriser l'augmentation locale de biomasse et de biodiversité marines, ce qui pourrait avoir un effet positif sur les communautés de poissons.

Impacts sur l'emploi

Comme tout nouveau secteur d'activité arrivant sur des territoires disposant de leur propre équilibre économique et social, l'éolien en mer est susceptible de perturber les

activités économiques existantes, ce qui est de nature à soulever des conflits. Ceux-ci se révèlent lors des différentes instances de concertation mises en place tout au long du développement des projets (planification maritime et identification des zones propices, débat public, enquête publique de l'octroi des autorisations administratives pour le parc éolien et son raccordement).

Les principales sources d'opposition viennent des populations résidentes préoccupées par la modification des paysages et ses conséquences sur l'activité touristique des territoires concernés. Sur ces derniers points, des études menées en mer du Nord pourraient tempérer les inquiétudes. Elles montrent en effet tout le potentiel touristique non-exploité à travers notamment le succès de « balades en mer » autour de ces champs.

Le plus grand impact identifié en France concerne la pêche professionnelle, car le parc éolien prive les pêcheurs d'une partie de leur espace de travail, même si l'effet de récif artificiel mentionné plus haut peut nuancer cet aspect dans un contexte de changement climatique et de raréfaction de la ressource halieutique. De plus, les parcs éoliens sont susceptibles de priver la pêche professionnelle de leurs ressources humaines et logistiques car ils ont eux aussi besoin de personnel qualifié et expérimenté, notamment dans leur phase d'exploitation. Pour accompagner l'arrivée de cette nouvelle activité, une taxe éolienne a été mise en place d'un montant d'environ 15 000 €/MW dont 35 % reviendront au Comité national des pêches, 50 % aux communes situées à moins de 12 milles nautiques du parc et 15 % aux projets de développement durable.

L'essor de cette nouvelle filière apparaît comme une formidable opportunité de développement industriel, tant pour le marché français que pour l'exportation, ce qui permet d'envisager une traduction rapide en matière de croissance et d'emplois. On estime à 8 000 le nombre d'emplois directs en France pour la réalisation des six parcs lauréats des deux premiers appels d'offres.

Nombre d'emplois directs et indirects par parc éolien

Région	Parc éolien	Nombre d'emplois directs (indirects)
Normandie	Fécamp	1 000 (4 000)
	Courseulles-sur-Mer	1 000 (4 000)
	Dieppe – Le Tréport	1 500 (4 500)
Pays de la Loire	Saint-Nazaire	1 000 (4 000)
	Les 2 Îles	1 500 (4 500)
Bretagne	Saint-Brieuc	2 000

Source : EDF-EN et ENGIE.

Impacts économiques

En France, les investissements générés, qui s'élèveront à environ 2 à 2,5 milliards d'euros par parc, permettront également de dynamiser l'implantation industrielle sur le territoire, à l'exemple des usines de *General Electric* (ex-ALSTOM) à Saint-Nazaire et à Cherbourg qui construisent des composants d'éoliennes *offshore*, ou des usines d'ADWEN (ex-AREVA) au Havre. Des investissements portuaires pour l'accueil, l'assemblage et la maintenance des éoliennes sont également à prévoir à Brest, Dunkerque ou Port-la-Nouvelle.

Coûts de production actuels et prospectifs

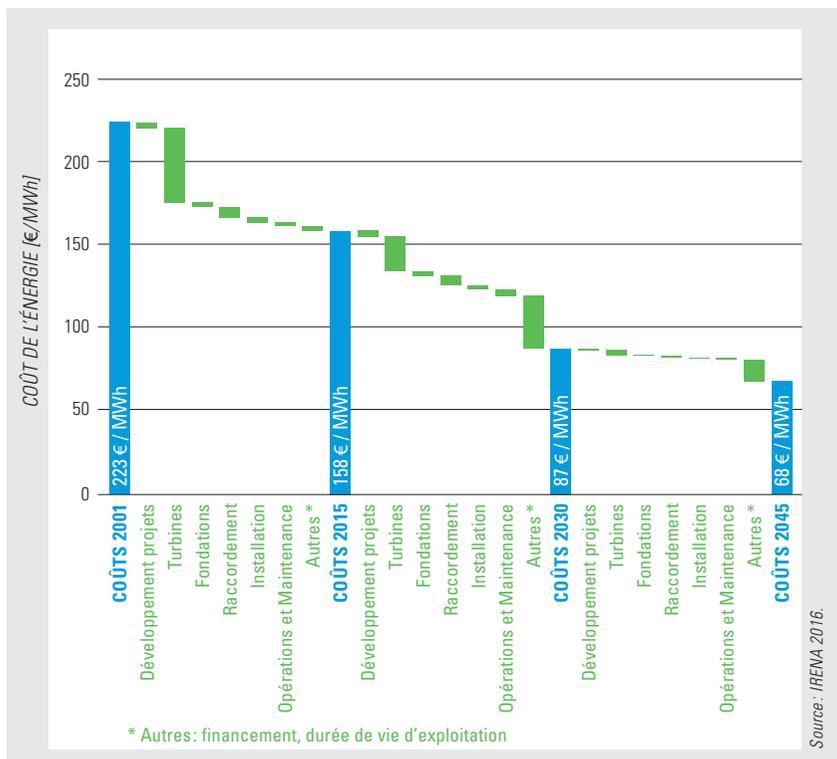
L'ADEME a publié en 2017 une analyse des coûts de production des différentes filières EnR dont l'éolien en mer. L'analyse est basée sur des projets éoliens posés mis en service en Europe au cours de la période 2014-2015, des projets en cours de construction et des projets financés qui seront réalisés à partir de 2019. Les coûts de production sont sensibles aux coûts d'investissement (CAPEX), aux coûts d'exploitation (OPEX), à la performance des parcs éoliens (facteur de charge) et au taux d'actualisation (coût moyen pondéré du capital). En faisant jouer ces deux derniers paramètres, la fourchette des coûts de production se situe entre 130 et 190 €/MWh en Europe. Ces chiffres sont en ligne avec des travaux conduits au Royaume-Uni qui montrent par ailleurs une diminution de 30 % des coûts entre 2010 et 2015 (OFWB 2017).

On en voit l'effet à travers les lauréats (Dong et EnBW) du dernier appel d'offre allemand de mars 2017 qui annoncent ne pas avoir besoin d'un tarif d'achat : l'électricité produite par les trois parcs sera vendue directement sur le marché de gros de l'électricité, soit à des prix inférieurs à 44 €/MWh (hors raccordement). Un quatrième projet a été attribué à Dong au tarif de 60 €/MWh (hors raccordement). Le dérisquage des projets, la mise en place d'un industriel qui sera pleinement mature lors de la construction des quatre projets, la montée en puissance des machines de 10 à 15 MW attendue pour 2025 permettant de réduire leur nombre et donc le nombre d'opérations marines, de bonnes conditions de vent (vitesse moyenne supérieure à 10 m/s) et une durée des autorisations étendue à 30 ans suffisent à expliquer cette réduction potentielle des coûts.

Une analyse de l'Agence internationale des énergies renouvelables (IRENA) a identifié les perspectives de réduction des coûts de l'éolien en mer d'une situation de référence en 2001 jusqu'à l'horizon 2045 sur tous les éléments constituant la chaîne de valeur de l'éolien. Cette étude montre que les réductions de coûts sur les

turbines (augmentation des performances, augmentation de la taille et la puissance des machines, industrialisation) sont le moteur de la baisse des coûts globaux. La maturité de la filière fait diminuer les coûts de financement à partir de l'année 2015. Ainsi, l'étude montre une diminution des coûts de 30 % de 2001 à 2015 (158 €/MWh), 45 % de 2015 à 2030 (87 €/MWh) et 22 % de 2030 à 2045 (68 €/MWh).

Perspective de réduction des coûts de l'éolien en mer



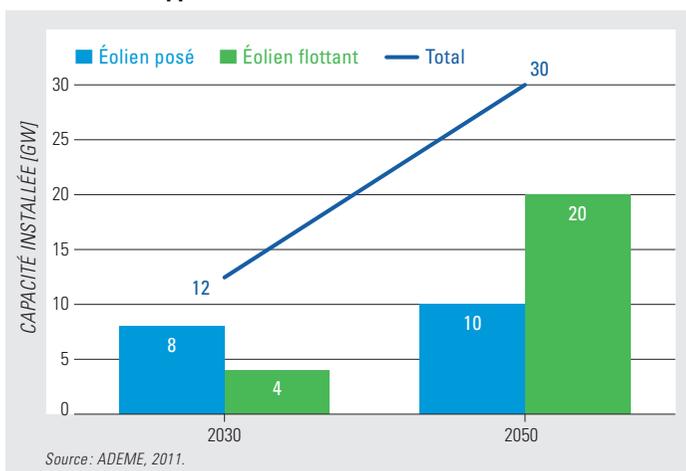
Prospective de développement de l'éolien en mer en 2030

L'Association européenne de l'énergie éolienne Wind-Europe a réalisé un travail prospectif sur l'année 2015 qui montre que les perspectives de marché sont très importantes au Royaume-Uni (23 GW), en Allemagne (17,5 GW) et en France (9 GW).

À des horizons plus lointains que 2025, il est probable que l'éolien en mer posé doive faire face à des conflits d'usage majeurs (notamment en France) du fait de zones propices limitées qui donnent l'opportunité de développer l'éolien flottant.

Aux horizons 2030 et 2050, les travaux prospectifs réalisés par l'ADEME en 2012 ont abouti à des valeurs un peu plus élevées avec 12 GW en 2030 et 30 GW en 2050 se répartissant selon le tableau suivant :

Vision du développement de l'éolien en mer en 2030 et 2050



Conclusion

L'éolien en mer est en fort développement en Europe. Même si les coûts de production sont encore élevés, ils sont en nette diminution grâce notamment au retour d'expérience positif de cette industrie en mer du Nord qui a permis de nouer des partenariats de confiance avec ses investisseurs privés et bancaires. Ce secteur est en constante évolution avec la montée en puissance des machines (de 3 MW en 2010 à 6 MW en 2015 et bientôt 8 MW en 2018 puis de 10 à 20 MW avant 2030) qui a aussi contribué à la réduction des coûts. Cette réduction doit encore s'accroître par des travaux de recherche et développement sur les briques technologiques (turbines, fondations posées et flottantes, méthodes d'installation, méthodes d'industrialisation...) et d'acquisition de connaissances nouvelles sur les aspects non technologiques (impacts environnementaux, impacts sociétaux, etc.)

pour que cette filière prenne son essor partout dans le monde où les conditions sont propices. Ce moyen de production d'électricité contribue à l'indépendance énergétique, à la diminution des émissions de GES et à une lutte efficace contre le changement climatique. L'éolien en mer donne aussi l'opportunité de créer de l'activité dans des territoires qui ont beaucoup souffert de la désindustrialisation. Le développement de cette activité réconcilie environnement, économie et emplois, piliers du développement durable.

Ressources minérales marines : de nécessaires innovations et ruptures technologiques

Alexandre LUCZKIEWICZ

Responsable des relations et des actions Outre-mer

Pilote du groupe synergie « Grand fonds marins »

Cluster maritime français

« Il existe au fond des mers des mines de zinc, de fer, d'argent, d'or, dont l'exploitation serait très certainement praticable. »

JULES VÉRNE – *Vingt mille lieues sous les mers*, 1869.

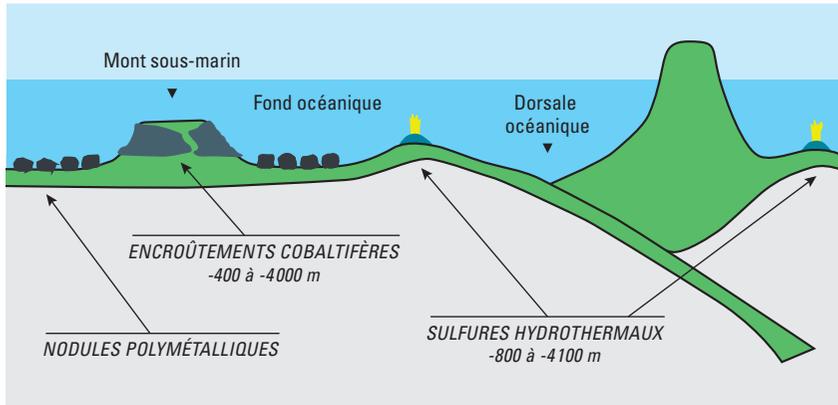
Sil est des richesses qui ont fait couler beaucoup d'encre, ce sont bien les ressources minérales marines. Elles sont de trois types : tout d'abord les nodules polymétalliques, que l'on trouve majoritairement dans le Pacifique, posés sur le fond océanique sous forme de champs de concrétions riches en nickel, manganèse ou cobalt de la forme et de la taille d'une boule de billard. Les encroûtements cobaltifères ensuite, concentrations de dépôts de minerais en épais croûtes que l'on trouve par des profondeurs variant entre 400 et 4 000 mètres, en surface des monts sous-marins isolés et des alignements volcaniques, particulièrement dans les régions Ouest Pacifique. Enfin, les sulfures hydrothermaux, minéralisations sulfurées qui se sont formées au fur et à mesure des dépôts rejetés par les cheminées actives des dorsales océaniques à des profondeurs comprises entre 800 m et 4 100 m.

L'intérêt pour ces ressources s'est manifesté par étapes : les premières découvertes de ressources minérales marines au fond des mers remontent à la fin du XIX^e siècle, avec les expéditions scientifiques du H.M.S. *Challenger* menées par l'Écossais Sir Charles Wyville Thomson. Il faut cependant attendre la fin des années 1950 et le début des années 1960 pour que le milieu scientifique et l'industrie commencent à s'y intéresser. L'américain John Mero joue un rôle important en parvenant à convaincre de l'intérêt économique¹ des nodules polymétalliques, première ressource identifiée comme exploitable à l'époque, puisqu'il ne fallait que les « ramasser » (avec une estimation de l'ordre de 500 milliards de tonnes de nodules au fond des mers pour Alan A. Archer en 1981).

Les premières sociétés intéressées sont *Kennecott* et *Newport Shipbuilding Company* (1962) qui commencent à mener des campagnes d'échantillonnage, alors que les universitaires américains Fuerstenau et Arrhenius travaillent sur la géochimie de ces concrétions et sur leur traitement métallurgique. Comme l'exploration et l'exploitation des nodules polymétalliques demandent des budgets importants, les sociétés minières se constituent en consortium internationaux dans les années 1970 avec l'*International Nickel Corporation* (INCO), l'*Ocean Management Inc.* (OMI), l'*Ocean Minerals Company* (OMCO) et pour la France, l'Association française pour l'étude et la recherche des nodules océaniques (AFERNOD).

1. John L. Mero, *The Mineral Resources of The Sea*, Elsevier Pub. Co., 1965.

Lieux de formation des différents types de ressources minérales marines



En parallèle, les instituts de recherche mènent de grandes campagnes océaniques, à l'image du CNEOX (Centre national pour l'exploitation des océans), ancêtre de l'Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer), qui explore les fonds marins dans le Pacifique Sud, puis Nord.

Il apparaît, au-delà de ce court rappel historique, que l'on assiste depuis plus d'un siècle à une « course aux abysses », à la fois course de relais et course olympique. Olympique, car c'est une course de très haut niveau, de dimension internationale, et de relais car la progression se fait nécessairement par étapes successives.

Considérons pour les années en cours et à venir trois caps, trois ruptures incontournables :

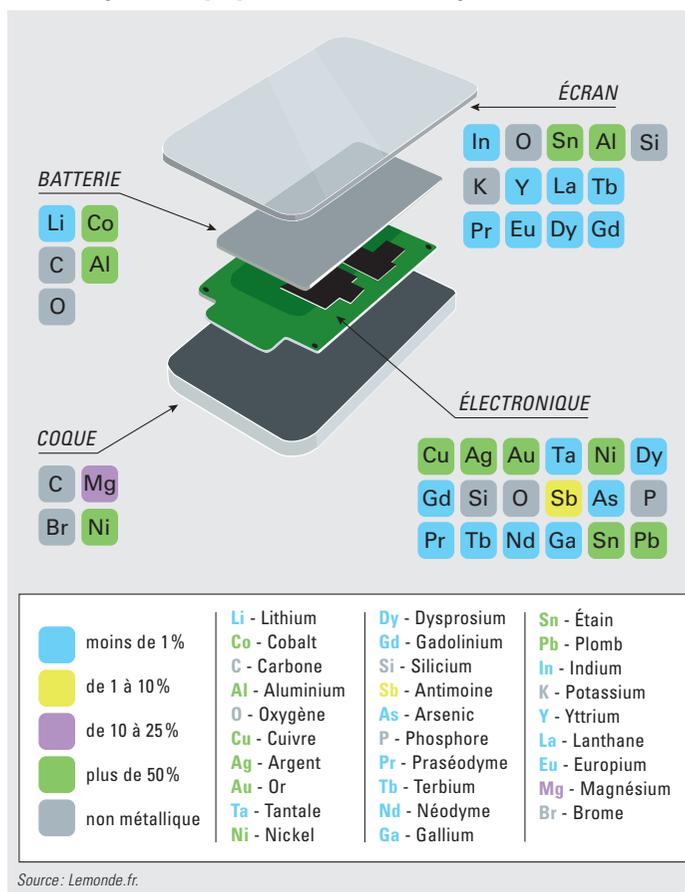
- un cap technologique, car les ressources potentiellement exploitables se trouvent à de très grandes profondeurs et dans un milieu naturel, par essence, hostile à l'homme ;
- un cap environnemental qui couvre à la fois le champ de la connaissance scientifique et la protection du milieu marin ;
- un cap « politique », avec des enjeux de gouvernance.

L'objectif final correspond à un défi majeur : répondre au besoin croissant en matières premières induit par les croissances économique et démographique mondiales, s'inscrivant naturellement dans une logique de diversification des sources d'approvisionnement et, à terme, dans un contexte d'épuisement des ressources à terre.

L'opportunité d'exploiter ces ressources minérales marines ne peut être ignorée : les sulfures hydrothermaux contiennent des concentrations de minerais avec des indices

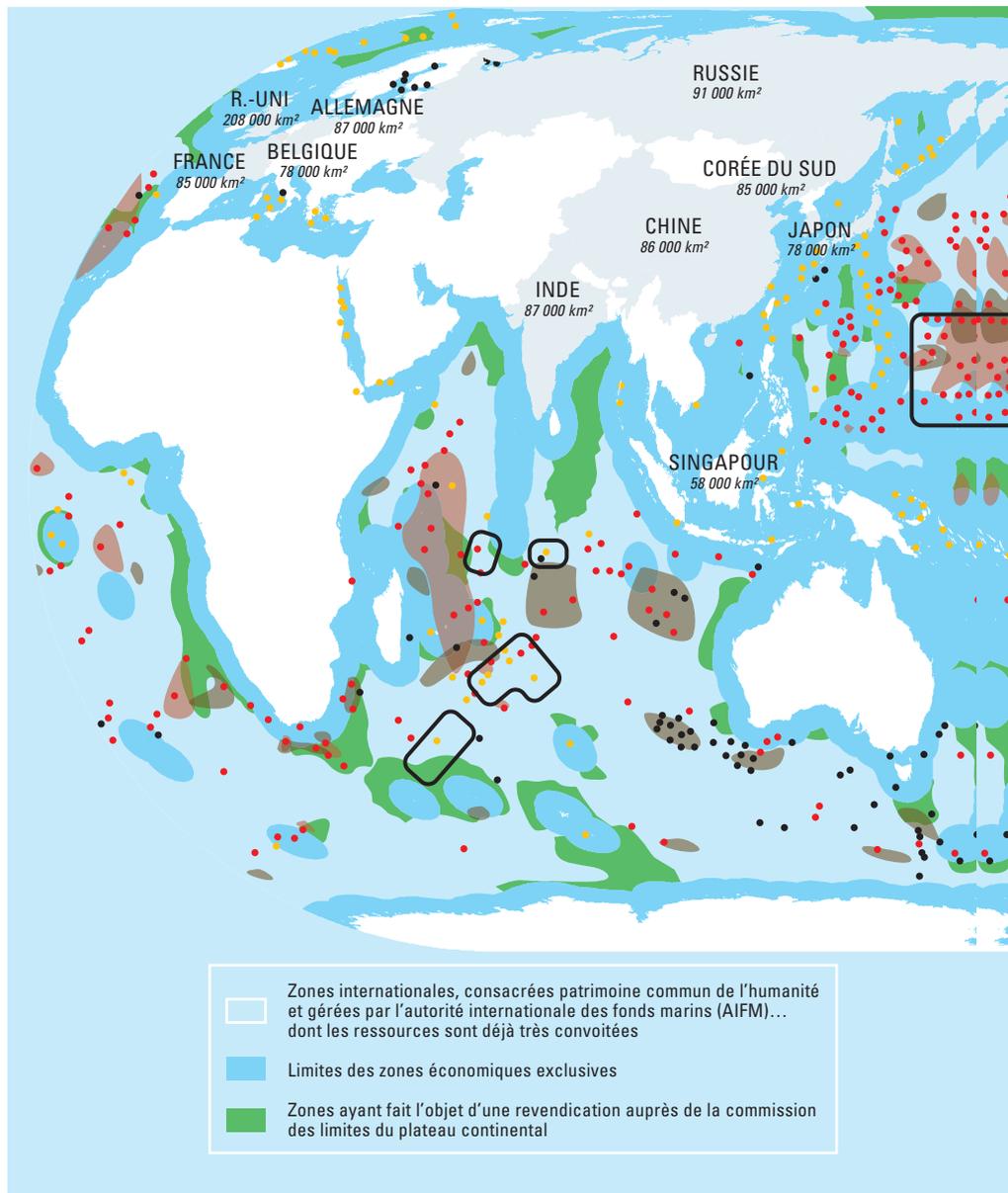
que l'on estime bien plus élevés qu'à terre², tant sur des métaux dits « de base » (zinc, cuivre, cobalt, manganèse, baryum, or, argent) que sur des métaux dits « critiques », c'est-à-dire avec un potentiel technologique élevé (indium, germanium, cadmium, antimoine, mercure, sélénium, molybdène, bismuth). Nos *smartphones*, tablettes électroniques, ordinateurs, éoliennes ou panneaux photovoltaïques par exemple étant construits sur la base de composants eux-mêmes fabriqués à partir des plus rares de ces métaux.

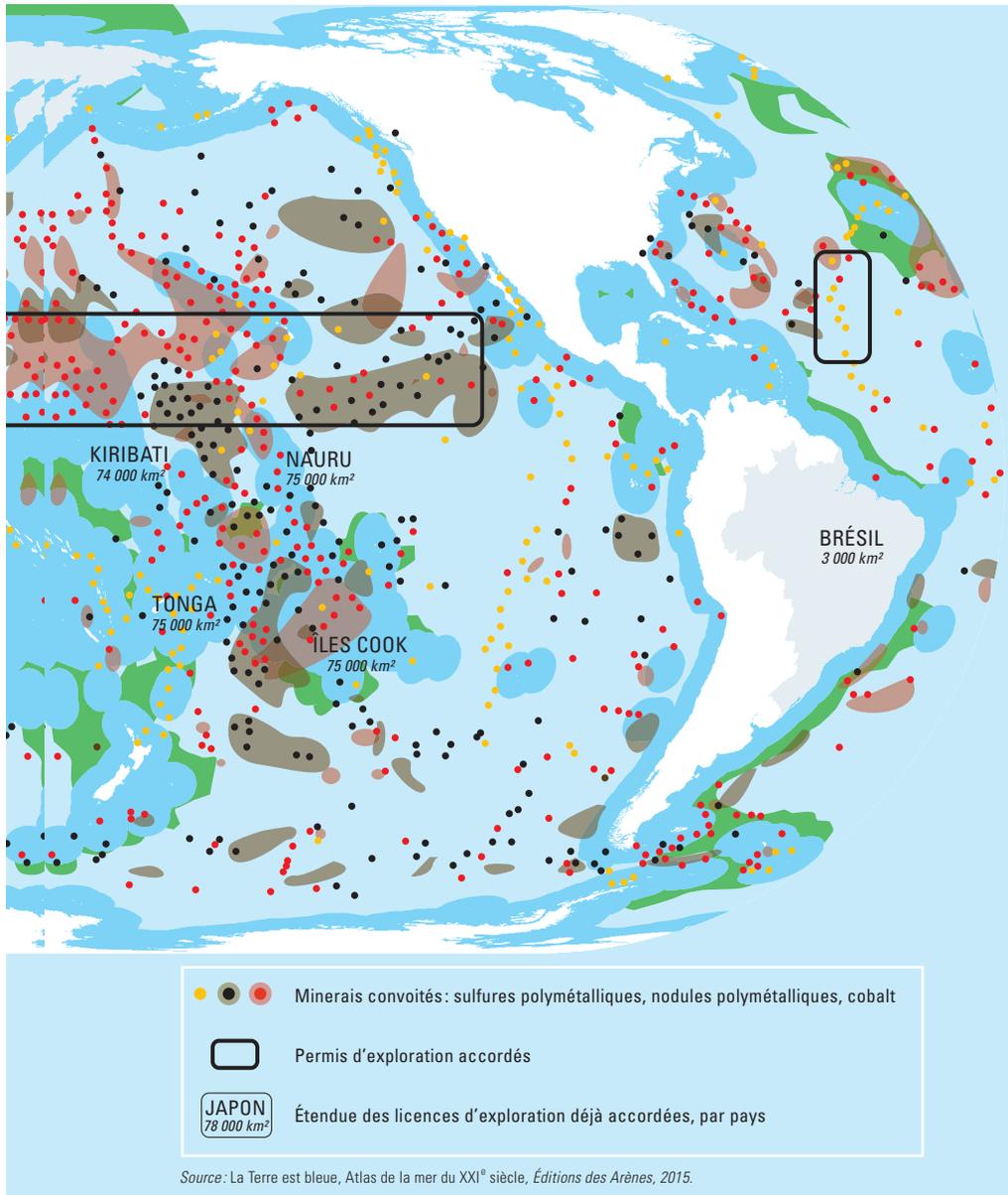
Nos smartphones regorgent de minerais rares présents en mer



2. « Les ressources minérales marines profondes », synthèse d'une étude prospective à l'horizon 2030, Ifremer, 2011.

Répartition des ressources minérales marines





Source : La Terre est bleue, Atlas de la mer du XXI^e siècle, Éditions des Arènes, 2015.

Si la France est engagée depuis les années 1970 dans cette course, elle n'est pas la seule : d'autres grandes puissances comme la Corée, le Japon, la Russie, l'Allemagne, la Chine et le Royaume-Uni ont bâti de véritables stratégies nationales en ce domaine.

Quelles technologies innovantes pour découvrir le fond de nos océans ?

Pour exploiter ces ressources, nous devons tout d'abord passer un obstacle technologique. Nous savons en effet que ces richesses se trouvent par de très grandes profondeurs, avec une très forte pression hydrostatique, dans un milieu naturel encore largement inconnu.

Il est donc nécessaire de développer des technologies qui aujourd'hui n'existent pas, sont à l'étude, ou encore requièrent de véritables modifications ou adaptations pour répondre aux besoins de l'exploration/exploitation minière sous-marine.

En fait, c'est tout un ensemble de technologies marines complexes, associant des moyens hauturiers et des moyens sous-marins, dont nous avons besoin.

En phase amont, c'est-à-dire d'exploration, il faut des technologies de reconnaissance et de cartographie du milieu, d'identification et de quantification des gisements sous-marins, de *monitoring* de l'environnement où se trouvent ces minéralisations et de quoi effectuer des prélèvements d'indices de minerai.

En phase d'exploitation, il faut des liaisons fonds-surface, des engins miniers autonomes, de l'alimentation énergétique et des moyens de communication.

En phase aval, on peut imaginer des navires équipés pour traiter le minerai à bord pendant qu'il est transporté à terre.

Les innovations et avancées technologiques du secteur de l'*oil & gas offshore* peuvent bénéficier à la future filière d'exploration et d'exploitation des ressources minérales marines, mais demandent à être encore améliorées et surtout adaptées. Par exemple, les conduites flexibles ne sont pas compatibles avec les matériaux durs et abrasifs qui seront extraits des fonds des mers et il en est ainsi de bien d'autres applications.

Par ailleurs, il n'est pas envisageable d'envoyer des hommes sur des gisements reposant par 2000 mètres de fond, ce sont donc des machines excavatrices autonomes qui feront le travail. Et pour faire fonctionner ces outils de très haute technicité, il sera nécessaire de les alimenter en énergie et en communication par le biais d'ombilics de puissance.

Concernant les navires hauturiers chargés de faire opérer sur les champs sous-marins les outils pré-cités, les *supplies* ou câbliers pourraient tout à fait être affrétés après adaptations. Cependant, on peut noter qu'un nouveau type de navire est en train de voir le jour (si tout va bien, sortie des chantiers chinois fin 2017!), tel le *Mining Supply Vessel* ou *Production Support Vessel*, premier du nom, commandé par la société *Nautilus Minerals*.

Ces projets innovants sont très consommateurs de crédits pour cause de R&D. C'est pour répondre à ce défi stratégique, dans une logique de développement d'entreprises porteuses d'innovations majeures et de ruptures et dans la lignée du rapport de la Commission innovation 2030³ (présidée par Anne Lauvergeon), qu'un Concours mondial de l'innovation a été lancé en France en avril 2013, couvrant huit thèmes, dont « la valorisation des richesses marines ».

Ce concours a comporté, et comporte, trois phases – amorçage, levée des risques, développement – et vise à « *financer des projets innovants portés par des entreprises et à créer les "champions" français de demain, créateurs de valeur, d'exportations et d'emplois.* »⁴

À l'heure où ces lignes sont écrites, un premier concours a atteint la phase 3 et a permis de commencer à financer de nombreux projets innovants. Un deuxième *round*, lancé en 2016, se trouve actuellement en phase 2.

On peut donc avoir un espoir certain quant aux premiers financements des projets permettant de compléter les briques technologiques existantes et d'aboutir prochainement à la mise en place d'un pilote industriel complet pour l'exploration et l'exploitation des ressources minérales marines. Cependant, cela ne pourra se faire que si, et seulement si, du point de vue environnemental, les conditions sont réunies.

Des actions raisonnées et raisonnables pour l'environnement marin ultra-profond

La France peut se targuer de disposer depuis les années 1970 d'un ensemble exceptionnel de connaissances scientifiques des grands fonds marins, tant au niveau de la faune que de la flore, et de posséder une véritable expertise en métallogénie marine, au travers notamment des travaux menés par l'Ifremer.

3. www.elysee.fr/assets/pdf/Rapport-de-la-commission-Innovation-2030.pdf

4. www.entreprises.gouv.fr/innovation-2030/concours-mondial-d-innovation

Et pourtant, on a l'habitude de dire, avec justesse, que l'on connaît mieux la surface de la planète Mars que le fond de nos océans. Reste que si les grandes campagnes océanographiques ont permis de mettre au jour l'existence des ressources minérales marines dans les grandes profondeurs, l'exploration pour identifier des sites comportant des minéralisations concentrées, la quantification des gisements et l'étude des écosystèmes, puis l'exploitation de ces ressources vont amener leur lot de nouvelles connaissances.

Sans se focaliser sur les enjeux scientifiques ou industriels, qui sont aussi des enjeux de ruptures au regard de la faible connaissance que nous avons des fonds marins, il faut bien imaginer que dans les deux phases qui nous intéressent – exploration et exploitation – la dimension de l'environnement sous-marin est primordiale.

Car il faut être lucide : nous devons d'une part approfondir nos connaissances concernant l'écosystème benthique, c'est-à-dire les organismes vivant sur les fonds marins, et d'autre part étudier les conditions de réalisation d'une exploitation des ressources minérales marines. Une étude⁵ menée par l'Ifremer et le CNRS ne rapporte-t-elle pas que les « *activités minières en milieu profond généreraient des impacts de différents niveaux sur l'environnement et sur la biodiversité, dont la destruction locale des habitats et des écosystèmes associés ainsi que la perturbation du milieu (colonne d'eau et fonds) et de la diversité biologique* » ?

De même, un rapport⁶ de l'IRD insiste « *sur la nécessité de développer les connaissances, encore insuffisantes, afin de combler des lacunes scientifiques (impacts sur les écosystèmes susceptibles d'être perturbés par l'exploitation éventuelle des ressources)* ».

Au niveau international, cette préoccupation est prise en compte notamment par le réseau INDEEP⁷, réseau scientifique collaboratif mondial consacré à l'acquisition de données, à la synthèse de connaissances et à la communication de découvertes sur la biologie et l'écologie des grandes profondeurs marines.

En lien avec les ruptures technologiques, considérons donc l'exploration et l'exploitation minières sous-marines comme autant d'opportunités pour découvrir et comprendre les écosystèmes ultra profonds, combler les lacunes dans les connaissances fondamentales et appliquées, mais également pour mettre en place

5. « Les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes ». Expertise scientifique collective, synthèse du rapport CNRS-Ifremer, juin 2014.

6. « Les ressources minérales profondes en Polynésie française ». Expertise collégiale, IRD Éditions, 2016.

7. www.indeep-project.org

des outils techniques (*monitoring* de l'environnement des grandes profondeurs) et réglementaires (procédures innovantes des études d'impact environnemental).

C'est d'ailleurs dans cet esprit que l'Autorité internationale des fonds marins⁸ travaille actuellement à l'édification d'un code réglementaire pour l'exploitation des ressources minérales marines, comportant un volet essentiel en matière de précaution environnementale.

Un nécessaire besoin de gouvernance et de stratégie politique

Créée en 1982 conformément à la Convention des Nations unies sur le droit de la mer, dite de Montego Bay, l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) est une organisation internationale intergouvernementale autonome, dont les missions précisées par l'Accord de 1994 relatif à l'application de la Partie XI⁹ (dispositions « fonds marins » de la Convention) sont d'organiser et de contrôler toutes les activités relatives aux ressources minérales et activités connexes (exploration, transport) dans la zone internationale des fonds marins hors des limites de la juridiction nationale.

L'AIFM est composée de 168 États-membres, fonctionne avec deux organes principaux qui établissent les politiques et régissent ses travaux : d'une part l'Assemblée, dans laquelle tous les membres (dont la France) sont représentés et d'autre part, un conseil de 36 membres élus par l'Assemblée, choisis de manière à assurer une représentation équitable des pays de différents groupes, dont ceux déjà engagés dans l'exploration minière des fonds marins et ceux qui disposent de fonds riches en ressources minérales marines. Elle dispose aussi d'une Commission juridique et technique et d'une Commission des finances.

Cet organe est singulier, car en plus de mettre en place une politique de gouvernance au regard des grands fonds marins, c'est l'AIFM qui examine les demandes de prospection dans les eaux internationales. Elle contracte directement avec les pays, s'assurant du suivi et du bon déroulement des règles édictées dans ces contrats. Sa singularité tient aussi à son rôle de gardienne de cette part de « patrimoine commun de l'humanité » que sont les ressources minérales marines (déclarées comme telles par l'ONU).

8. www.isa.org.jm

9. https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXI-6-a&chapter=21&clang=_fr

En matière de réglementations et d'analyses, beaucoup de choses restent à construire puisque nous sommes sur un domaine encore très prospectif. L'AIFM produit dans cet esprit des textes législatifs, des recommandations et dissémine les bonnes pratiques à destination des pays intéressés par le sujet. Une des prochaines étapes est la mise en place d'une réglementation au regard de l'exploitation des mines sous-marines.

L'Union européenne quant à elle s'intéresse aussi à ce sujet, identifié comme l'un des leviers principaux pour une croissance durable et la création d'emplois pour les générations futures. La Commission européenne est ainsi engagée¹⁰ dans nombre d'études et de projets visant à préciser les avantages, les inconvénients et les écarts de connaissances associés à l'exploration et l'exploitation minières sous-marines. Par ailleurs, il est important de signaler, au titre des coopérations européennes, que le Cluster maritime français et la *Deep Sea Mining Alliance* allemande ont signé en octobre 2015 un protocole d'accord sous la forme d'un MoU (*Memorandum of Understanding*), alors que le représentant du gouvernement français signait simultanément, avec son homologue allemand, une lettre d'intention sur ce sujet.

Au niveau national, en France, c'est le code minier qui régit l'exploration et l'exploitation des mines terrestres et sous-marines. Un chantier de réforme de ce code minier est en cours, visant notamment à le mettre en conformité avec la Charte de l'environnement. Cela rentre en résonance avec la décision prise lors du Conseil interministériel de la mer (CIMer) de juin 2011 d'élaborer une stratégie nationale sur les ressources minérales profondes, qui fut approuvée et publiée¹¹ lors du CIMer du 22 octobre 2015.

Concrètement, cela s'est traduit par le suivi du permis « nodules » dans la zone de Clarion-Clipperton, qui vient d'être renouvelé à l'été 2016, et celui du permis « sulfures » sur la dorsale volcanique médio-atlantique, signé à l'été 2012 avec l'AIFM.

L'Ifremer vient d'ailleurs s'engager à cet égard le *Pourquoi Pas?* dans la campagne « Hermine », embarquant une équipe pluridisciplinaire de chimistes, de géologues et de biologistes.

On peut espérer que ces initiatives sont les premières étapes de la mise en œuvre d'une véritable stratégie d'exploration et d'exploitation des ressources minérales profondes.

10. https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/policy/seabed_mining_en

11. www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/strategie_gfm_du_22_octobre_2015.pdf

Conclusion

Si la France dispose aujourd'hui de deux permis internationaux « nodules » et « sulfures », sans compter des zones comportant des indices favorables de minéralisation dans ses eaux territoriales ou ZEE (notamment à Wallis & Futuna et en Polynésie française), véritables réserves foncières en minerais stratégiques, si elle dispose aussi de professionnels de premier rang aptes à constituer une filière à la fois complète et d'excellence, elle n'est cependant pas la seule lancée dans cette course aux abysses ni la plus en avance. 26 pays sont contractants avec l'Autorité internationale des fonds marins, parmi lesquels l'Allemagne, la Chine, la Corée du Sud, l'Inde, le Japon et la Russie par exemple.

L'exploitation des ressources minérales marines peut être, on l'a vu, une réponse aux enjeux de la croissance de demain, tant au niveau des matières premières, de plus en plus rares, qu'au niveau de la diversification de leurs sources d'approvisionnement.

Le Cluster maritime français¹² travaille depuis octobre 2011 avec les acteurs de cette filière d'avenir à faire avancer au niveau international et national les projets de mines sous-marines, notamment à travers un *gap analysis*, feuille de route technologique mettant en lumière les différentes étapes sur les plans technique, politique et environnemental, permettant de développer un véritable projet de dimension industrielle et durable. Il est, comme cela a été confirmé dans la Stratégie relative à l'exploration et à l'exploitation minières des grands fonds marins¹³, en lien direct sur ce sujet avec le Secrétariat général de la mer.

Espérons que la France se dotera encore plus et mieux des moyens nécessaires à l'application de cette stratégie et accélèrera son action, par exemple en programmant des plans de financement suffisants pour le développement d'une industrie d'avenir. Elle tiendra ainsi la promesse réaliste d'une filière nationale d'excellence à l'horizon 2030.

12. www.cluster-maritime.fr

13. Approuvée en Comité interministériel de la mer du 22 octobre 2015.

LA TECHNIQUE





Le Sea Orbiter®,
vaisseau d'exploration des océans
et laboratoire océanographique
flottant. © Jacques Rougerie.

« L'industrie 4.0, c'est la 4^e révolution industrielle »

Entretien avec Olivier SCALABRE
Boston Consulting Group

Études Marines: Comment définiriez-vous l'industrie 4.0?

Olivier Scalabre: L'industrie 4.0, c'est la 4^e révolution industrielle. La machine à vapeur a entraîné les premières vagues d'automatisation au milieu du XIX^e siècle, le fordisme, la standardisation du travail au début du XX^e et dans les années 1970, nous avons eu les premières vagues de robotisation dans l'automobile et depuis, nous n'avons pas réussi à changer le modèle de nos usines.

Même avec les délocalisations?

Précisément, faute de pouvoir transformer nos sites de production, nous avons cherché à gagner en compétitivité *via* deux leviers: la délocalisation et la spécialisation. Il y a cinquante ou soixante ans, les usines étaient beaucoup plus polyvalentes... Mais aussi beaucoup moins efficaces. Pour amortir les coûts fixes, on les a donc conçues plus grandes tout en les spécialisant sur un produit. Sauf que la spécialisation va à l'encontre de la proximité client: on perd en réactivité. Et quand un concurrent change la donne, vous ne pouvez plus suivre. C'est l'exemple de *Zara* et de sa pluralité de collections annuelles: personne n'a pu se mettre au diapason du fait d'usines trop spécialisées et délocalisées. C'est une des limites de la délocalisation à laquelle s'ajoute désormais une deuxième: les pays *low cost* sont de moins en moins *low cost*. L'écart de coûts se resserre: la Chine sera au même niveau que les États-Unis l'année prochaine, le Brésil, qui était un des pays les plus compétitifs au monde, est maintenant plus cher que la France. L'industrie 4.0 arrive donc à un moment où le modèle industriel est à bout de souffle, car trop rigide, de moins en moins adapté au mode de consommation et parce que les économies qu'il engendrait deviennent de plus en plus faibles.

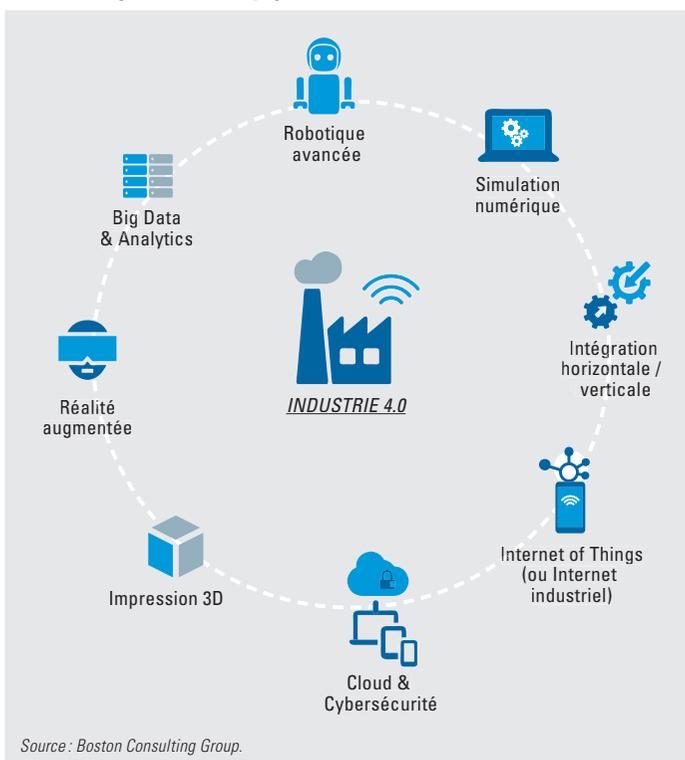
Sur quoi repose précisément cette nouvelle révolution industrielle?

C'est un assemblage de briques technologiques dont la première est constituée d'une nouvelle génération de robots. Collaboratifs, ils coopèrent entre eux et avec l'humain. Ils permettent d'automatiser une partie du travail qui ne pouvait l'être avec les robots d'ancienne génération, faits pour opérer à très grande vitesse et abattre des tâches peu complexes à très grande cadence. Les nouveaux robots sont programmables, reprogrammables très facilement et déplaçables d'un endroit à un autre. Mais cette révolution robotique n'aurait pas le même impact sans les *Automated Guided Vehicles* (AGV), petits chariots autonomes qui peuvent aller d'un point à l'autre de l'usine

sans que quelqu'un soit derrière. Grâce à eux, on peut modifier la configuration de la ligne de production de façon quasi permanente quand auparavant il fallait du génie civil, des convoyeurs, des machines.

Pour aider les industriels à mieux appréhender cette révolution et les technologies qui la constituent, le BCG a d'ailleurs lancé en 2016 l'*Innovation Center for Operations* (ICO). Cette usine pilote leur permet d'expérimenter sur des lignes de production réelles toutes les nouvelles technologies et les nouveaux savoir-faire des opérations. Deux lignes de production ont été créées pour couvrir les grandes typologies de fabrication industrielle et répondre aux défis de tous les secteurs : la première par assemblage avec une ligne de scooters, la seconde par procédés avec une ligne de fabrication de bonbons. Avec ce centre, nous voulons aider nos clients à accélérer leur transformation vers l'industrie 4.0.

Les huit briques technologiques de l'industrie 4.0



Les imprimantes 3D font partie de ce champ industriel mais se limitent-elles aux structures plus petites?

Elles en font totalement partie et avec un impact très fort. Dans un certain nombre de domaines – les secteurs utilisant des métaux ou plastiques très onéreux – la fabrication additive va même remplacer le processus de production classique. Dans l'aéronautique par exemple, une des pièces les plus complexes des moteurs est constituée des injecteurs de kérosène. Réalisés en titane – matière première au coût particulièrement élevé – leurs éléments étaient usinés séparément avant d'être assemblés au terme de douze étapes successives. Avec l'impression 3D vous avez, pour ce cas précis, des gains de productivité et de matières premières immédiats. La fabrication additive va être généralisée dans toutes les industries et il y en a quelques-unes sur lesquelles l'impact sera considérable. Prenez les pneus: auparavant, les moules nécessaires à la fabrication des pneus étaient uniques, avec toutes les conséquences que l'on imagine en matière de stock. L'impression 3D permet de générer un moule à la demande, personnalisé en fonction des conditions d'utilisation du pneu, ce qui change tout. Enfin, ce type de technologie va révolutionner tout le champ du prototypage: les prototypes pourront être conçus de façon quasiment instantanée et les interactions seront beaucoup plus fortes avec le *design* et plus largement l'ensemble des départements concernés par la conception d'un nouveau produit.

C'est donc une révolution qui touche aussi bien l'amont de la production que la production elle-même...

Et l'aval! La réalité augmentée change ainsi la façon dont on réalise l'inspection des produits. Grâce à une caméra 3D branchée sur une tablette, l'opérateur peut par exemple vérifier que les pièces correspondent à la configuration choisie avant d'envoyer le produit dans le flux de production. La réalité augmentée modifie aussi la maintenance des machines: fini le temps des piles de documentations, l'intervention est projetée sur les lunettes de l'opérateur qui n'a plus qu'à calquer ses gestes sur ce qui défile. Revenons à l'aval, l'internet des objets constitue une autre brique technologique importante. Les capteurs que l'on insère dans les produits au cours du processus de production comme à la sortie d'usine permettent aujourd'hui de parvenir à une conformité, une qualité et un suivi jamais vus auparavant. En collectant les données, je peux comprendre pourquoi j'ai eu un produit sans défaut dans telles conditions et seulement à 70% dans telles autres. Au-delà, c'est toute une maintenance prédictive qui pourra être réalisée: même entre les mains de l'utilisateur, on saura à l'avance que tel élément de sa voiture ou de son four pourrait tomber en panne et qu'il nécessite d'être changé.

Ce que vous décrivez ce sont des machines à l'origine d'un produit fini mais aussi d'une quantité massive de données...

Exactement. Il faut bien comprendre que les usines produisent des téraoctets de données qui, avec l'industrie 4.0, seront intégrées sur une plate-forme dans laquelle on piochera en fonction des besoins. La maintenance prédictive par exemple permet, en collectant ces données, de prévoir quand une machine va tomber en panne et d'anticiper les bonnes opérations de maintenance à réaliser. D'autres applications tiennent à la réduction de la consommation d'énergie en optimisant le fonctionnement des machines, de la chaîne de production. Le centre d'opération et d'optimisation à distance inauguré par *Air Liquide* fin janvier 2017 lui permet par exemple, non seulement de gérer quatre de ses sites français à distance mais aussi, en collectant un milliard de données par jour, de réduire la consommation d'énergie tout en mettant en place une maintenance prédictive de ses installations. Inutile de souligner que les usines deviennent dans cette configuration un endroit stratégique, un point névralgique pour des attaques extérieures, ce qui ne sera pas neutre en matière de cyber-sécurité.

On mesure l'impact de cette révolution sur la productivité, mais elle offre aussi la capacité de personnaliser le produit : nous entrons dans l'ère de la personnalisation de masse ?

Oui, c'est ce que l'on appelle la *mass customization*. La combinaison de l'ensemble de ces technologies permet de réaliser un produit personnalisé au même coût et dans les mêmes délais qu'un produit de masse. Concrètement, si on prend l'exemple d'un scooter dans une ligne de production, il est doté d'une petite puce RFID¹ qui donne sa configuration finale, fait intervenir les AGV qui vont amener en bord de ligne les pièces nécessaires, interagit avec la table de projection qui va indiquer au technicien quels gestes faire, avant que la réalité augmentée ne permette de contrôler la qualité. Et tout cela au même coût qu'un produit standardisé.

Cette personnalisation de masse est totalement en phase avec l'évolution de la demande du consommateur en recherche d'individualité, d'immédiateté...

Tout à fait : regardez *Nike* qui imprime déjà en 3D la semelle individualisée de ses chaussures. Le maquillage de *L'Oréal* est en train d'évoluer sur le même modèle :

1. *Radio frequency identification.*

sur-mesure, personnalisé. Idem pour les cafés *Nespresso*... Cette personnalisation devient une norme de consommation qui nécessite d'être très proche d'un client qui n'accepte plus d'attendre, veut être servi le lendemain. Nous allons vers un format d'usines totalement différent, beaucoup plus petites, beaucoup plus proches des marchés de consommation, beaucoup plus agiles, qui fonctionneront à la demande.

Cela peut-il signifier, à terme, que le consommateur devant son écran personnalisera son produit en ligne, passera commande, avant que l'usine ne se mette immédiatement à le fabriquer pour une livraison deux-trois jours après ?

C'est en effet toute la tendance actuelle. Aujourd'hui, quand vous choisissez vos vêtements sur internet, vous pouvez déjà vous prendre en photo, donner votre morphologie, le site internet de la marque vous proposant ensuite des produits adaptés à votre taille ainsi que des éléments supplémentaires. C'est pratiquement de la semi-mesure et cela se développe dans toutes les industries. C'est une tendance de fond de la consommation, née du digital, mais qui était freinée par un modèle industriel incapable de suivre. C'est aujourd'hui ce qui change.

Est-ce qu'il n'y a pas un coût supplémentaire en matière de logistique et de stocks ? La diversité des pièces à fournir pour assurer la personnalisation du produit impose une chaîne logistique très performante et un stock conséquent...

En effet, mais dans le modèle actuel – un modèle où l'on est très spécialisé et loin des marchés finaux –, les coûts aval pour aller servir le consommateur sont loin d'être négligeables. Dans l'industrie 4.0, les coûts amont seront sans doute plus importants, mais il est quand même moins compliqué d'acheminer des pièces dans une usine que d'aller servir les milliards de consommateurs qui existent dans le monde.

Les pays gagnants seront donc ceux qui seront les plus aptes à optimiser les flux ?

Exactement. Nous n'aurons pas un modèle unique d'usines de petite taille : il y aura toujours en amont des sites à vocation mondiale qui transformeront des matières premières ou produiront des composants de niveau 1. À l'inverse, nous aurons en aval des usines qui réaliseront les assemblages et seront beaucoup plus proches des marchés de destination et beaucoup plus flexibles. Nous allons vers une globalisation

de l'amont et une ultra-spécialisation couplée à une ultra-régionalisation de l'aval. Dans ce contexte, il est bien évident que les grands gagnants seront les pays en capacité de relier de la façon la plus optimale l'amont et l'aval.

Cela redistribue les cartes de la globalisation ?

Je pense en effet que les flux mondiaux seront fortement impactés par cette tendance : nous allons vers des échanges beaucoup plus régionalisés. Chaque zone aura son pays *low cost* pour réaliser l'amont et un aval très proche des marchés. On trouve déjà, dans chacune des régions du monde, des pays *low cost* beaucoup plus efficaces que leurs homologues des confins. Le Mexique est ainsi bien plus compétitif que la Chine et constitue un formidable atout pour les États-Unis. En Europe, l'Espagne et l'Italie, en coûts rendus par rapport à la Chine, commencent à être compétitives de la même façon. L'industrie 4.0 ne fera qu'accélérer une tendance à la relocalisation déjà en œuvre du fait de l'égalisation des coûts de main d'œuvre et de la montée en puissance d'énergies renouvelables, localisées par définition.

Vous nous décrivez le monde qui vient mais concernant le déploiement de l'industrie 4.0, en sommes-nous aux prémices ou se diffuse-t-elle rapidement ?

Nous en sommes au tout début : dans les premiers 100 mètres d'un marathon avec des écarts qui ne sont pas encore décisifs. Il n'y a pas aujourd'hui un énorme décalage entre les différents pays du monde. L'Allemagne, les États-Unis, le Royaume-Uni sont concernés, tout comme la Chine qui y voit un moyen de regagner la compétitivité qu'elle est en train de perdre. La France possède beaucoup d'atouts dans son jeu mais sans toujours en avoir conscience. Aujourd'hui, tout le monde – PME comprises – fait des expérimentations, mais rares sont les acteurs à avoir franchi le cap des usines. *General Electric*, un des acteurs les plus avancés, a transformé 8 sites sur 200. Il reste donc encore du chemin à parcourir, mais cela peut être très rapide car cette révolution industrielle est une formidable chance pour remettre de la productivité dans nos usines : 25 à 30% de gains à 12-18 mois. L'avantage de ces nouvelles technologies est en effet qu'elles ne nécessitent pas obligatoirement de construire de nouvelles usines, elles peuvent s'insérer dans l'existant. Un site doté d'un parc machines vieillissant peut aussi accueillir des robots collaboratifs, des AGV, une plate-forme de données. L'enjeu aujourd'hui est précisément de transformer les usines existantes, viendra ensuite le temps des micro-usines derrière le magasin de sports pour faire des baskets sur mesure.

Donc la démocratisation est en marche?

Oui. Un robot collaboratif par exemple – l'élément le plus onéreux des technologies évoquées –, avec ses coûts d'intégration dans l'usine, coûte 70 000 euros, ce qui est dérisoire. Une puce RFID peut se trouver à 2-3 centimes d'euros et par conséquent équiper n'importe quel produit sans que cela occasionne un coût prohibitif. La *data*, quant à elle, est constituée de données existantes et le *cloud* n'est facturé qu'à l'usage : la plate-forme de données est donc très accessible. C'est très peu capitalistique au final. En fait, le plus gros frein réside aujourd'hui dans la formation et l'investissement sur les personnels.

Cela signifie qu'il y aura un fort impact sur l'emploi?

Pas tellement au niveau des cols bleus : ces technologies sont intuitives et, en fait, elles sont arrivées à domicile bien avant d'arriver dans l'usine ; les opérateurs les maîtrisent sans en avoir conscience. Alors certes, avec des usines plus productives et des ouvriers plus polyvalents, on aura sans doute besoin de moins de personnes. On évoque 20 % de productivité en plus et 20 % de personnes en moins, mais comme, à l'inverse, des usines vont se relocaliser pour se rapprocher des lieux de consommation, des emplois se recréeront. Au final, cela devrait être neutre pour l'emploi des cols bleus. En revanche, pour les cols blancs, cela va constituer une vraie révolution. Selon une étude BCG, 37 % des industriels français considèrent ainsi le manque de personnel qualifié comme le défi principal de l'industrie 4.0.

Nous aurons besoin de *data scientists*, d'architectes données, d'automaticiens, d'experts en cyber-sécurité. C'est pour les cols blancs que les écarts, et par conséquent les défis, seront les plus importants.

Propos recueillis par l'ASP Quentin Chanal et Cyrille P. Coutansais

La fabrication additive : une révolution au XXI^e siècle

Joël ROSENBERG

Ingénieur en chef de l'Armement

Chargé de mission au sein de la direction de la stratégie de la DGA

—

Ni la DGA, ni le ministère n'ont pris de position sur ce sujet
et les propos n'engagent que l'auteur de l'article.

Révolution lente et profonde, donnant lieu à une innovation technologique continue, l'impression 3D, que l'on appelle aussi « fabrication additive », représente un enjeu important de l'industrie du futur. Elle va impacter l'écosystème économique global (emploi, offre, demande et investissement) et l'écosystème de pratiquement toutes les industries (savoir-faire, logistique, conception de produits, vente, etc.). Prenant acte de ce vaste enjeu aux multiples conséquences, le Conseil général de l'armement, organe de réflexion directement rattaché au ministre de la Défense, s'est rapproché de la Chambre de commerce et d'industrie Paris Île-de-France afin de réaliser un état des lieux et de formuler des recommandations¹. Le rapport issu de ces travaux présentait un panorama des différentes technologies utilisées et de leurs points-clés, des industriels qui maîtrisaient une partie de la chaîne de l'impression 3D ainsi qu'une analyse du phénomène de « makers² » et de son écosystème de *start-up*, de la mutation des modèles économiques et des applications dans des secteurs aussi divers que l'aéronautique, le médical, la construction, le *design*³. Cet article, s'appuyant sur ce rapport, fait état des développements récents s'agissant des technologies et des applications, notamment dans le domaine militaire.

Un enjeu industriel

Nous disposons de fortes compétences en France, mais diffuses ou concentrées dans des endroits relativement secrets, chez quelques grands industriels et des PME très spécialisées. La mode des *makers* et l'engouement pour les « *fab labs*⁴ », fort louable en soi car il s'agit souvent de la première étape pour passer de la conception en numérique vers la réalisation directe de petits objets, a quelque peu faussé la vision

1. Joël Rosenberg, « L'impression 3D : porte d'entrée dans l'industrie du XXI^e siècle », <http://www.cci-paris-idf.fr/sites/default/files/etudes/pdf/documents/impression-3d-etude-1509.pdf>

2. De l'anglais « *to make* », fabriquer. Ce sont les amateurs de projets tournés vers la technologie et adeptes d'une culture contemporaine du « *do it yourself* », « faites-le par vous-même ». Les domaines typiques de ces projets sont la robotique, l'électronique, l'impression 3D.

3. Le rapport, auquel a été associé un institut de prospective, Boostzone, a été présenté fin 2015 au ministre de la Défense ainsi qu'aux cabinets du président de la République et du ministre de l'Économie d'alors, Emmanuel Macron, et à tous les acteurs concernés. Il a donné lieu à différents séminaires. Reprenant les recommandations du rapport, les industriels et les grandes institutions de recherche ont organisé en 2016, sous l'égide de l'Alliance pour l'industrie du futur, un groupe de travail et ont fixé eux-mêmes les priorités et thèmes qu'ils entendaient adresser et partager : machines, procédés, matériaux, chaîne numérique, etc. Il en est issu une première feuille de route de la fabrication additive en France qui sera remise fin juin 2017 au nouveau gouvernement. Ces échanges entre différents secteurs qui n'ont *a priori* aucune raison de travailler ensemble sont fructueux : citons notamment les travaux croisés entre des industriels de l'automobile et ceux du secteur aéronautique-défense.

4. Un « *fab lab* », contraction de l'anglais « *fabrication laboratory* » – laboratoire de fabrication –, est un lieu permettant la fabrication de divers objets. Un *fab lab* est à l'origine un lieu cadré par le *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) et la *FabFoundation* qui propose un ensemble de logiciels et solutions libres et *open source* ainsi qu'une charte de gouvernance. Ces *fab labs* sont réunis en un réseau mondial très actif. En France, s'est développé aussi un modèle de « *makerspace* », sorte d'ateliers de fabrication numérique dont certains sont antérieurs aux *fab labs*. Il y a eu un amalgame entre les deux notions et l'on désigne souvent par le terme *fab lab* ce type d'ateliers bien qu'ils ne respectent pas toujours les critères élaborés par le MIT (par exemple des *fab labs* d'entreprises, qui n'utilisent pas l'*open source*, ne sont pas ouverts au public et ne sont pas connectés au réseau mondial des *fab labs* qui observent la charte du MIT).

que l'on peut avoir de l'impression 3D. Car les enjeux de cette technologie résident plus dans les produits et la manière de les mettre à disposition des individus et des entreprises que dans la possibilité pour chacun d'avoir une imprimante chez soi. Sur le fond, la fabrication additive n'est pas un « gadget » mais un enjeu industriel majeur.

Cette technologie est opérationnelle depuis de nombreuses années pour de très nombreux matériaux comme les polymères, les cires, les résines. Les machines sont aujourd'hui nombreuses et variées, à des prix correspondant à des besoins amateurs comme professionnels : il y aura des évolutions, des révolutions sur les matériaux ou le traitement de multi-matériaux, mais l'offre est déjà très abondante. Le vrai enjeu aujourd'hui, et plus encore demain, réside dans les matériaux métalliques : on compte à l'heure actuelle moins d'une quinzaine de fournisseurs de machines de fabrication additive « métal » dans le monde.

Le principal intérêt de la fabrication additive tient à la fabrication de pièces très complexes en quelques heures quand il faut parfois de 18 à 24 mois avec les procédés classiques. Le surcroît de complexité n'entraîne pas ou peu de surcoût en fabrication additive puisque ce qui coûte, c'est le temps d'utilisation de la machine et surtout la quantité de matière première utilisée. La fabrication additive ouvre en outre la possibilité de réaliser des pièces que l'on ne savait pas fabriquer jusqu'à présent, par exemple plus légères tout en étant plus solides, multifonctionnelles ou encore intégrant plusieurs dizaines ou centaines de pièces détachées en une seule. Une nouvelle ère industrielle s'ouvre : fabriquer ce que l'on imagine, plutôt qu'imaginer ce qu'il était possible de fabriquer.

Toujours est-il que dans le métal, réaliser une série de quelques milliers de pièces avec un niveau de qualité élevé reste très compliqué, car les machines, les matériaux et les processus ne sont pas assez stables et standardisés. Il y a encore beaucoup de compétences à mettre en œuvre pour fiabiliser la qualité de la mise en forme de la matière première, stabiliser les machines, travailler sur les traitements des pièces après l'impression qui seront d'une très grande variété et complexité⁵ et surtout caractériser la qualité et la fiabilité dans le temps des pièces produites. Ces technologies s'appuient sur de très nombreuses techniques – notamment le dessin numérique en trois dimensions – mais l'une des clés les plus importantes reste les sciences des matériaux : le savoir-faire en métallurgie, loin d'être un corps de métier qui va disparaître, paraît ainsi plein d'avenir. Face à une technologie qui n'est pas

5. Le traitement d'une pièce après impression métallique, qui est souvent un mode de fabrication très agressif sur les matériaux, est fondamental dans certains cas (bains chimiques, traitements thermiques) pour donner à la pièce certaines caractéristiques de résistance ou de tenue dans le temps.

pour des « petits ». Cela implique de la part des États une vigilance stratégique et une véritable politique de développement de cette industrie à la fois du côté des machines, des matériaux, des processus et des industries utilisatrices. La plupart des acteurs sont encore vulnérables financièrement, leur valorisation est limitée alors que leurs besoins financiers de développement sont importants. Il est peu probable que cette industrie débouche sur de fortes valorisations – la rente à prévoir sera captée par les utilisateurs plutôt que par les acteurs industriels de la filière – et le risque de



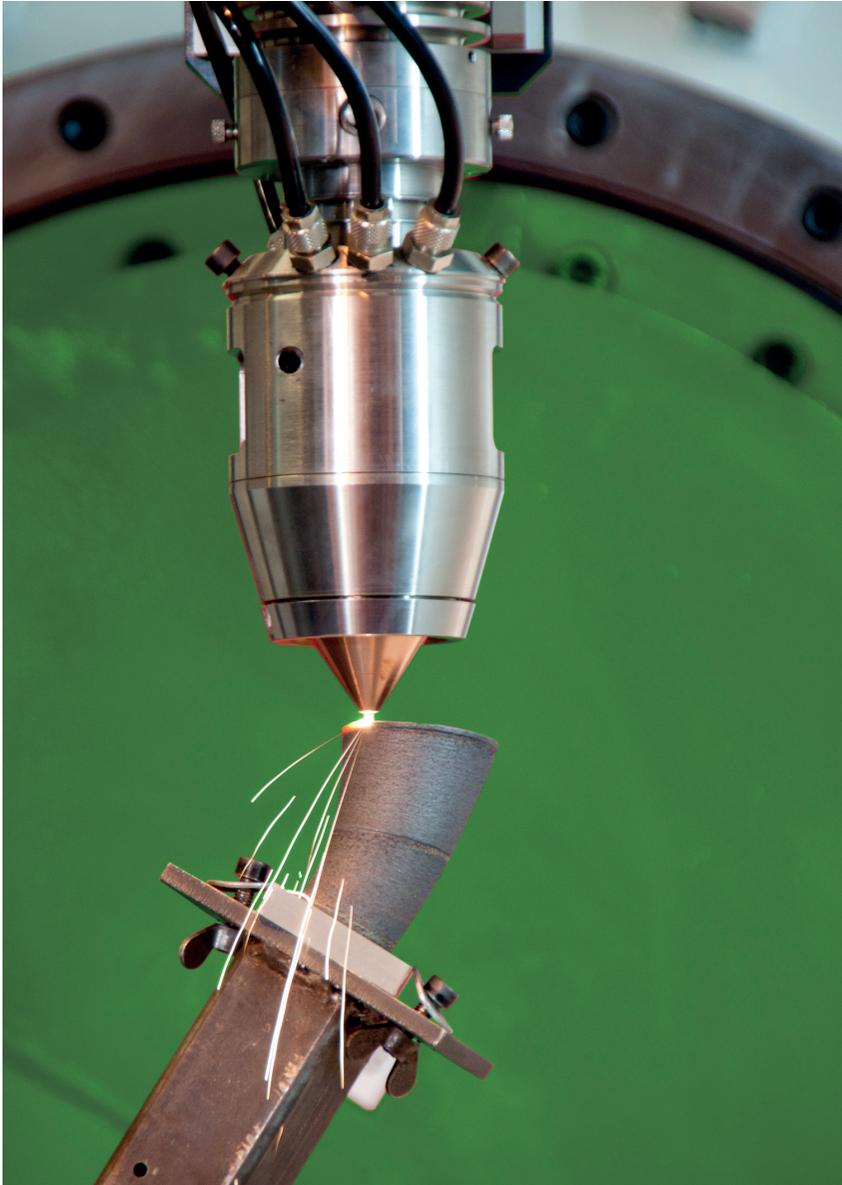
Imprimante 3D métal par faisceau d'électrons (EBAM). © Lockheed Martin.

voir des entreprises innovantes absorbées par de grands groupes internationaux est élevé. C'est un enjeu, car la fabrication additive est un domaine où les dépôts de brevet sont nombreux, notamment pour bloquer l'innovation des concurrents.

Partie en retard – au moins dans les offres commerciales – sur l'impression 3D, la France possède cependant de nombreux atouts dans son jeu. Elle a la chance d'avoir au moins trois constructeurs de machines de classe internationale : le groupe *Gorgé*, via sa filiale *Prodways*, *Fives-Michelin*, rebaptisé *Addup* début 2017, et *BeAM*. Les solutions *AddUp* sont encore en phase de lancement, mais elles ont la plus grande maturité technologique grâce aux réalisations de *Michelin* qui présente probablement aujourd'hui les machines les plus abouties

au monde pour la fabrication industrielle. Ce fabricant de pneumatiques produit déjà en impression 3D 800 000 pièces en métal par an. Ces pièces sont des éléments de moules en acier, certes de petites tailles, mais remarquables par leur complexité et la qualité de la réalisation. *BeAM*, de son côté, présente une solution originale et très intéressante : une étude de faisabilité est en cours pour la réparation de quelques pièces du Rafale au sein des ateliers de l'Armée de l'air. Leur technologie consiste à projeter des particules métalliques en utilisant la fusion laser sur la surface à traiter. Si le projet fournit des résultats convaincants⁶, la technologie pourra s'appliquer à beaucoup d'autres pièces, générer des économies substantielles et diminuer dans un certain

6. Les études sont en cours, les procédés seront exploités dès que possible, mais s'agissant de nouveaux modes de réparation, plusieurs années sont nécessaires pour les validations techniques et les certifications.



Buse d'une imprimante 3D en fonctionnement.
© BeAM.

nombre de cas très significativement les délais d'approvisionnement. *Prodways*, qui a commencé par des machines de fabrication additive en matériaux organiques, s'oriente également vers des machines en métal avec un partenaire chinois et a fait l'acquisition de plusieurs sociétés de services bureau pour fabriquer sur commande des pièces.

Un enjeu militaire

La fabrication additive dans des matériaux organiques (plastiques, polymères) est maîtrisée et peut déjà servir dans les unités ou sur le terrain à fabriquer des pièces d'appoint ou des outillages.

En ce qui concerne le métal, la difficulté vient de la qualification des modes de fabrication par matériaux métalliques et, pour le moment, par machines. Pour les pièces qui peuvent avoir des aspects critiques – sur véhicules de transport, sur aéronefs, sur armement par exemple –, une certification de la tenue de la pièce, qui permet de s'assurer de ses performances sur une durée d'exploitation, ou de la réparation sur une pièce endommagée ou vieillissante, peut être de surcroît nécessaire.

Ce qui sera recherché tournera autour des nouvelles performances. Par exemple, une pièce qui va garder le même contour et pourra être évidée aura la même tenue structurale, mais un gain de masse de 60 à 70 %... Certaines pièces, comme les injecteurs, étaient autrefois un assemblage de plusieurs dizaines de petites pièces très difficiles à monter quand aujourd'hui – qu'il s'agisse du *Leap* de GE ou du moteur *Arrano* de *Safran* – elles sont imprimables en un seul bloc. On peut aussi imaginer de nouvelles géométries dans les parties les plus chaudes des moteurs afin de pouvoir monter encore en température et donc améliorer leur rendement. Citons encore le drone *Neuron*, un prototype aux allures futuristes qui contient une centaine de pièces imprimées en 3D, dont la moitié en métal, qui concourent à ses performances remarquables.

La fabrication additive va certainement à terme révolutionner toute la logistique en permettant d'imprimer là où on en a besoin des pièces, mais cela prendra du temps et ces travaux doivent être fédérés et centralisés pour optimiser les coûts et les délais de la courbe d'apprentissage de ces techniques.

Parallèlement à ces approches, les technologies s'accroissent et permettront de mieux répondre aux problématiques d'usage. Il faut garder en mémoire que si ces machines peuvent traiter des métaux différents, il faut ensuite les nettoyer de fond en comble.

Enfin, les poudres métal sont fines et des protections particulières sont nécessaires pour protéger la santé des opérateurs. Elles seront disponibles sur les prochaines générations de machines.

Ces applications vont pouvoir se développer progressivement dans les chantiers d'entretien et de maintenance, en prenant le soin de qualifier les procédés et de certifier un certain nombre de fabrications. La grande taille des pièces utilisées par les marines peut constituer un vrai problème, mais il existe des solutions techniques qui doivent être développées. Là encore, un choix doit être fait par matériaux métalliques – l'essentiel des pièces que traitent les marines, comme les autres armées, étant en métal – et suivant des critères de prix et de disponibilité de pièces. Certaines marines ont déjà embarqué des imprimantes 3D à bord, mais il s'agit surtout d'imprimantes en matériaux organiques (polymères), ceci pour faire des tests et des échantillons d'éprouvettes à analyser. Quant aux imprimantes en matériaux métalliques, elles occupent un espace physique certain et nécessitent des protections pour les personnels qui les utilisent : cela n'est envisageable que sur de très grands bâtiments.

S'il faut retenir une conclusion, c'est que, pour l'impression en métal, les technologies ne sont maîtrisées aujourd'hui que par des spécialistes expérimentés. Les travaux et l'ensemble des coopérations lancés par les industriels devraient permettre de nombreuses innovations dont une meilleure accessibilité des machines, notamment avec celles qui sortiront dans les cinq années à venir. Il est probablement judicieux de commencer à préparer quelques études – certaines ont déjà été lancées –, de se tenir prêts à une maturation de ces sujets et de prendre le temps de former les personnels qui seront dédiés à ces nouveaux moyens. Car sur ces sujets, l'enjeu RH est essentiel : la bataille de l'imprimante 3D se joue autant sur la machine que sur l'Homme.

La cybersécurité du navire de transport : un enjeu essentiel pour l'avenir ?

Sébastien LE VEY

Administrateur principal des Affaires maritimes

Chef de la mission « Sécurité des navires »

De nos jours, tous les moyens de transport évoluent et la technologie ne cesse de nous surprendre. Prendre place à bord d'une voiture autonome pour se rendre d'un point A à un point B n'est plus une utopie. La voiture autonome existe bel et bien et fonctionne. À un détail près! Cette voiture nécessite une sécurisation parfaite de son système d'exploitation afin de ne pas être contrôlée à distance. Et pourtant, c'est ce qui est arrivé en 2016 : un prototype de voiture autonome a été pris pour cible par des « *hackers* ». Ces derniers ont pris la main sur le système d'exploitation, puis télécommandé le véhicule à leur guise. Les images ont fait le tour des réseaux sociaux et ces petites imperfections technologiques ont démontré le besoin de verrouillage de la gestion technique de ce mode de transport.

Plus près de nous, nos véhicules d'aujourd'hui sont désormais connectés aux applications de nos *smartphones* afin d'ouvrir les portières, allumer les appareils auxiliaires, avoir un suivi GPS, démarrer le moteur... La sécurisation de ces applications est-elle aussi mise en question? Des chercheurs de la société *Kaspersky Lab* se sont penchés sur la question et ont mis en lumière la vulnérabilité de ces applications qui peut déboucher sur la prise en main du véhicule. À ce jour, aucune exploitation de ces applications ni l'existence d'un utilitaire malveillant de type « cheval de Troie » qui permettrait de prendre le contrôle à distance du véhicule par leur intermédiaire n'ont été identifiées. Néanmoins, la gestion de ce type de faille par la cyber criminalité ne serait qu'une question de temps selon les experts.

Le domaine numérique du transport maritime évolue lui aussi rapidement. L'armement suédois *Stena Line* et la société *Rolls-Royce* vont prochainement développer un système de réalité augmentée adapté à une passerelle. Ce concept de superposition de données de synthèse dans un monde bien réel reposera sur la fusion des informations provenant des instruments de navigation et de bases de données. Ce système est en réalité un premier pas pour la société *Rolls-Royce* qui travaille à la conception d'un navire entièrement autonome. Les ingénieurs de cette firme espèrent faire naviguer d'ici dix ans des pétroliers, des porte-conteneurs totalement autonomes en mer Baltique¹.

Le navire autonome serait alors commandé à distance depuis un centre de contrôle. L'équipe de développement « *Ocean Blue* » de *Rolls-Royce* a ainsi mis en place un prototype de centre de contrôle à Alesund, en Norvège, qui simule une vue à 360° de cette tour de contrôle. Celle-ci serait armée par des capitaines et chefs mécaniciens qui suivraient les évolutions d'une flotte de plusieurs navires autonomes au niveau de la conduite et de la maintenance. Cette dernière serait assurée à distance au travers

1. Les Norvégiens *Kongsberg* et *Yara* se sont associés de leur côté pour concevoir et mettre en service à l'horizon 2020 le premier « *feeder* » autonome.

d'outils d'analyse de type drone. La conduite de ces navires répondrait quant à elle aux règles actuelles de navigation avec un plan de route pré-établi à suivre pour l'automate. Ce navire sans équipage et contenant uniquement des marchandises répondra en fait à un objet connecté de type IoT (*Internet of Things*). Sa conception sera bien plus complexe qu'une simple caméra pilotée à distance ou un réfrigérateur qui se remplit automatiquement afin de répondre aux besoins de notre vie courante. Néanmoins, ce navire du futur répondra aux mêmes exigences qu'un simple outil connecté à internet.

Cette prochaine évolution du transport maritime devrait réduire les coûts et augmenter les recettes des armateurs. Il n'y aurait plus aucune charge liée à un équipage et le volume des marchandises à bord du navire augmenterait avec la suppression des locaux qui lui sont dédiés. Vu d'un armateur, le navire autonome apparaît idyllique. Cependant, tout comme notre voiture autonome, il conviendra avant tout de sécuriser les systèmes d'information. Dans le cas contraire, les conséquences pourraient être dramatiques pour la sécurité de la navigation comme pour la protection de l'environnement. À court terme, le contrôle de ces systèmes d'information sera la véritable épine dorsale de notre navire.

Jusqu'à quel niveau doit-on les sécuriser? L'inventivité des cybercriminels est débordante et utilise une panoplie d'outils simples ou très complexes selon l'objectif recherché. L'arme ultime étant un ver évolué de type APT (*Advanced Persistent Threat*) dont on a pu découvrir les effets sur le programme nucléaire iranien en 2010². Bon nombre de personnes ont pris conscience à cette occasion que plus aucun système industriel ne semblait être protégé d'une cyber attaque. On peut donc raisonnablement se poser la question de la vulnérabilité numérique du navire: est-il envisageable d'imaginer la prise de contrôle à distance d'un pétrolier autonome et d'amener ce navire à se briser sur une digue pour déverser sa cargaison? Fiction? Réalité?

Les évolutions numériques à bord du navire

La mer est aujourd'hui un maillon essentiel et incontournable pour notre économie: près de 50 000 navires et un million de marins assurent 90 % des échanges en volume.

L'automatisation des navires de commerce a commencé dans les années 1960 avec pour objectif la conduite des moteurs et des installations auxiliaires de façon à libérer le personnel des servitudes du quart traditionnel. Cet objectif a été atteint rapidement

2. En juin 2010, STUXNET, un ver informatique particulièrement complexe a partiellement détruit le programme nucléaire iranien. Il est considéré comme l'une des premières cyber armes.

et, pendant les vingt ans qui ont suivi, l'automatisation s'est étendue peu à peu en dehors du compartiment machine vers la gestion de la conduite, de la cargaison. Les sociétés de classification ont parallèlement adapté leur réglementation aux navires en fonction de leur degré d'automatisation.

La fiabilité des systèmes d'information à bord du navire a permis une réduction spectaculaire du nombre de personnes constituant l'équipage. Ces progrès ont permis d'automatiser tous les domaines-clés du navire de commerce: navigation à travers la carte numérique (*Electronic Chart Display and Information System* ou ECDIS), propulsion *via* la généralisation de la conduite par automate programmable, gestion du chargement... Le monde informatique est désormais omniprésent à bord de notre navire de commerce et il semble aujourd'hui difficile de se passer de cette technologie qui régle les moyens de communication, de gestion de la cargaison et la conduite du navire.

Cette transformation technologique du navire de commerce en a modifié sa gestion. Désormais les échanges sont quotidiens entre le bâtiment, la compagnie, le port, l'agent maritime... Le navire n'est donc plus isolé du réseau des réseaux, il s'intègre naturellement dans le cyber espace et appartient à la toile planétaire du net.

La conduite de ces systèmes n'est malheureusement pas exempte de défauts. Embarqués, ils peuvent ainsi être la clé d'entrée d'un acte de malveillance. Ces trois dernières années, les systèmes de positionnement automatique et par satellite, de cartographie ECDIS et d'enregistrement des données (*Video Data Recorder*) ont fait l'objet d'analyses qui ont révélé plusieurs failles numériques à corriger. Ces simples constats illustrent que le navire peut être vulnérable à un acte de malveillance, d'espionnage, au vol de cargaison et, au bout de la chaîne des menaces, au sabotage et à la prise de commande à distance. Bien que ces actes restent à ce jour très limités contre un navire, il convient cependant d'anticiper car nous n'avons encore rien vu... Protéger le navire consistera à préserver ses moyens opérationnels et organisationnels, l'objectif final étant de garantir qu'aucun acte de malveillance ne puisse mettre en péril la conduite et l'exploitation du navire.

Construire la protection numérique du navire

Pour mettre en place une démarche de sécurité des systèmes d'information du navire, il est important de pouvoir identifier correctement les valeurs et les biens à protéger. Ceci implique une approche rigoureuse en fonction du type de navire et de son exploitation.

À ce jour, la normalisation maritime mondiale n'a pas mis en place un cadre obligatoire pour faire face à ce type de menace. Seul le code international pour la sûreté des navires et des installations portuaires (code ISPS) définit une recommandation en matière de gestion des procédés informatiques. Ce code précise que la vulnérabilité du système informatique devrait faire l'objet d'une évaluation dans le cadre de la sûreté du navire afin de disposer de mesures adaptées à une quelconque menace. Évaluer le niveau de cette dernière est par conséquent essentiel, c'est pourquoi la Direction des affaires maritimes (DAM) a mis en place en 2015 un groupe de travail comprenant l'Agence nationale de sécurité des systèmes d'information (ANSSI) et Armateurs de France (ADF) afin de définir les outils à mettre en place pour faire face à une cyber attaque.

Une phase de recueil d'informations a été réalisée au travers d'une enquête à bord de navires, d'un audit de cyber sécurité auprès d'un navire sensible et *via* l'analyse des vulnérabilités des équipements embarqués. Le recueil de ces éléments permet dès à présent d'en tirer trois enseignements. Le premier porte sur la nécessité de « sacrifier » les systèmes industriels à bord du navire. Ces systèmes resteront par définition fondés sur des technologies qui n'évolueront que très peu après leur construction. Ils sont par conséquent vulnérables. Il est donc fondamental de les isoler et de maîtriser les interconnexions avec d'autres systèmes de gestion du navire. Le second enseignement porte sur le besoin d'élever le niveau de protection du système d'information du navire en disposant d'outils adaptés à son exploitation et d'un système de gestion permettant de faire face à une cyber attaque. Enfin le troisième enseignement concerne le besoin de disposer de marins sensibilisés à cette menace. Ils pourront ainsi mieux détecter une incohérence système.

Ces enseignements permettent dès à présent de définir les outils à mettre en œuvre dans le cadre de la protection de la sécurité de l'information à bord du navire. Ils peuvent être classés en trois catégories :

- les outils de protection : antivirus, pare-feu, connexion « tunnel » (VPN *Virtual Private Network*), logiciel anti-espions (*Anti-spyware*), logiciel de cryptage de messagerie et de Wi-Fi, détection de toute intrusion (IDS), archivage de données (NAS *Network Attached Storage*) ;
- les outils de gestion de la cyber sécurité au travers de normes s'intégrant au niveau des dispositions déjà présentes à bord du navire. Les codes internationaux de sécurité (ISM) et de sûreté (ISPS) permettent de mettre en œuvre rapidement des procédures adaptées au navire. Ces procédures devraient y inclure les références à la politique de cyber sécurité de la compagnie, la gestion d'incident issu d'un acte de malveillance au travers de la reprise du navire, l'autocontrôle du système d'information du navire, la sauvegarde des données, la gestion des échanges entre le navire et les intervenants

extérieurs. Ce dernier aspect est essentiel car un cyber attaquant s'appuiera de façon certaine sur un intervenant extérieur pour contourner les mesures mises en place par la compagnie ;

- les outils de formation : il convient de sensibiliser tous les marins à ce type de menace afin qu'ils puissent mettre en œuvre une « hygiène informatique » à bord du navire. En complément, le navire devrait disposer d'un responsable en charge de la sécurisation des systèmes d'information à bord.

La mise en place de ce cyber triangle doit permettre de disposer d'un cadre afin de traiter une cyber menace.

Un enjeu essentiel?

Si le seuil de la menace est relativement faible à ce jour, les systèmes technologiques et de gestion adaptés existent pour la contrer. Le monde du « *shipping* » a aussi posé un premier jalon de directives à travers la circulaire 1526 de l'Organisation maritime internationale de mai 2016. Tout est donc en place pour protéger nos 50 000 navires. La faiblesse de la menace n'incite cependant pas les armateurs à investir dans la cyber sécurité. Mettre en place des mesures de sécurisation n'améliore pas la gestion de l'exploitation du navire et oblige à investir dans un domaine qui ne rapporte pas!

La non-prise en compte de cette menace pourrait cependant se révéler catastrophique et bien plus onéreuse qu'un investissement dans ce domaine. Le vol de cargaison apparaît à première vue la menace la plus importante. À titre d'exemple, la société *Verizon* avait mis au jour un projet de vol de conteneurs à bord d'un navire en 2016. Les cyber criminels s'étaient positionnés sur les réseaux d'une compagnie maritime et analysaient le positionnement des conteneurs à forte valeur ajoutée. Il ne restait plus qu'à transmettre ces informations à une équipe en charge de récupérer les conteneurs convoités. Par ailleurs, imaginez les conséquences d'une cyber attaque sur un porte-conteneurs de 18 000 boîtes dont la valeur marchande peut atteindre 1 milliard de dollars! Et plus les navires se numérisent, plus ils sont exposés. Sensibiliser et accompagner les armateurs pour concrétiser la mise en place d'outils de gestion, d'outils technologiques et d'une formation adaptée est donc essentiel. La DAM a ainsi mis en place un premier triptyque de documents afin de sensibiliser les compagnies. Ces derniers portent sur les moyens d'évaluation/protection du navire, le risque lié aux systèmes industriels du bord et enfin sur les bonnes pratiques en matière d'hygiène informatique³.

3. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/surete-des-navires-et-surete-portuaire>.

Un deuxième enjeu porte sur la sécurisation globale des systèmes d'information du navire, qu'il soit autonome ou non. Cette sécurisation doit se faire au niveau du navire et de la compagnie, de la gestion de la simple boîte *mails* jusqu'aux systèmes de conduite. Les messageries de société sont en effet une cible privilégiée des cyber-criminels, les données qu'elles sont susceptibles de fournir, directement ou indirectement, à l'attaquant étant plus facilement commercialisables sur le *Dark Web* que les contenus de messageries personnelles. C'est la raison pour laquelle les boîtes professionnelles reçoivent quatre fois plus de *malwares* que les autres. La boîte *mails* d'un navire peut ainsi être la clé d'entrée pour échafauder une prise en main de la cargaison, de l'image de la compagnie ou autre. Aussi, il convient que la direction de la compagnie s'inscrive dans la mise en place d'un cadre normatif à bord du navire pour éliminer tout type de faille système.

La formation des marins du navire constitue le troisième enjeu. Chaque marin devrait au moins connaître et adapter des mesures d'hygiène informatique de base. Ces mesures portent sur la gestion d'un simple mot de passe, d'une clé USB, la prudence sur internet... Un autre degré de formation devrait passer par la mise en place d'un responsable au niveau du navire. Ce dernier aurait pour objectif de piloter les systèmes d'information à bord du bâtiment. Cette tâche pourrait compléter une fonction déjà existante pour ce marin. Dans cet esprit, l'École nationale supérieure maritime et la DAM travaillent à la mise en place d'un référentiel de formation des officiers de marine marchande pour la rentrée 2017/2018.

Enfin, le quatrième enjeu devrait porter sur la gestion croissante de l'internet des objets. Depuis une dizaine d'années, le réseau internet se transforme progressivement en un réseau étendu reliant plusieurs milliards d'êtres humains mais aussi des dizaines de milliards d'objets. L'IoT, grâce à l'omniprésence de ses capteurs et systèmes connectés, fournit au système de pilotage des informations qui permettent d'identifier et de résoudre différents problèmes. Ces systèmes permettront à terme aux compagnies maritimes de bénéficier d'une meilleure rentabilité du navire *via* une baisse des coûts d'exploitation et de maintenance. L'une des prochaines intégrations de l'IoT dans le monde maritime concerne le suivi de conteneurs. En 2017, la société française *TRAXENS* va équiper 200 000 conteneurs d'un boîtier intelligent. Ce dernier permettra le suivi en mer, à terre du conteneur au travers d'outils de communication reliés aux réseaux GSM et satellitaire qui l'environnent. Le navire sera quant à lui pourvu d'un ordinateur central afin de relayer les informations délivrées par le boîtier équipant le conteneur. Pour être pleinement efficaces, ces objets doivent être sécurisés afin d'éviter tout acte de malveillance tel que la prise en main à distance afin de les intégrer à un réseau de machines zombies pour perturber un système (attaque de type DDOS).

Faire face à la cyber criminalité de demain

Qu'il s'agisse d'une voiture, d'une simple caméra pilotée à distance, d'un navire, les systèmes d'information ont envahi notre quotidien. Ils nous simplifient bon nombre de tâches et nous permettent d'être très performants. Chacun d'entre eux doit pouvoir répondre à nos demandes et non pas servir un intérêt criminel. Aussi, il est nécessaire de les sécuriser afin de maîtriser au mieux leur action. Néanmoins, il restera sur chaque système un risque résiduel. Ce dernier doit être évalué en fonction de la menace. S'il est trop important, il convient de mettre en place une contre-mesure. Cette dernière existe pour le navire de transport. Il convient juste de la mettre en place au travers d'un cadre simple et adapté à l'exploitation du navire.

Mais jusqu'où accompagner le navire de charge?

Cette frontière est fonction de l'évaluation de la menace. Si cette dernière correspond à la gestion de virus paralysant temporairement la cartographie électronique du navire ou la conduite des automates machines, l'équipage devrait pouvoir y faire face avec des procédures adaptées. Si elle prend la forme d'une cyber arme sophistiquée dormante utilisant des failles système de type « *0Day*⁴ », il est évident que ni l'équipage ni le support informatique de la compagnie ne pourront y faire face! Ce genre d'arme fait pourtant partie de la panoplie des outils à disposition d'organisations criminelles, de groupes terroristes ou d'États. En complément, n'oublions pas que le navire représente une excellente vitrine médiatique. Dans ce contexte, on peut raisonnablement questionner le besoin de disposer d'une « cyber flotte maritime stratégique ». À l'image de nos approvisionnements stratégiques qui imposent un quota de navires, on peut s'interroger sur le besoin pour la France de disposer d'un ensemble de navires garantissant un niveau d'exigence en matière de cyber sécurité permettant d'assurer nos approvisionnements stratégiques.

En matière de cyber criminalité, il faut s'attendre à l'inattendu.

4. Une faille « zero day » est une faille de sécurité identifiée par un nombre très restreint de personnes et ne bénéficiant d'aucun correctif connu.

Les drones au service de la mer : un outil en pleine évolution ?

Océane ZUBELDIA

*Chargée de recherche, domaine Armement et économie de défense
Institut de recherche stratégique de l'École militaire (IRSEM)*

Selon le rapport « *Blue Growth* » de 2012, l'économie maritime de l'Union européenne représente 5,4 millions d'emplois (7 millions en 2020) et une valeur ajoutée brute de près de 500 milliards d'euros par an ; les chiffres pour la France sont de 300 800 emplois directs et 69 milliards d'euros de valeur de production¹.

En raison de sa nature et de ses richesses, l'environnement maritime est l'objet de convoitises et de menaces : appauvrissement des ressources, migration de masse, pollution marine, piraterie, pêche illégale, etc. Avec la prise de conscience croissante des enjeux liés à la mer, la maritimisation de l'espace est de plus en plus prégnante, certaines solutions semblant offertes par de nouveaux moyens : les drones. Pensés comme un outil technologique, de défense et de sécurité, leur utilisation n'est pas l'unique apanage du domaine militaire, mais concerne aussi le domaine civil. On peut parier sur une accélération de leur usage et des applications de plus en plus duales, mais les drones aériens ne sont pas les seules catégories d'appareils auxquelles les marines et les gens de mer portent un intérêt. Les systèmes inhabités de surface et sous-marins, voire les robots, ont également toute leur place. La convergence entre les nanotechnologies, les systèmes de communication et les énergies alternatives semble tout aussi prometteuse.

Les drones et l'environnement maritime

Les premières expérimentations d'engins inhabités ont eu lieu sur l'eau. En 1898, l'ingénieur d'origine serbe Nikola Tesla développe un modèle réduit de bateau dirigé par radio et alimenté par batterie électrique, le *Teleautomaton*. Actuellement, il existe quatre types de composantes parmi les drones militaires (terre, air, espace et mer), mais une seule retient prioritairement l'attention des débats et de l'actualité : le volet aérien, idéal pour le survol de territoires, en temps de guerre comme de paix. Cette orientation va-t-elle perdurer ou peut-on attendre une rupture, celle du maritime ? Les océans couvrent 70 % de la surface du globe, assurent 90 % des communications internationales *via* les câbles sous-marins et le transit de 90 % du commerce mondial. Pour assurer la sécurité de ces liaisons et l'exploitation des richesses du domaine maritime, le recours à des moyens de surveillance et de protection est indispensable et les drones y trouvent toute leur place. Depuis le renforcement de la surveillance en mer, le partage d'informations, jusqu'aux opérations de recherche et de sauvetage en passant par la lutte contre les agissements criminels, les besoins abondent.

1. Voir https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/policy/blue_growth_fr

Le milieu marin se caractérisant par un environnement hostile et dimensionnant, il faut pouvoir compter sur des équipements adaptés. La rusticité, mais également la performance et l'intégration avec les autres appareils sont recherchées. Selon un rapport d'information du Sénat sur la défense des frontières maritimes en France: «*Le drone ne peut se substituer aux moyens actuels qui restent nécessaires en cas d'intervention, mais il permet d'élargir le champ visible et ainsi de démultiplier l'efficacité de moyens de surveillance trop peu nombreux*»². La surveillance et la protection des frontières de ces espaces demandent, en effet, le maximum de permanence que les systèmes inhabités, qu'ils soient aérien, de surface ou sous-marin, peuvent apporter.

L'élargissement des domaines d'emploi des technologies dites « opérées à distance » soulève cependant des questions liées au type de mission à réaliser. Du fait de leurs capacités et de l'éventail de possibilités qu'ils offrent, les drones sont aujourd'hui plus particulièrement pensés comme des appareils complémentaires intégrés à un ensemble.

Concernant la France, le système de drone aérien pour la Marine (SDAM) est en cours d'expérimentations en vue d'une intégration sur les plates-formes de la Marine dans le courant de l'année 2019, notamment au profit des futures frégates de taille intermédiaire (FTI)³. De son côté, l'*US Navy* a dévoilé fin 2016 un projet relatif au renouvellement de son architecture de forces sur 30 ans qui intègre une utilisation renforcée de systèmes inhabités capables d'opérer en environnement contesté ou en combinaison avec les groupes aériens composés de F-35C et de F/A-18⁴. C'est au cours de cette même période 2016 que l'actualité a montré les tensions pouvant naître en mer avec des drones, un navire battant pavillon chinois interceptant un drone sous-marin américain au cours d'une opération en mer de Chine méridionale. Reste que l'utilisation de ce type d'appareil semble devoir se développer du fait d'un champ d'application étendu, dans le domaine militaire comme civil.

L'exploitation économique de l'espace maritime est en effet confrontée à des défis extrêmement variés: sécurisation des infrastructures critiques, conséquences du réchauffement climatique, émergence de la cyber menace, tandis que les zones belligènes sont nombreuses et les aires d'instabilité sans limites⁵. Ce contexte requiert par conséquent une approche opérationnelle duale. De ce point de vue, les drones

2. Paul Giacobbi et Didier Quentin, Rapport d'information déposé par la Commission des affaires étrangères en conclusion des travaux d'une mission d'information, constituée le 4 mars 2015, sur « La diplomatie et la défense des frontières maritimes de la France – Nos frontières maritimes: pour un projet politique à la hauteur des enjeux », 29 juin 2016, voir <http://www.assemblee-nationale.fr>

3. Jacques Gautier, Daniel Reiner, Xavier Pintat, au nom de la Commission des affaires étrangères et de la défense et des forces armées, Projet de loi de finances pour 2017: Défense: équipement des forces, 24 novembre 2016, voir <http://www.senat.fr>

4. Nicole Vilboux, « L'Architecture des forces navales américaines: propositions pour 2030 », *Defence & Stratégie*, Fondation pour la Recherche Stratégique, n°9, avril 2017.

5. Ni géographiques ni politiques.

laissent entrevoir des synergies et des applications multiples. Suivant le type de système considéré – *Unmanned underwater vehicle* (UUV), *Unmanned surface vehicle* (USV), *Unmanned aerial vehicle* (UAV), etc. –, ils peuvent accomplir des missions très variées : hydrographie, surveillance, protection et exploration de parcs éoliens ou de plates-formes pétrolières, inspection des ouvrages d'art et réseaux, études scientifiques des cultures marines...

Une « économie bleue » des drones

La notion d'« économie bleue » est formulée par un entrepreneur belge, Gunter Pauli, qui fonde sa pensée sur un modèle économique ne produisant ni émissions ni déchets, mais permettant la création d'un écosystème favorable à l'emploi⁶. L'économie maritime défendue par l'Union européenne s'inscrit dans cette même perspective⁷ et, dans le cadre d'Horizon 2020, la Commission européenne subventionne de nombreux programmes de recherches relatifs aux drones tels que le projet *IntCatch*, d'environ 9 millions d'euros, coordonné par l'Université de Vérone (Italie). Associant six universités européennes et quatorze agences publiques et privées, ce programme vise par exemple la préservation du lac de Garde *via* le développement de drones de surface. Le projet européen *MORPH*, sous la gestion scientifique de l'Ifremer de la Seyne-sur-Mer et du Centre européen de technologies sous-marines, associe quant à lui 32 chercheurs de cinq pays (Portugal, Allemagne, Espagne, Italie, France). Il va développer dix robots sous-marins pour différentes missions : protection des ports et des barrages, analyse et inspection d'infrastructures industrielles en mer, détection des mines et exploration des ressources marines. Le projet *AEROARMS*, robot aérien doté de deux bras multi-articulés autonomes, coordonné par l'université de Séville (Espagne), regroupe cinq pays (France, Allemagne, Suisse, Italie et Espagne) autour de la réalisation d'un robot ayant la capacité de servir aux tâches d'inspection et d'entretien industriels pour un budget de 5,7 millions d'euros. Dernier exemple enfin, la société française CLS (*Collecte Localisation Satellite*), filiale du CNES spécialisée en océanographie spatiale, l'Ifremer et Ardian se sont associés avec le fabricant de drones portugais *Tekever* pour répondre à l'appel d'offres formulé par l'Agence européenne de sécurité maritime (AESM) concernant le développement d'un drone capable de détecter les pollutions maritimes par hydrocarbures⁸.

6. Gunter Pauli, *L'économie bleue: 10 ans, 100 innovations, 100 millions d'emplois*, Caillade Publishing, Paris, 2011.

7. Selon le commissaire Karmenu Vella : « une économie marine durable n'est pas un rêve, mais une réalité ». « Dans toute l'Europe, des personnes travaillent sans relâche sur la question de l'innovation et repoussent les limites », journée maritime organisée à Turku (Finlande), juillet 2016, Journée maritime européenne – la croissance bleue passe au niveau supérieur, voir <https://ec.europa.eu>

8. L'Europe est le plus vaste marché au monde d'importations de pétrole brut, transporté principalement par voie maritime. Toutefois, il est à déplorer qu'une partie des cargaisons se diffuse en mer suite à des accidents ou autres.

La loi n°2016-816 sur l'« économie bleue » du 20 juin 2016 a pris en compte ce développement attendu de l'économie maritime en introduisant, de manière tout à fait novatrice, la responsabilité due à l'usage des drones maritimes, de surface ou sous-marins⁹. Jusqu'à présent, aucun cadre législatif ne les prenait en compte bien que leur utilisation en mer nécessite des dispositions spécifiques qui ne peuvent être les mêmes que celles des règles relatives à l'insertion dans la circulation aérienne générale (CAG). Cette loi offre ainsi une forme de reconnaissance aux systèmes inhabités dans l'espace maritime et, d'une certaine façon, illustre leur importance grandissante.

Une application de premier ordre dans laquelle les systèmes inhabités pourraient connaître leurs lettres de noblesse est celle de l'exploitation des ressources du sol et du sous-sol marins (réserves d'hydrocarbures, nodules polymétalliques, ressources biologiques ou terres rares). Ces ressources font l'objet de nombreuses convoitises et suscitent un effort de recherche en vue de leur exploitation ; même si, à ce jour, il n'y a pas encore de maturité technologique suffisante pour une exploitation efficiente, il semble toutefois que la voie de la robotisation soit en train de s'ouvrir.

Vers une robotisation ?

Plus que pour les autres milieux, la question de l'automatisation des systèmes inhabités dans l'environnement maritime se pose. Qu'en est-il en France ? Les systèmes inhabités en milieu marin tendent à s'orienter vers une robotisation qui touche aussi bien les domaines militaire que civil. Le marché de la robotique semble porteur avec des appareils performants, économiquement et techniquement plus accessibles. Cet essor ne doit pas être déconnecté de la généralisation des robots dans les activités de loisirs. Le tableau¹⁰ ci-après montre toute la dualité de ces appareils et illustre de manière concrète qu'un domaine pousse l'autre en étant source d'innovations.

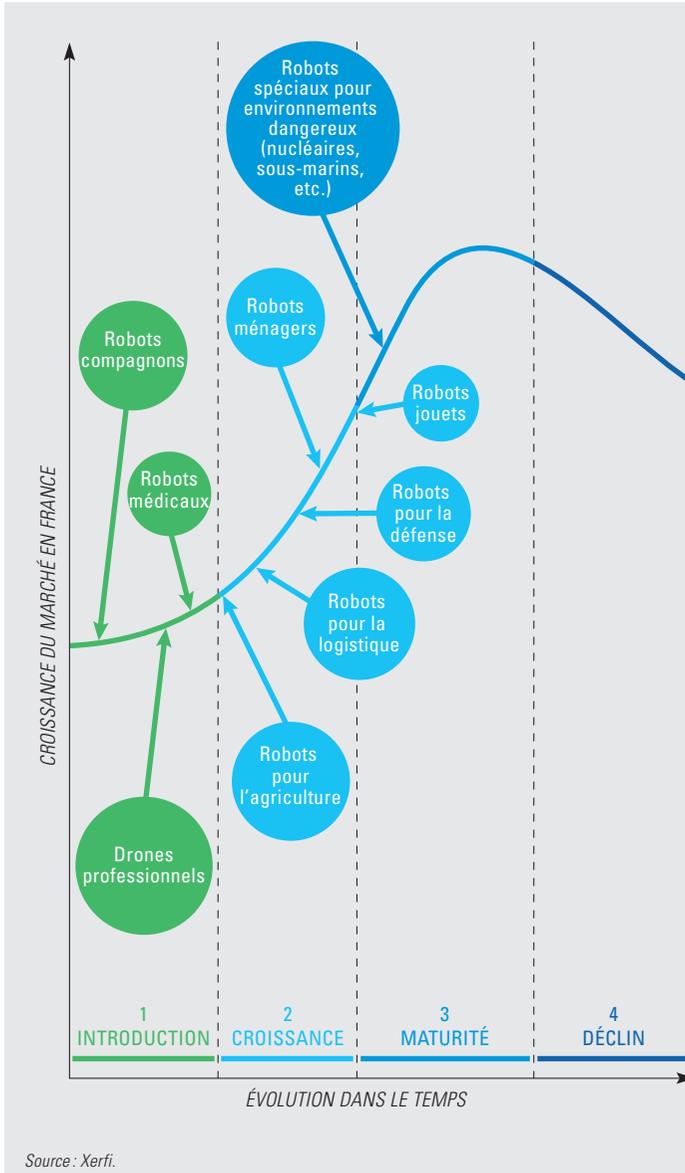
La généralisation de la robotisation pourrait concerner aussi le navire autonome¹¹. Cette opportunité d'emploi entraîne de vifs débats entre les « tenants des robots » et ceux qui souhaitent que l'homme demeure au cœur du processus de décision. S'agit-il de remplacer les hommes par des robots pour leur épargner des tâches dangereuses ou

9. Loi n°2016-816 du 20 juin 2016 pour l'économie bleue, voir article 87, <https://www.legifrance.gouv.fr>

10. Jérémie Tissier, « Le marché de la robotique va s'envoler en France », schéma issu de l'étude de la robotique en France publié par Xerfi (éditeur indépendant d'études économiques sectorielles), voir <http://www.journaldunet.com> ; Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques (PIPAME) et Direction générale de la compétitivité de l'industrie et des services (DGCIIS), *Le développement industriel futur de la robotique personnelle et de service en France*, voir <http://www.entreprises.gouv.fr>

11. Philippe Bricquer, « L'impact de l'arrivée des drones dans le monde maritime, allons-nous vers une marine de commerce 100% automatisée? », – École d'administration des affaires maritimes (EAAM), 2014, voir <http://igam.developpement-durable.gouv.fr>

Positionnement des différentes catégories de robots sur la courbe de vie de la robotique de service





Le drone S-100 *Camcopter*, aussi appelé SERVAL pour Système embarqué de reconnaissance vecteur aérien léger. Ici en essai avec le patrouilleur *Adroit*.

© *Marine nationale / M. Grozel.*

simplement pénibles comme dans l'industrie? La robotique maritime va bien plus loin dans la réflexion. Ainsi, les projets relatifs à l'autonomie, au stockage d'énergie et au respect de l'environnement concentrent les efforts de recherche. Une attention toute particulière est portée au transport international, le *shipping*. L'objectif est de développer des cargos qui soient autonomes et bénéficient d'un mode de propulsion hybride. La robotique sous-marine ouvre l'accès aux grandes profondeurs et devient par voie de conséquence un autre axe de développement. Elle permet de réaliser de nouvelles opérations¹² et de réduire les risques humains, par exemple dans la guerre des mines, l'exploration sous-marine ou la cartographie. Ce type de système permet d'acquérir des informations au centimètre près, quand les sonars des bateaux se contentent du mètre et les satellites de 5 kilomètres carrés. Des événements récents – l'exercice militaire *Unmanned Warrior*¹³ et la mission effectuée pour la recherche du vol MH370 – mettent en lumière l'intérêt stratégique de maîtriser

12. 90 % des fonds marins de la Terre demeurent inexplorés.

13. Exercice organisé en octobre 2016 par la marine royale du Royaume-Uni réunissant 18 nations. La presse l'identifie comme le « plus grand jeu de guerre de robots du monde ».

les profondeurs. Troisième axe de développement : les engins de surface utilisant les énergies renouvelables comme le soleil, la houle ou le vent pour se propulser. Dans un scénario futuriste, on peut imaginer des drones aériens se rechargeant en mer *via* des éoliennes. Toutes les voies liées aux nanotechnologies sont aussi prometteuses : des chercheurs de la *Case Western Reserve University (CWRU)*, université privée de Cleveland spécialisée dans la recherche médicale et l'ingénierie, ont mis au point un robot hybride qui associe muscles biologiques de limace de mer et carapace en polymère imprimée en 3D.

À l'avenir, les systèmes inhabités seront certainement de réels outils au service de la mer, tant dans les transports d'urgence et de commerce que dans le secours en mer, la guerre des mines ou encore l'hydrographie. Leur généralisation nécessite néanmoins, à ce stade, une plus grande maturité technique et énergétique.

« Nous sommes au commencement d'une nouvelle ère »

Entretien avec Jacques ROUGERIE
Architecte - Membre de l'Institut de France

Études Marines: Pensez-vous que l'on soit dans une ère de rupture?

Jacques Rougerie: On est au commencement d'une nouvelle ère de l'humanité, complètement planétaire. Prenez l'informatique: Gutenberg à côté, c'était la Préhistoire... Et on est à la Préhistoire de l'informatique! Mais cette Préhistoire ne sera pas aussi longue: c'est l'accélération du temps qui est extraordinaire aujourd'hui. Je crois que nous sommes au commencement d'une nouvelle ère, incroyable, qui va aller avec une telle accélération... On change de paradigme, on change complètement. Il faut changer de logiciel, accepter ce nouveau monde, plonger dedans avec force et ne pas avoir peur.

On a aussi un peu l'impression de reprendre le fil d'une histoire interrompue dans les années 1960/1970...

Oui, la vie est cyclique, avec des accélérations. Il y avait toute une jeunesse dans ces années-là qui croyait à ce monde de demain. On croyait à des énergies renouvelables, au solaire notamment... Avec un de mes grands copains, Moebius, on a passé des soirées à dessiner, rêver, imaginer des engins pour faire la course de la Terre à la Lune en voile solaire. C'est possible avec les vents solaires! Cela existera un jour: il y aura des courses de la Terre à la Lune, en voiles solaires. Puis deux chocs ont cassé cet élan: le choc pétrolier puis le sida. Il y avait une vraie angoisse économique, sociétale dans les années 1980.

N'avez-vous pas le sentiment que nous vivons aussi une période de rupture dans le rapport des hommes à la mer? Il y a eu la période des Trente Glorieuses, l'époque Cousteau, un temps d'aventuriers, puis une période de basses eaux où les financements se sont taris et aujourd'hui on a le sentiment d'un nouvel élan...

C'est vrai, il y a un basculement. Auparavant vous aviez quelques passionnés rêveurs – pragmatiques ou non –, qui s'aventuraient sur ou sous les océans. Mais c'était vraiment très, très, très peu d'hommes. La mer, pour tout le monde, était synonyme de mort. On est fascinés par la mort, mais on en a peur, on la repousse, on la craint. Or la mer, c'est tous ces mythes, ces légendes, ces écrits, *Le Vieil Homme et la mer*, la mer qui engloutit des marins... La mer c'est aussi les monstres, *Les Dents de la Mer*... La mer peut être nourricière, mais quand on voit les poissons sur les étals, ils sont tous gris. Alors que les poissons sont multicolores, parés de couleurs extraordinaires, argentés... L'imaginaire s'est bâti sur cette vision de la mer: morne, glacée, inquiétante. En plus,

sur Terre, la priorité était ailleurs : on a développé des technologies pour s'emparer de territoires, de richesses, avec des bateaux de plus en plus sophistiqués, sans penser un instant aller au fond des océans...

Et puis Cousteau arrive et nous montre qu'au-delà de cette peur, la mer recèle une beauté hors du commun. *Le Monde du silence* dévoile des jardins sous-marins – qui imaginait des jardins sous la mer? –, des saisons aussi. Ces images ont ouvert l'esprit, éveillé la curiosité, l'envie d'aller voir. On a peu à peu pris conscience de tout le potentiel des océans : les nodules polymétalliques, la faune, la flore. C'est un basculement total : on réalise que la nourriture du futur réside dans les océans, la pharmacologie de demain, les biotechnologies, l'énergie même avec les éoliennes ou les hydroliennes, que notre avenir réside dans les océans. La mer s'ouvre à l'Humanité. Ce n'est plus seulement des hommes comme Cousteau, Henri-Germain Delauze ou moi, cela concerne tout un chacun à différentes échelles.

Mais à qui cela va appartenir? Quand on voit l'appétit des hommes... Heureusement qu'il y a la Marine nationale. Je suis sérieux. On entre dans le vrai débat, dans le vrai grand débat. Vous avez vu ce qui se passe en Chine? Moi je vais en Chine depuis 30 ans. Il y a 20 ans, quand je parlais aux Chinois de la mer, je parlais chinois, c'est le moins que l'on puisse dire! Il y a 10 ans, la mer? Toujours rien. Ah, si peut-être, mais combien cela rapporte? Maintenant les Chinois sont en train de construire six sous-marins à grande profondeur, en-dessous de 6000 mètres, six sous-marins! Deux sont terminés, en essai, quatre autres viennent derrière. Et je n'évoque même pas le projet de station de recherche sous-marine permanente. Ils construisent des porte-avions, une flotte incroyable. Pourquoi? Vous connaissez très bien la réponse.

Théodore Monod a dit qu'une des ambitions de l'Homme était soit d'aller vers le ciel soit de descendre vers le centre de la Terre, ce qui implique la mer. La conquête de l'espace a longtemps plus fasciné que la conquête des fonds marins mais on a le sentiment aujourd'hui que cela s'équilibre... À quoi est-ce lié selon vous?

Je crois que c'est très profond, très ancré. L'espace fascine depuis toujours, crée des dieux, des mythes, plein de choses... La mer fascine aussi, mais elle a longtemps représenté la mort, à l'inverse de l'espace, plutôt synonyme de vie éternelle. C'est quand même magique ces étoiles... Et puis est venu *Challenger*. Jamais on n'avait imaginé mourir dans l'espace. Les ingénieurs le savaient bien sûr, les astronautes aussi, mais pas la mémoire collective. Sauf que là, il y avait une institutrice, une femme comme tout un chacun, à laquelle on peut s'identifier, qui part avec tout un

équipage... Et la navette explose : on se rend compte tout d'un coup que l'espace, c'est la mort. Cela a rééquilibré les choses en quelque sorte : l'espace est devenu moins riant et la mer, grâce à Cousteau, aux autres, moins inquiétante. Cela a entraîné un basculement en très peu de temps, une prise de conscience que ces deux mondes constituent l'avenir de l'humanité. Car inconsciemment, on ne veut pas se l'avouer, mais on sait que cela arrivera un jour, la Terre va disparaître. Donc l'Homme tend à cette échappée extraterrestre et la mer l'apporte : c'est le point de départ. Elle permet de la préparer, de s'y entraîner, tant les conditions entre ces deux univers sont semblables. Voyez le programme *Neemo* : les protocoles psychologiques et techniques des équipages de la NASA sont validés dans l'habitat sous-marin *Aquarius*, immergé par moins de 15 mètres de fond au large de Key Largo, en Floride. Et puis la mer, c'est le berceau de la vie : il faut sans doute y revenir pour mieux partir. C'est quelque chose qui se prépare inconsciemment chez l'être humain, dans son cerveau.

Vous évoquez beaucoup l'humain mais, pour le moment, l'aventure spatiale ou celle des grands fonds est menée par la robotique, les machines...

Ah, la robotique ! Quand elle est arrivée, elle a entraîné un questionnement sur le sens de risquer sa vie dans l'espace, sous la mer. La France, qui était pourtant en pointe dans l'exploration des grands fonds, a pris la décision étonnante de stopper l'Homme dans l'espace et de stopper l'Homme sous la mer. La COMEX a été stoppée, le CNES a été stoppé. L'ESA a un corps d'astronaute, mais plus le CNES. On joue sur l'ambiguïté avec Thomas Pesquet : il est ESA. À l'inverse, d'autres pays – États-Unis, Russie pour ne citer qu'eux – ont estimé que ces explorations avaient besoin d'être incarnées, que l'Homme est fait pour se surpasser, que sans rêve on n'entraîne pas les peuples et qu'une civilisation se meurt. Les Russes ont cet instinct très fort : ils ont compris, bien entendu, que la robotique est essentielle pour le futur de l'Humanité mais que c'est un non-sens de dire « la robotique va remplacer... » car ce n'est pas le débat. C'était peut-être un débat au début des années 1980-1990, mais ce n'est plus le débat. Il faut que l'Homme ait cette envie de se surpasser, d'aller voir plus loin. Dans les étoiles comme les océans.

Ce qui explique peut-être votre désir d'immersion à travers la conception de coques transparentes ?

On est des aveugles de la mer ! Avec le sous-marin, on est au cœur du monde sous-marin mais on n'est pas en osmose avec lui. On y est sans y être. Quand j'ai

conçu l'*Aquaspace* (en 1982!) avec sa coque transparente, ses 22 mètres de long, je passais pour un fou furieux. J'ai pourtant fait la traversée de l'Atlantique! Mais à l'époque, sur les quais de Saint-Malo, Kersauson qui montait à bord me disait: « Mais pourquoi t'as fait une coque transparente? Pour quoi faire? ». Et aujourd'hui, la *Compagnie du Ponant* a décidé de lancer quatre nouveaux bateaux dont on m'a confié la partie sous-marine. L'année prochaine, vous allez avoir des Ponant dotés de salons sous la mer: vous allez voir sous la mer, écouter sous la mer, ressentir les vibrations de la mer! On va installer des hydrophones, des caméras, des hublots, 40 ans après mes *Aquaspace*.

Et concernant *SeaOrbiter*, où en êtes-vous?

C'est avec Jacques Piccard que j'ai lancé *SeaOrbiter*. On a eu du mal à l'ancrer dans le monde scientifique. L'*Aquaspace* reste un bateau, à l'horizontal, doté d'une coque. *SeaOrbiter*, ce n'est plus un bateau, on est à la verticale, c'est un engin qui dérive, on est sous la mer, on y vit en permanence. L'angoisse! Les Américains ont pourtant réalisé un bateau de ce type, le *Flip*, dès 1962! Nous avons prouvé techniquement que cela fonctionnait grâce aux Norvégiens et leur laboratoire d'essais en bassin de Marintek. C'est une aventure qui va voir le jour. Quand? Je n'ose plus le dire maintenant parce que j'ai été un peu imprudent en disant: « en 2012 on va commencer le chantier et en 2015 on pourra naviguer à bord ». On est en 2017 et on n'a toujours pas débuté. Donc il faut être prudent. Jean-Louis Etienne aussi a beaucoup de mal. Il a repris un peu l'idée avec un projet très intéressant et très complémentaire qu'il faut faire... Mais nous ne sommes pas dans l'air du temps... Pourtant, je suis persuadé que dans les deux ans qui viennent, il y aura un basculement, une nécessité. D'ores et déjà, je suis sollicité par Singapour: j'y suis allé quatre fois. Les Chinois y pensent, les Américains y repensent... On sent bien que c'est quelque chose qui est en train de redémarrer.

La cité des Mériens de son côté s'apparente à la station spatiale internationale...

Exactement! On offre à l'humanité la station internationale des océans mais à très grande échelle, c'est-à-dire 15 000 personnes sur l'eau. Avec l'UNESCO, les Nations unies, on se dit dans les conférences annuelles de la Commission océanographique intergouvernementale qu'il faut un projet fédérateur, emblématique, qui soit le symbole d'une pensée, d'une volonté géopolitique: une cité des océans pour l'humanité, qui naviguera à travers les océans.

On vous sent toujours très tourné, ancré dans les océans : d'où vous vient ce désir de mer ?

Chacun a une force en lui. Malheureusement, tout le monde n'a pas la chance et le bonheur de pouvoir la développer pour X raisons. Parce que la vie vous amène sur d'autres chemins. Vous savez, quand vous êtes musicien, vraiment musicien dans l'âme, au plus profond de vous-même, ou peintre ou poète, souvent vous ne savez pas bien l'expliquer. Vous cherchez plein de « pourquoi ? » alors que c'est quelque chose d'inné. Pour moi la mer c'est pareil... Depuis ma plus tendre enfance... Avant de savoir marcher, je savais nager. Pourquoi la mer ? C'est comme cela, c'est inné. Vos premières lectures vous poussent instinctivement vers Jules Verne, au cinéma vous donnez une préférence au *Monde du silence*...

Et pourquoi l'architecture alors ?

L'architecture... Cette notion de bâtir est fascinante. Je ne suis pas du tout manuel, mais je vois dans l'espace. Je vois en trois dimensions et tout de suite je pense volumes, assemblages. Il y a des gens qui jouent sur des notes de musique, eh bien moi je joue sur des formes. Et l'eau m'a apporté cette troisième dimension, inexistante sur Terre. Sur Terre on est toujours avec la ligne d'horizon quand en mer cela bascule un peu, à bâbord, tribord, ce que vous voulez. Et sous l'eau vous êtes vraiment comme Icare, comme un oiseau : vous volez sous l'eau. C'est pour ça qu'il y a beaucoup de relations entre le monde de l'espace et le monde sous-marin : on retrouve quasiment les mêmes sensations. Donc c'est vrai qu'être architecte, cela me plaisait bien. Et comme Léonard de Vinci m'a toujours fasciné avec son idée simple de regarder le génie de la nature, d'essayer de comprendre comment les animaux s'adaptent à leur environnement, le biomimétisme m'a attiré.

Vous deviez être très atypique dans votre génération d'architectes, caractérisée par la conception et la réalisation d'édifices un peu hors-sol, sans forcément de prise avec leur environnement.

Oui, j'étais atypique. À l'époque, c'est vrai, on était plutôt dans du cubisme, dans Le Corbusier. J'ai fait mes classiques – Grand prix de Rome, etc. – mais toujours attiré par Léonard de Vinci et la mer. Puis est venu le temps des rencontres : Lucien Laubier, avec qui j'évoque un engin qui dériverait dans le Gulf Stream par -5 000, -6 000 de fond... Et c'est *Pulmo*, en 1974 ! Un engin bionique se déplaçant comme

une méduse, par pulsions. Ensuite Henri-Germain Delauze, la COMEX, la Marine nationale et c'est *Galathée*, la maison sous-marine, puis tout le reste...

Nous voudrions terminer cet entretien avec votre fondation : d'où vous est venu ce désir ?

Ma passion a toujours été l'enseignement, transmettre. Et comme l'Institut de France m'offrait la possibilité d'avoir une fondation, je l'ai voulue tournée vers les jeunes avec un objectif de développement durable. Mais de manière tangible : tendre vers des choses qui sont en train de naître, pas l'utopie pour l'utopie. Nous avons commencé avec 6 pays et 75 candidats et aujourd'hui nous avons 5 000 candidats, issus de plus de 100 pays avec, cette année, beaucoup de projets liés aux réfugiés climatiques. Les difficultés monstres que nous avons aujourd'hui au niveau européen avec les réfugiés du conflit irako-syrien ne sont rien, vous vous en doutez, face aux réfugiés climatiques qui vont se compter en millions, en dizaines de millions même. Or, l'architecture bionique est tout à fait adaptée à la montée du niveau des océans. Les endiguements, on le sait, ne dureront qu'un temps. Et puis on ne peut pas endiguer partout, certains États pourront le faire comme les Pays-Bas, mais beaucoup d'autres ne le pourront pas comme le Bangladesh ou l'Inde. Un des lauréats de la Fondation a proposé cette année de faire évoluer ces futurs réfugiés de terriens en mériens. Son idée est de construire des plates-formes flottantes qui s'agglomèreront progressivement comme des LEGO. On commencera par leurs jardins – que la mer commence déjà à grignoter – en déplaçant leurs petits potagers sur ces plates-formes. Ils se les approprieront peu à peu, les enfants viendront jouer sur ces terrains flottants qui feront partie du paysage. Puis on construira la maison et le village se reconstituera sur l'eau quand la dernière terre aura disparu. Quelle belle idée ! Cette Fondation, c'est le moyen à mon échelle de nous faire entrer dans ce nouvel univers, d'aider à changer notre logiciel pour plonger sans peur dans cette grande aventure qui nous attend !

Propos recueillis par l'EV2 Hélène Dupuis et Cyrille P. Coutansais



Les numéros publiés :

N°1 - *L'action de l'État en mer et la sécurité des espaces maritimes.*
La place de l'autorité judiciaire. Octobre 2011

N°2 - *Planète Mer. Les richesses des océans.* Juillet 2012

N°3 - *Mer agitée. La maritimisation des tensions régionales.* Janvier 2013

N°4 - *L'histoire d'une révolution. La Marine depuis 1870.* Mars 2013

N°5 - *La Terre est bleue.* Novembre 2013

N°6 - *Les larmes de nos souverains. La pensée stratégique navale française...* Mai 2014

N°7 - *Union européenne: le défi maritime.* Décembre 2014

N°8 - *Abysses.* Juin 2015

N°9 - *Outre-mer.* Décembre 2015

N°10 - *Marines d'ailleurs.* Juin 2016

Hors série - *Ambition navale au XXI^e siècle.* Octobre 2016

N°11 - *Littoral.* Décembre 2016

Hors série - *La mer dans l'Histoire.* Mars 2017



LES PUBLICATIONS DU CESM

Centre de réflexion stratégique, le CESM diffuse cinq publications régulières sur la stratégie navale et les principaux enjeux maritimes.

Études marines

Cette revue est une plongée au cœur du monde maritime. Qu'elle fasse intervenir des auteurs reconnus sur des questions transversales ou qu'elle approfondisse un thème d'actualité, elle offre un éclairage nouveau sur la géopolitique des océans, la stratégie navale et plus généralement sur le fait maritime.

Cargo Marine

Disponible sur le portail internet du CESM, les études de fond réalisées par le pôle Études et les articles rédigés par ses partenaires offrent un point précis sur des problématiques navales et maritimes.

Brèves Marines

Diffusée par mail, cette publication offre chaque mois un point de vue à la fois concis et argumenté sur une thématique maritime d'actualité. Elle apporte un éclairage synthétique sur des thèmes historiques, géopolitiques et maritimes.

Les @mers du CESM

Cette revue de veille bihebdomadaire, également diffusée par mail, compile les dernières actualités concernant le domaine naval et maritime. Elle permet à ceux qui le désirent d'être tenus informés des récents événements maritimes.

Ces publications sont disponibles en ligne à l'adresse suivante:
cesm.marine.defense.gouv.fr

ISSN 2119-775X

Dépôt légal juin 2017
Achevé d'imprimer au 2^e trimestre 2017
Impression EDIACA Saint-Étienne
Réalisation Marie-Laure Jouanno