

— ÉTUDES MARINES —

ÉNERGIES

N°16 – Juin 2019

Centre d'études stratégiques de la Marine

— ÉTUDES MARINES —

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

Directeur de la publication

Capitaine de vaisseau Yves Postec

Rédacteurs en chef

Cyrille P. Coutansais

Enseigne de vaisseau Hélène Dupuis

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 —

ÉNERGIES

N°16 – Juin 2019
Centre d'études stratégiques de la Marine

SOMMAIRE

PRÉFACE

Capitaine de vaisseau Yves Postec 6

« La transition énergétique suppose de prendre en compte l'ensemble des paramètres... »

Entretien avec Arnaud Leroy 8

La mer, milieu clef du domaine énergétique

Dr. Nicolas Mazzucchi 16

Le gaz naturel liquéfié, une composante maritime essentielle de la géopolitique des hydrocarbures

Capitaine de vaisseau (RC) Jérôme Ferrier 30

Les énergies marines renouvelables, porteuses d'une ambition énergétique et industrielle pour la France

Anne Georgelin 40

« La demande en électricité ne cessera de croître... »

Entretien avec Philippe Sauquet

54

Énergies renouvelables : l'enjeu des ressources minérales

Patrice Christmann

62

Dépendance énergétique : développement et protection des flux stratégiques maritimes

Capitaine de frégate Franck Maire

80

« Le bateau-atelier, un retour aux sources »

Entretien avec Titouan Lamazou

90

PRÉFACE

Capitaine de vaisseau Yves POSTEC

Directeur du Centre d'études stratégiques de la Marine

Si la puissance de l'océan, de ses vagues, de ses courants a toujours fasciné les hommes, l'exploitation de cette énergie s'est longtemps fait attendre. Pendant des siècles, des millénaires même, les navires ont utilisé les vents, les courants pour parcourir les différentes mers du globe, quelques moulins à marée ont essaimé le long du littoral dès l'Antiquité, et c'est à cela que se résumait le lien entre mer et énergie.

La bascule a commencé à s'opérer au crépuscule du XIX^e siècle avec l'apparition en 1896 de la toute première installation pétrolière *offshore*, près de la côte, en Californie. Il faudra cependant attendre près d'un demi-siècle et 1947 pour voir les techniques évoluer et permettre l'installation d'une plate-forme au large, à 15 nautiques des côtes des États-Unis. On fore alors à quelques mètres de profondeur, très loin de l'ultra-profond – 3 000 mètres de nos jours – mais le mouvement est lancé et ne s'arrêtera plus, au point que l'écrasante majorité des découvertes et des nouvelles exploitations d'hydrocarbures conventionnels a désormais lieu dans les espaces maritimes.

Mais au-delà du pétrole, la mer est aujourd'hui le véritable miroir de la transition énergétique en cours. On y exploite bien sûr de plus en plus le gaz, substitut précieux au charbon pour produire de l'électricité plus propre, en particulier dans de nombreux pays émergents. Sous sa forme liquéfiée (GNL), il permet de varier les sources d'approvisionnement et son transit par voie maritime, qui connaît un essor sans précédent, aide à s'affranchir de certains aléas géopolitiques. Ce qui ne veut pas dire que les tensions liées au gaz disparaissent, bien au contraire : chaque découverte de nouveaux gisements entraîne son lot de contestations ; on le voit aujourd'hui en Méditerranée orientale.

Longtemps unique au monde, l'usine marémotrice de la Rance, construite dans les années 1960, a fait une émule en Corée du Sud. Elle annonçait la révolution des énergies marines renouvelables (EMR) dont le développement accéléré se joue désormais en pleine mer, comme en témoignent les champs d'éoliennes, nés au Danemark en 1991, qui se répandent désormais dans le monde entier, portés par une production de l'électricité au prix du marché, sans subvention.

La transition énergétique est donc à l'œuvre, le mix énergétique se diversifie mais les vulnérabilités demeurent. Ainsi, dans le nouveau paysage énergétique marin, les forces navales auront de plus en plus un rôle à jouer, qu'il s'agisse de protéger les ressources et les flux, de faire valoir le droit ou d'assurer face aux menaces la sécurité des équipes et l'intégrité des installations de production.

« La transition énergétique
suppose de prendre en compte
l'ensemble des paramètres... »

Entretien avec Arnaud LEROY

*Président du conseil d'administration de l'Agence de l'environnement
et de la maîtrise de l'énergie (ADEME)*

Études Marines: À lire les rapports annuels de l'Agence internationale de l'énergie, on a le sentiment que le tournant des énergies renouvelables est en train d'être pris. Est-ce une vraie tendance de fond?

Arnaud Leroy: Plus que les chiffres de croissance des énergies renouvelables, je crois que l'élément marquant est l'effondrement des coûts. Le photovoltaïque, l'éolien – en mer comme à terre – produisent aujourd'hui une électricité au prix du marché, ce qui est une vraie révolution. Le prix est un élément décisif dans les équations énergétiques: il y a aujourd'hui toute une série de solutions matures technologiquement, mais que l'on ne développe pas car elles ne sont pas économiquement viables. Or le vrai élément déterminant est quand même le coût pour les collectivités. Cette révolution concernant le prix est due à des rendements en très forte hausse – pour l'éolien en mer, les turbines délivraient 450 kW en 1991, nous en sommes aujourd'hui à 9,5 MW – et à des innovations multiples. Si vous prenez le photovoltaïque, nous arrivons aujourd'hui à des films très légers qui épousent les formes, et par conséquent offrent la possibilité d'équiper des structures un peu plus anciennes. Nous avons aussi des tuiles qui ne se différencient quasiment pas des tuiles ordinaires et permettraient, pour peu que les bâtiments de France soient un tout petit peu plus souples, d'intervenir intelligemment sur une partie du patrimoine historique. Nous avons donc des solutions compétitives en matière d'énergies renouvelables, mais il faut cependant se garder d'une vision un peu radicale en pensant que nous allons passer au tout renouvelable en un claquement de doigts. La transition énergétique suppose en effet de prendre en compte l'ensemble des paramètres – changement climatique, impact économique, social, géopolitique –, ce qui rend les choses extrêmement complexes.

Prenez l'exemple du charbon, qui est le sujet prioritaire aujourd'hui car extrêmement polluant et le plus fortement émetteur de gaz à effet de serre: sa suppression n'est pas si simple. Tout d'abord parce qu'il demeure, malgré tout, la source d'énergie la plus développée et performante économiquement, ce qui explique au passage son niveau toujours très élevé dans le mix énergétique mondial. Et s'en passer a des effets induits non négligeables, dans le domaine économique comme dans le domaine social ou géopolitique. Si vous prenez l'Australie, le charbon représente son premier poste à l'export et, si l'on tire le fil du maritime, on prend conscience que l'ensemble de la marine marchande subira les conséquences de son arrêt, les vauquiers au premier chef. La Pologne, de son côté, le voit comme un moyen de ne pas dépendre du gaz russe, un vecteur de souveraineté, mais aussi comme un secteur économique à part entière, avec des milliers d'emplois à la clef. On parle là de plusieurs dizaines de milliers de mineurs,

très localisés dans des territoires qui, dans leurs structures, correspondent à peu de choses près à nos anciennes régions minières du Nord et de l'Est. Et, compte tenu de notre expérience française, on sait très exactement ce qu'il ne faut pas faire, à savoir arrêter la production d'un coup, sans accompagnement des territoires, des hommes, avec pour résultat un chômage de très longue durée, parfois de génération en génération, et des régions en déshérence. Nous avons du recul désormais. Tout le monde, à des degrés divers, est donc confronté à certaines difficultés dans ce passage à un nouveau mix énergétique, même si tout le monde est convaincu, pour différentes raisons, qu'il est nécessaire.

Vu de l'extérieur, il semble pourtant que l'unanimité n'est pas de mise en ce domaine, l'Accord de Paris est contesté...

Il faut en réalité distinguer deux choses : l'Accord de Paris, qui est un peu notre boussole, qui nous indique la direction, l'objectif à atteindre en matière de réduction de gaz à effet de serre, et le mix énergétique. Et de ce point de vue, tout le monde a intérêt à pouvoir compter sur une palette de solutions équilibrée afin de réduire ses fragilités. Si, comme en France, vous êtes sur une électricité provenant à 75 % de l'énergie nucléaire, vous êtes à la merci de difficultés sur une centrale ou sur votre approvisionnement en uranium qui est, on l'oublie trop souvent, massivement importé. Sans compter les coûts, par exemple le démantèlement de notre parc dans les années à venir ou encore le stockage des déchets, qui vont peser sur nos budgets de façon non négligeable. De la même façon, le tout charbon de la Chine a rendu ses villes irrespirables et la pousse aujourd'hui à diversifier son mix énergétique à travers des renouvelables, du nucléaire, du gaz. Et le prix, là encore, est un facteur essentiel : Donald Trump a beau sortir de l'Accord de Paris, mettre en avant le charbon, que se passe-t-il en réalité aux États-Unis ? « *King Coal* » est sur le déclin, remplacé par un gaz de schiste beaucoup plus compétitif, même si ses impacts sur l'environnement sont majeurs, ou encore l'éolien dans certains États hier charbonniers.

Comparée aux États-Unis, la France ne dispose pas de la même palette de solutions...

Détrompez-vous : nous pouvons compter sur toute une gamme de solutions, mais que nous avons trop longtemps ignorées. Nous soutenons par exemple la filière du gaz vert, ce qui, au passage, n'est pas négligeable en matière de souveraineté : cela permet de s'affranchir en partie d'approvisionnements extérieurs, russes ou autres...

Et là, nous avons des gisements, notamment dans les résidus agricoles. Il y a certes aujourd'hui un surcoût, qui tient en partie au raccordement au réseau, à sa prise en charge financière, mais aussi une question de production, qui doit être stable, pérenne. Nous faisons en sorte d'aider la filière à se structurer et je suis convaincu que demain vous ne verrez pas de différence en termes de motorisation entre du gaz vert ou du gaz naturel pour le transport de produits lourds. Nous sommes aussi en train de travailler sur son adaptation à des péniches, à certains navires.

De manière générale, il faut que l'on prenne conscience que la biomasse peut être un gisement très intéressant pour notre pays, et notamment pour nos outre-mer, dont l'électricité est pour le moment essentiellement issue de génératrices diesel ou fioul. Entre parenthèses, cette évolution est à prendre là aussi dans sa globalité : fermer la porte à l'importation de ces carburants va entraîner des recettes fiscales en baisse – octroi de mer, etc. –, il faudra trouver des compensations. Toujours est-il que ces territoires ont une obligation et un horizon : être autonomes énergétiquement en 2030. C'est dans ce cadre que nous travaillons autour de la biomasse, sur une valorisation des déchets de coco à Wallis par exemple, sur celle de la bagasse, issue de la canne à sucre, dans les Antilles. Nous conduisons aussi tout un travail autour de l'isolation. Les économies d'énergie, et plus globalement l'efficacité énergétique, sont un sujet absolument fondamental.

Travaillez-vous aussi autour de la chaleur « fatale », celle qui est perdue par les usines, les incinérateurs ?

Oui, c'est un grand chantier, très lié à l'économie circulaire, l'écologie industrielle. La chaleur perdue aujourd'hui par les usines et les incinérateurs en France équivaut à l'énergie de six réacteurs nucléaires et ne fera que s'accroître avec l'expansion des *data centers*. Le développement de nouveaux usages numériques, le *streaming* par exemple, a un impact sur la bande passante, donc sur la consommation, considérable. Ce n'est d'ailleurs pas un hasard si les GAFAM mettent en avant leur démarche tendant à une énergie 100 % verte : ils sont tout à fait conscients qu'ils sont dans un des domaines les plus énergivores de nos jours, quand beaucoup d'autres secteurs sont engagés dans une tendance baissière. Et puis il y a les impacts à l'autre bout de la chaîne, les désastres écologiques liés à l'accès aux terres rares, aux mines, le travail forcé. Ce secteur ne se résume pas simplement à Steve Jobs dans son garage qui invente le *Mac*, il est marqué aussi par un coût social, environnemental trop longtemps sous-estimé. Pour en revenir à l'insertion des *data centers* dans leur environnement, à l'écologie industrielle, nous en sommes

au tout début de l'histoire. Il existe quelques projets pilotes en région, la chaleur dégagée par certaines unités va être dirigée vers des logements, des piscines, mais cela demeure, à ce stade, assez anecdotique. C'est un domaine que nous avons identifié au sein de l'Agence, nous avons mis une petite équipe dessus et je serai en mesure de vous en parler un peu plus longuement dans quelque temps. Un autre point à avoir en tête sur cette question est l'alimentation en énergie, notamment en énergie renouvelable, les *data centers* se prêtant par exemple très bien à l'installation de panneaux photovoltaïques.

Une des grandes problématiques liées aux énergies renouvelables est la question du stockage, de l'intermittence de ces solutions ; pensez-vous que ce soit un domaine dans lequel il y aura des avancées à moyen terme ?

C'est bien entendu un point important mais, du point de vue de l'ADEME, un faux sujet car nous avons aujourd'hui la chance de disposer d'un réseau électrique qui a la capacité technique d'absorber ces intermittences, des interconnexions qui permettent de stopper la production électrique et sa consommation, bref d'un réseau flexible. D'autant plus flexible que nous avons la chance de pouvoir compter sur un pilotage européen de l'ensemble des réseaux des États membres, d'un marché de l'électricité déjà très coordonné. Toutes nos analyses montrent que nous aurons de vrais besoins de stockage aux alentours de 2030, soit quasiment dix ans d'innovation devant nous, en sachant que, dans certains domaines, nous avons déjà des bases extrêmement solides. Prenez l'hydrogène par exemple : qui aurait imaginé, il y a encore dix ans, qu'une flotte de taxis, celle de *Hype*, fonctionnerait sur ce modèle en plein Paris ? Qui aurait imaginé encore que l'on verrait en Allemagne, en Basse-Saxe, le *Coradia iLint* d'*Alstom* ? Voilà tout de même une motrice qui peut parcourir 1 000 kilomètres avec un plein en émettant uniquement de la vapeur d'eau ! Je suis convaincu que nous aurons des évolutions majeures dans tout le secteur de l'énergie si, du moins, nous sommes en capacité de nous associer à d'autres pays, dans le cadre européen notamment. Car si le réseau est bien coordonné au niveau communautaire, reste à faire naître une Union européenne de l'énergie, c'est-à-dire une capacité à construire de manière coordonnée les solutions de production d'énergie. On a vu les difficultés que cela a pu poser avec la décision unilatérale allemande de quitter le nucléaire sans consulter personne et on le constate encore avec le choix de Berlin du gazoduc *Nord Stream 2* qui pose problème à certains États membres du fait d'une trop grande dépendance gazière vis-à-vis de la Russie. Il y a donc encore des points sur lesquels avancer mais, quand on regarde la question du stockage, on peut se dire que l'initiative franco-allemande

à laquelle s'est ralliée la Pologne, dans le secteur de la batterie va plutôt dans le bon sens. Une industrie européenne en ce domaine, par-delà son intérêt économique, peut en effet permettre de développer des batteries moins gourmandes en métaux rares, ce qui est un vrai sujet, stratégique comme environnemental.

En matière de métaux, vous intéressez-vous aux ressources minérales marines?

Cela fait partie de l'équation, mais plus que la question du stock disponible, ce qui nous intéresse est la question de la gestion des ressources avec, là encore, un facteur prix incontournable. De ce point de vue, les nodules polymétalliques et autres amas sulfurés partent de loin : il s'agit dans un premier temps de disposer d'une cartographie précise, qui permette de cerner le volume et la profondeur à laquelle se situent ces ressources, de développer en parallèle les outils techniques aptes à aller les chercher, autant d'éléments qui permettront de définir un coût d'exploitation. Nous sommes plus avancés dans le domaine du recyclage, même si nous butons sur le facteur prix : collecter les différents produits finis qui contiennent des métaux rares, puis les valoriser, demeure aujourd'hui beaucoup plus cher que d'aller chercher des matières vierges. Les progrès techniques ou technologiques nous permettront certainement de progresser mais, pour le moment, nous nous efforçons de dresser un inventaire des différents gisements – aussi bien au sujet de leur localisation que du type de métal – en France. À terre comme en mer.

Concernant la mer justement, vous avez été la cheville ouvrière de la loi «économie bleue» du 20 juin 2016. Quel bilan en tirez-vous à ce stade?

Déjà, elle existe ! Vous savez, cette loi est née au départ d'un énième rapport qui m'avait été commandé sur le sujet et dont je ne voulais pas qu'il connaisse le même destin que 90 % de ses congénères : finir dans un placard. J'ai eu la chance de pouvoir compter sur une bonne entente transpartisane : avec Didier Mandelli, rapporteur au Sénat, nous sommes parvenus à bâtir un ensemble cohérent par lequel nous avons touché aussi bien la gouvernance stratégique, avec le rôle du Secrétariat général de la mer, que celle des ports ou la problématique de l'emploi maritime. Nous nous sommes efforcés aussi de combler des lacunes juridiques, à l'image du statut ou de la mise en œuvre des drones. C'était un exercice intéressant aussi du point de vue de la fabrique de la loi : j'ai passé ma dernière année de mandat à m'assurer que les décrets sortent et que ces décrets s'inscrivent dans la même logique que la loi. Trois ans après, je pense que le bilan est positif,

notamment sur l'approche qui a consisté à doper notre compétitivité par rapport à nos partenaires européens et non par rapport à des pavillons vis-à-vis desquels nous ne serons jamais compétitifs. Et je crois que l'enjeu pour les années à venir est là : il ne faut pas que cette loi demeure un point d'arrivée, il faut la remettre sur le métier, la reprendre sans cesse pour continuer à la mettre en accord avec nos partenaires et concurrents européens, ne pas prendre de retard.

Cet enjeu maritime, vous efforcez-vous de le porter au sein de l'ADEME ?

Nous sommes bien entendu présents dans le secteur maritime, mais nous n'avons pas vocation à devenir une agence de la mer : notre rôle est de mettre des outils au service des professionnels, qui doivent ensuite s'en saisir. Aujourd'hui, nous avons trois axes principaux : la mobilité, la question des déchets et les énergies marines renouvelables. La mobilité est un axe important, car il s'insère aussi dans le plan *France logistique 2025* qui vise, à cette date, à faire entrer notre pays dans le top 5 mondial quand nous sommes aujourd'hui au 18^e rang, ce qui est un léger problème pour un pays de transit... Or nous avons des atouts, notamment de l'espace dans nos ports qui peut nous permettre de déployer des solutions énergétiques intéressantes tout en travaillant sur la décarbonation du secteur, qui est un enjeu important. Un exemple parmi d'autres est le navire à hydrogène dont le test intéresse certains territoires comme la Bretagne. La question des déchets est pour nous un enjeu important, à la fois dans la phase d'embarquement – comment faire en sorte de charger moins de plastique à bord par exemple – mais surtout dans celle de débarquement. C'est une question qui se pose avec de plus en plus d'acuité à mesure que la France accueille un nombre croissant de navires de croisière. Ce type de bâtiments va générer à Bordeaux ou à Marseille une quantité impressionnante de déchets qu'il va falloir traiter, valoriser. C'est ici toute la problématique de l'écologie industrielle territoriale qui vise la valorisation des déchets à l'échelle d'un territoire et, de ce point de vue, nous commençons à avoir de bons retours d'expérience, notamment à La Rochelle. Je n'oublie pas, bien entendu, l'enjeu important des déchets marins, qui est avant tout une problématique de déchets terrestres partis en mer. Le CIMer nous a chargés d'une mission sur le sujet des déchets plastiques dans l'océan, visant notamment à agir avec les ONG actives en la matière pour recueillir des données scientifiques et participer à la question de l'éducation, à la diffusion de bonnes pratiques. Enfin, il y a le sujet des énergies marines renouvelables et, si nous avons raté le cap de la création d'une filière industrielle dans les éoliennes posées, je compte bien ne pas le rater pour celle des éoliennes flottantes. En ce domaine, l'ADEME est – pour le compte de l'État – financeur et partenaire de l'ensemble des quatre projets pilotes déployés

le long de nos côtes *via* les programmes d'investissements d'avenir. Paradoxalement, le plus compliqué pour les EMR n'est pas tellement de réunir les financements ou de trouver les industriels, mais de convaincre que ce secteur est important. C'est l'éternel problème de notre pays, ce problème culturel qui fait que nous ne pensons pas naturellement « maritime ».

On dit souvent que la France est une puissance maritime qui s'ignore... D'où vient ce paradoxe selon vous ?

Je crois qu'il y a une question autour des élites. C'est un peu comme le mix énergétique : il faut une variété de profils, de visions. C'est très frappant au niveau des ports, je trouve. Autant dans certaines parties du pays on respire la mer, autant dans d'autres, y compris où l'on trouve des ports historiques, vous ne la sentez pas. Sauf pour le folklore. Il y a sans doute une question autour de la gouvernance des ports ; peut-être faudrait-il une plus grande variété de profils, des gens plus ancrés dans leur territoire, ainsi qu'une plus grande permanence dans les équipes. Anvers fonctionne sur ce modèle-là, et plutôt bien si on regarde les chiffres... Il y a aussi des choses à imaginer pour toucher le grand public, refaire un *Thalassa* en prise avec notre époque, évoquer l'emploi dans le maritime par exemple. Cela compte beaucoup pour éveiller les esprits à la mer. Je ne suis pas certain, par exemple, que je me serais autant intéressé à ces questions s'il n'y avait eu les *Fiches Cousteau* dans ma tendre enfance !

C'est donc par ce biais que vous êtes venu à la mer ?

Par ce biais et par les ports. Mon père était transporteur et je l'accompagnais souvent sur les quais voir les cargos, les premiers porte-conteneurs. Mon imaginaire maritime s'est construit là, dans les ports. Et puis j'ai fait de la plongée, du surf, et la question de la protection des océans s'est imposée à moi. Le droit maritime m'a intéressé et s'est révélé un très bon outil, très agile, pour agir en ce domaine. Tout comme le droit de la mer d'ailleurs. J'ai intégré l'Agence européenne de sécurité maritime (EMSA) – je me suis aperçu au passage que c'était une structure complètement désertée par les Français, ce qui est un vrai problème – pour m'occuper du département environnement, puis il y a eu l'Assemblée, la loi économie bleue et aujourd'hui l'ADEME, où je poursuis mon sillage maritime...

Propos recueillis par l'EV2 Camille Morel et Cyrille P. Coutansais

La mer, milieu clef du domaine énergétique

Dr. Nicolas MAZZUCCHI*

Chargé de recherches à la Fondation pour la recherche stratégique (FRS)

* Nicolas Mazzucchi est l'auteur d'*Énergie, ressources, technologies et enjeux de pouvoir*, Armand Colin, 2017.

Les enjeux énergétiques sont centraux pour toutes les sociétés humaines. Celles-ci se positionnent différemment par rapport aux trois grandes composantes que sont l'accès à l'énergie, la sécurité énergétique et la lutte contre le changement climatique, mais elles ont en commun le besoin impérieux d'un accès continu à des approvisionnements leur permettant d'alimenter leur économie et leurs citoyens. L'énergie est avant tout une chaîne complexe d'éléments, depuis la découverte et l'extraction des ressources jusqu'à leur transformation et consommation, en passant par le transport. Dans la plupart de ces maillons de la chaîne de valeur, la place du domaine maritime – comme zone de ressources ou milieu pour le transport – ne cesse de croître depuis une trentaine d'années. La mondialisation, qui a surtout été une maritimisation, passe, dans le cas de l'énergie, de plus en plus par la mer. Les transformations géoéconomiques du monde, fortement perceptibles au travers du prisme énergétique, laissent également entrevoir une évolution des lieux et infrastructures maritimes dédiées à la production ou au transport de produits énergétiques. Des plates-formes pétrolières et gazières *offshore* qui se multiplient dans les mers et océans, créant parfois des tensions internationales, aux grands complexes portuaires d'exportation et d'importation, la géographie de l'énergie dans le domaine marin est en pleine évolution. Enfin, outre les changements qui s'opèrent vis-à-vis des ressources traditionnelles, les nouvelles technologies énergétiques ont également un versant maritime qui tend à se développer.

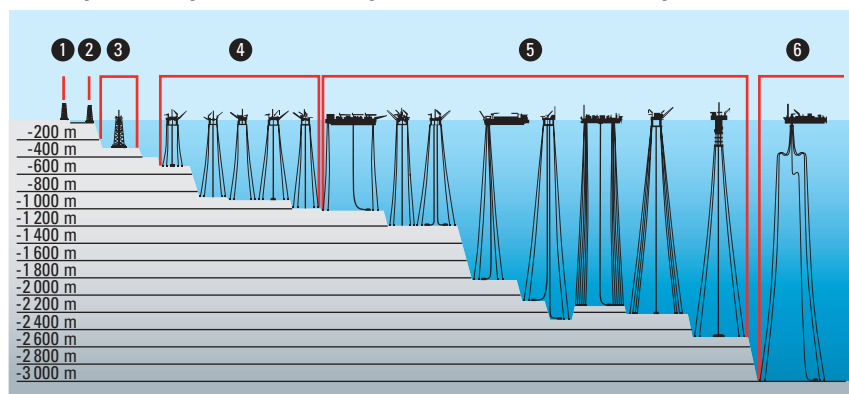
Ressources *offshore*, le grand développement

La grande histoire du pétrole et du gaz a commencé à terre il y a maintenant plus d'un siècle et demi. Toutefois, la tendance dominante en matière de ressources, depuis au moins une trentaine d'années, est à l'explosion des exploitations d'hydrocarbures dans le domaine maritime. L'épuisement progressif des ressources les plus simples d'exploitation, principalement terrestres conventionnelles, pousse depuis les années 1980-1990 les *supermajors* pétrolières, ainsi que les autres entreprises du secteur, à se tourner toujours davantage vers le domaine maritime¹. À l'heure actuelle, s'agissant des hydrocarbures conventionnels, l'écrasante majorité des découvertes et des nouvelles exploitations a lieu dans le domaine maritime, ce qui pousse à la mise en valeur ainsi qu'à l'intérêt renouvelé pour celui-ci dans de nombreux pays. L'hypothèse de présence de gaz ou de pétrole transforme ainsi

1. C'est avant tout à la suite du premier choc pétrolier – confirmé par le second – que les entreprises pétrolières occidentales ont fait le choix du développement *offshore* pour réduire la dépendance aux pays du Golfe, d'abord dans le golfe du Mexique, puis en mer du Nord et en Afrique de l'Ouest.

l'appréhension des façades maritimes qui sont maintenant vues, comme c'est le cas au Mozambique par exemple, comme une source de richesses. Ces découvertes induisent également le développement de nouvelles orientations stratégiques vers la mer. C'est le cas au Brésil, où la présence d'hydrocarbures en *offshore* profond dans les bassins de Santos et de Campos – dont l'importance pourrait transformer le rôle du Brésil au sein des producteurs de pétrole – a eu un effet domino sur plusieurs secteurs, à commencer par celui de la défense. Les découvertes du milieu des années 2000 ont ainsi abouti, au moment du Livre blanc sur la défense de 2012, à l'introduction de la problématique de la protection des ressources en hydrocarbures comme mission d'importance pour la marine brésilienne. Les

Historique de l'exploration et de la production *offshore* en eaux profondes



- ❶ **1896** — première installation *offshore* aux États-Unis en bord de côte (Californie)
- ❷ **1947** — première plate-forme installée au large (29 km) aux États-Unis : 6 mètres de profondeur
- ❸ **Années 1960-1970** — premiers développements réels de l'*offshore* (plates-formes fixes) : 200-300 mètres de profondeur
- ❹ **Années 1980-1990** — vrais développements en masse à la suite des chocs pétroliers : 500-1 000 mètres de profondeur
1982 — création de la compagnie pétrolière chinoise CNOOC, première entité spécifiquement dédiée à la production *offshore*
- ❺ **Fin des années 1990** — accélération technologique et nouveaux types de navires de forage pour les eaux très profondes (systèmes semi-fixes, SPAR, etc.) : 2 500 mètres de profondeur
- ❻ **Milieu des années 2000 à aujourd'hui** — exploration-production en eaux ultra-profondes (FPSO) : 3 000 mètres de profondeur

contrats de contrôle satellitaire des espaces maritimes (SisGAAz) et de sous-marins de nouvelle génération à propulsion nucléaire (Prosub) se comprennent ainsi dans cette optique de protection des richesses pétrolières. Cette course aux ressources marines est également poussée par l'évolution des technologies de forage ultra-profond. Une bonne part de l'évolution pétrolière actuelle du Brésil est ainsi due à la possibilité d'employer des techniques permettant d'extraire du pétrole à plusieurs milliers de mètres. Cette situation induit également, en corollaire, un éloignement toujours plus grand des côtes et des exploitations qui se trouvent parfois en lisière de zone économique exclusive (ZEE), voire en zone de plateau continental étendu, ouvrant la porte à des contestations sur la propriété des ressources.

Les tensions géopolitiques qui naissent avec les découvertes d'hydrocarbures se multiplient également. Au-delà des exemples très connus de l'Arctique, où les fluctuations géopolitiques suivent la montée des cours du pétrole, et de mer de Chine méridionale, la Méditerranée orientale est un cas intéressant, cristallisant nombre d'enjeux. La principale question touche à la reconnaissance des États les uns par les autres et aux droits que ceux-ci possèdent quant à l'exploitation maritime. En effet, la non-reconnaissance des frontières s'applique également parfois au domaine maritime, comme c'est le cas entre Israël et le Liban ou, plus épineux, pour la République turque de Chypre du Nord. Toutefois, ces disputes territoriales n'avaient qu'un retentissement mineur avant le milieu des années 2000. L'exemple d'Israël – et dans une moindre mesure de l'Égypte – sert depuis de phare aux autres États de la région. Pays historiquement dépendant des approvisionnements en hydrocarbures de ses voisins, Israël, après les découvertes des gisements gaziers de *Mari-B*, *Tamar* et surtout *Leviathan* dans le bassin Levantin, présente maintenant le profil d'un futur exportateur important de gaz. Après la découverte du champ de *Zohr*, en Égypte, en 2015 et celle du champ d'*Aphrodite*, à Chypre, en 2011, le bassin Levantin a confirmé ses potentialités en matière de ressources gazières. De fait, la plupart des États de Méditerranée orientale ont mis en place des procédures d'appels d'offres pour des blocs d'exploration. À Chypre par exemple, où une bonne partie des *supermajors* (*Total*, *ENI*, *ExxonMobil*, etc.) s'active maintenant avec des succès intéressants ; le dernier a eu lieu en mars 2019 dans le Bloc 10, où *ExxonMobil* a annoncé avoir fait une découverte majeure. Toutefois, ces campagnes d'exploration-production sont également des prétextes géopolitiques pour raviver les tensions entre acteurs locaux. L'interception par la marine turque, en février 2018, du navire *Saipem 12000*, affrété par *ENI* pour explorer le Bloc 3 de Chypre, a relancé la rivalité entre Chypre et la Turquie, cette dernière réclamant une partie de la ZEE chypriote au titre de la République turque de Chypre du Nord.

Enjeux économiques et sécuritaires de la production de gaz naturel en Méditerranée orientale

Depuis 2009, l'activité d'exploration d'hydrocarbures *offshore* en Méditerranée orientale a permis la découverte de plusieurs gisements de gaz naturel et de nouvelles campagnes d'exploration sont en cours. La mise en production dépend en revanche de la rentabilité financière attendue, et notamment des possibilités de transporter le gaz vers des marchés de consommation attractifs.

Les relations entre les différents pays impliqués au niveau de la production et du transport (Égypte, Israël, potentiellement Chypre, Liban, Turquie et Grèce) posent des défis au parfait développement de cette filière.

Rappels historiques

Les premiers succès significatifs de l'exploration d'hydrocarbures *offshore* en Méditerranée orientale se sont produits entre 2009 et 2011, avec trois découvertes importantes : les champs *Tamar* et *Leviathan*, au large d'Israël, et *Aphrodite*, au large de la côte sud de Chypre, dans la zone économique exclusive (ZEE) de la République de Chypre (RC)¹.

Est venu ensuite, en 2015, *Zohr*, le champ gazier géant au large des côtes de l'Égypte, considéré comme le plus important jamais découvert en Méditerranée, avec des réserves estimées à 850 milliards de m³. Il a fait l'objet d'une mise en service très rapide, dès la fin de 2017. D'autres gisements ont été mis au jour, au large de l'Égypte, dans les zones dénommées *West Nile Delta* et *Greater Nooros*.

En 2018, de nouvelles explorations ont été couronnées de succès au large de la côte sud de Chypre, dans le Bloc 6 (*Calypso-1*) et dans le Bloc 10 (*Glauco-1*), dont les réserves sont en cours d'évaluation.

2018 a également marqué l'entrée en jeu du Liban, avec la signature de deux accords d'exploration et de production entre Beyrouth et un consortium international. Un deuxième *round* d'attribution de licences d'exploration et de production d'hydrocarbures *offshore* est prévu en 2019.

1. Sauf indication contraire, le mot « Chypre » dans cet encadré fait référence au nom de l'île et à la République de Chypre (RC), non reconnue par la Turquie. La République turque de Chypre du Nord, qui est seulement reconnue par la Turquie, est mentionnée comme RTCN.

Enjeux économiques

Les découvertes n'ont de sens que si les réserves sont ensuite converties en capacités de production, elles-mêmes dépendantes du prix du gaz, de la disponibilité d'options d'exportation et de moyens de transport, ainsi que de la stabilité de l'environnement réglementaire, fiscal et politique des pays. En prenant en compte ces divers aspects, les enjeux économiques pour les trois pays principaux (Égypte, Israël et Chypre) diffèrent significativement.

L'Égypte bénéficiait d'une situation d'indépendance énergétique jusqu'à la fin de la première décennie du XXI^e siècle et pouvait même exporter du gaz grâce à deux usines de liquéfaction, situées à Idku et Damiette, ainsi qu'aux gazoducs la reliant à Israël (*East Mediterranean Gas* - EMG) et à la Jordanie (*Arab Gas Pipeline*). Par la suite, la réduction de la production et l'augmentation de la demande domestique l'ont rendue importatrice nette. La découverte de *Zohr* en 2015 a été donc accueillie très positivement et le lancement rapide du développement du champ a été rendu possible par l'existence d'une forte demande intérieure. La production de *Zohr* est l'un des facteurs principaux de la reprise économique du pays, avec une croissance du PIB réel pour l'année 2018 de 5,3 % selon les estimations de la Banque mondiale. Le Caire devrait recommencer à exporter du gaz de façon régulière en 2019, en utilisant l'infrastructure existante des terminaux de liquéfaction. Le pays aspire aussi à devenir un *hub gazier*, en centralisant des flux destinés à l'exportation en provenance d'Israël et de Chypre.

En Israël, le potentiel des différents champs dépasse la consommation locale. L'accès à des marchés étrangers est donc une condition nécessaire au plein développement de la production. Des accords ont été signés avec l'Autorité palestinienne et la Jordanie, mais ils rencontrent l'opposition des opinions publiques locales. La possibilité d'exporter du gaz d'Israël vers l'Égypte pour satisfaire la demande locale et/ou pour exporter le gaz vers les marchés internationaux à travers les terminaux GNL paraît plus prometteuse, en particulier depuis l'acquisition en 2018 d'une participation dans le capital du gazoduc EMG par l'entreprise *Noble Energy*, principale actionnaire du consortium qui gère le champ *Leviathan*.

Pour Chypre, du fait du faible potentiel de la demande domestique, l'existence de marchés d'exportation est une condition nécessaire pour la mise en production des découvertes gazières. Différentes hypothèses ont été étudiées :
/...

- la construction d'un gazoduc vers l'Égypte dans le but d'utiliser les usines de liquéfaction pour réexporter le gaz vers les marchés internationaux sous forme de GNL. Ce projet a fait l'objet de plusieurs déclarations politiques, mais il se heurte au développement de la production égyptienne qui réduira la disponibilité d'utilisation des installations de GNL ;

- la construction d'une usine de liquéfaction a également été envisagée. Soit sous la forme d'un terminal *onshore*, construit sur la côte sud de Chypre, soit *via* une installation flottante (*Floating LNG*). Si transformer le gaz en GNL permet d'avoir accès au marché mondial, avec des cargaisons allant vers l'Europe, l'Asie ou l'Amérique du Sud, la faisabilité de cette option est actuellement rendue difficile par les coûts de construction élevés et par la surcapacité actuelle sur le marché du GNL ;

- le projet *Eastern Mediterranean Natural Gas Pipeline* (Israël-Chypre-Grèce-Italie), qui prévoit quant à lui de relier Israël et Chypre aux marchés européens, a été approuvé par la Commission européenne comme un projet d'intérêt commun, ce qui le rend ouvert à un financement de l'Union. Cependant, un tel projet est coûteux, techniquement difficile et pourrait causer de sérieux problèmes politiques avec la Turquie en raison de différends sur la délimitation maritime.

Enjeux sécuritaires

L'exploitation et l'exportation des ressources gazières en Méditerranée orientale présentent de nombreux enjeux sécuritaires liés aux relations politiques instables entre les pays de la région et aux risques d'actions terroristes.

La localisation de certains champs pourrait réanimer des disputes pré-existantes au sujet de la délimitation des frontières maritimes et des zones économiques exclusives (ZEE), notamment concernant la frontière maritime entre le Liban et Israël, qui n'a jamais été agréée officiellement. Des différends ne sont pas à exclure non plus au sujet de la délimitation des structures géologiques des gisements de gaz – notamment lorsqu'elles se situent près des limites des ZEE, puisqu'elles pourraient alors les chevaucher. Il est intéressant de noter que le champ *Zohr* se trouve dans la ZEE égyptienne, à seulement quelques milles de la ZEE de Chypre, et qu'*Aphrodite* est situé dans la ZEE de Chypre et se prolonge légèrement dans les eaux israéliennes. Dans le cas de réservoirs à cheval entre

différentes ZEE, il faudrait envisager une exploitation conjointe du champ, mais des tensions entre les pays concernés sont aussi à attendre.

Un cas particulièrement complexe concerne la Turquie, la République de Chypre (RC) et la République turque de Chypre du Nord (RTCN). Outre la question des délimitations maritimes illustrée par l'épisode de février 2018 qui a vu le navire de forage *Saipem 12000*, affrété pour effectuer des travaux sur le Bloc 3, au sud-est de l'île, être bloqué par un navire militaire turc et finalement contraint de quitter la zone, Ankara s'oppose plus généralement à toute activité de recherche et de production tant qu'aucun accord entre la RC et la RTCN n'est trouvé. La Turquie et la RTCN estiment que les éventuels revenus dérivant de la production d'hydrocarbures devraient être partagés entre toute la population de l'île de Chypre, ce qui implique une résolution du conflit entre la RC et la RTCN.

La situation d'Israël est aussi particulière. Les conflits persistants entre Israël et ses voisins – état de guerre formel avec le Liban, antagonisme avec le Hezbollah, tensions avec les Palestiniens, instabilité en Syrie – exposent les installations gazières à des risques d'attaques militaires ou terroristes. Ces mêmes risques d'attaques terroristes pèsent aussi sur les installations énergétiques en Égypte, pays qui connaît de façon régulière des actions menées par des groupes islamistes, présents notamment dans le Sinaï (région par laquelle transite le gazoduc EMG).

De manière générale, la prolifération de plates-formes d'extraction, de *pipelines*, de navires, voire de terminaux méthaniers implique une multiplication de cibles sensibles et des besoins de surveillance croissants. En Israël, par exemple, les champs de production sont situés dans des zones relativement proches des côtes. Ainsi, le champ *Tamar* est situé à 56 milles à l'ouest d'Haïfa et le champ *Leviathan* à 80 milles, près de la frontière avec le Liban. Le gaz de *Tamar* est transporté par *pipeline* jusqu'à Ashkelon, à quelques kilomètres de la frontière avec Gaza. Toutes ces installations industrielles sont donc exposées au risque d'attaques terroristes ou militaires de l'extérieur. Les risques de sabotage et de frappe militaire ou terroriste représentent ainsi de nouveaux défis pour les appareils de sécurité des différents pays, en particulier pour les forces navales.

/...

Conclusion

La découverte et l'exploitation d'hydrocarbures seront un élément important de l'avenir des pays de la Méditerranée orientale. Ils pourront agir comme facteurs de coopération régionale tout comme alimenter des affrontements et ajouter des frictions à une région déjà volatile.

Dans ce cadre, l'UE a tout intérêt à promouvoir toutes les formes possibles de coopération régionale et à défendre son intérêt d'un point de vue énergétique, économique, comme politique. En ce qui concerne l'énergie, le gaz de la Méditerranée orientale peut renforcer sa sécurité et la diversification de l'offre pour un certain nombre d'États membres, en particulier dans l'Europe du Sud-Est et l'Europe centrale – des régions qui dépendent aujourd'hui presque exclusivement du gaz russe. Économiquement, les compagnies européennes sont les plus actives dans l'exploration et la production dans la région (notamment l'italienne *ENI*, la française *Total* et l'anglo-néerlandaise *Shell*) et il serait légitime de défendre leurs intérêts en cas de nécessité. Enfin, du point de vue politique, la République de Chypre est membre de l'Union européenne et la mise en valeur de ses réserves gazières représenterait un puissant atout de développement.

Luca Baccarini

Chercheur associé à l'IRIS

Le transit maritime, l'enjeu présent et futur pour l'Europe

Au-delà des ressources en hydrocarbures, le principal enjeu du domaine maritime dans ce secteur demeure le transport. Le grand écart géographique entre les principales régions de production (golfe Arabo-Persique, golfe de Guinée, etc.) et celles de consommation – dont l'Europe, très faiblement dotée en ressources à l'exception de certains pays comme la Norvège – impose une vision à la fois globale et réticulaire des enjeux du transport maritime de l'énergie. Depuis les années 1960, le pétrole brut a été au cœur de cette question du transit, mais il est en passe d'être détrôné par deux autres éléments : les produits pétroliers et le gaz naturel. Concernant les produits pétroliers, il s'agit avant tout de la conséquence d'une évolution géoéconomique mondiale qui voit la fermeture des capacités de raffinage les plus anciennes – dans les pays européens en particulier – et l'ouverture de nouvelles raffineries dans les pays émergents ou producteurs de brut. Cette situation, qui crée une nouvelle forme de dépendance européenne, est également le fruit d'une stratégie qui vise à externaliser la pollution vers d'autres pays, la seule trace tangible en Europe demeurant le trafic pétrolier associé.

Le développement extrêmement rapide du gaz naturel liquéfié (GNL) est la principale manifestation de cette place toujours plus grande de la mer dans le transit de produits énergétiques. La multiplication des navires et terminaux induit une croissance exponentielle des volumes transportés par mer. En 2010, le marché du transport gazier international s'établissait à 70 % pour les gazoducs et 30 % pour le GNL ; en 2017 la balance affichait 65 % et 35 %, les volumes transportés par GNL étant passés en 7 ans de 300 à 400 milliards de m³. Les prix s'en sont d'ailleurs ressentis puisque l'écart se resserre, doucement mais sûrement, entre le gaz transporté par tube et celui par bateau, avec à la clef des contrats GNL dont les durées augmentent. Cette situation induit un changement progressif mais crucial du marché du gaz naturel liquéfié. Alors que jusqu'au milieu des années 2010 il était difficilement possible de parler d'un marché mondial du GNL puisque celui-ci était découpé en trois grandes plaques de consommation (Amérique, Europe, Asie), il tend, avec la hausse des volumes, des navires et des terminaux, à ne plus former qu'une seule plaque mondiale. Les prévisions de l'Agence internationale de l'énergie sur le futur du transport gazier sont ainsi presque exclusivement, à l'exception de la Chine, tournées vers des capacités GNL.

Cette situation induit également des bouleversements dans la géopolitique industrielle. La construction navale spécialisée dans le domaine énergétique (pétroliers, chimiquiers, méthaniers) laisse apparaître en effet un oligopole assez net

en Asie du Nord. Le Japon puis la Corée du Sud, maintenant rejoints par la Chine qui tend à prendre la place de premier constructeur mondial, réalisent plus des trois-quarts des constructions de ces navires spécialisés. Sans les chantiers navals extrême-orientaux, l'explosion du trafic maritime de gaz naturel ne serait tout simplement pas possible. Il y a donc une forme de prépondérance technologique de la part des pays asiatiques, qui se retrouve d'ailleurs globalement dans la construction navale.

Cette situation, notamment la place de la Chine, manifeste également une forme de stratégie nationale. Les pays d'Asie du Nord, forcés de recourir toujours davantage aux approvisionnements par la mer, que ce soit pour des raisons de géographie ou d'importance de la demande – le plus souvent les deux combinés –, ont fait le choix d'être à la pointe industrielle de ce nouveau marché. Outre les moyens de transport dédiés, les terminaux de liquéfaction dans les pays d'exportation et de regazéification dans les zones de consommation se multiplient. Il y a là aussi un double effet : celui, d'une part, de contrer le déterminisme de la géographie puisque nombre de pays exportateurs sont relativement éloignés des régions de consommation (Australie, Nigeria, Qatar, Mozambique, etc.) et, d'autre part, la volonté des exportateurs et des importateurs d'être en mesure d'acheter ou de vendre à plusieurs partenaires. La diversification, qui est une des clefs majeures de la sécurité énergétique, est ici matérialisée par ce choix du gaz liquéfié qui permet d'acheter indifféremment aux uns ou aux autres. En conséquence, un continent comme l'Europe, aux prises avec l'équation délicate de la sécurité énergétique, a fait le choix depuis de nombreuses années de multiplier les terminaux maritimes pétroliers puis gaziers. La géographie du GNL européen – dans et hors de l'UE – est particulièrement éclairante puisqu'elle fait apparaître tant les besoins que les volontés de chacun des États. Par exemple, la multiplication des terminaux de regazéification dans les pays baltes est à la fois un marqueur de leur volonté de s'affranchir de la Russie à laquelle ils sont reliés depuis l'époque de l'URSS, mais également une manifestation de leur volonté nationale farouche. En effet, alors qu'il serait économiquement plus intéressant, eu égard aux tailles de marchés, de mutualiser un terminal pour l'ensemble des pays baltes, chacun d'entre eux – sans compter la Pologne – a fait le choix de disposer de son infrastructure nationale, pour des coûts finalement très élevés. De la même manière, sur le flanc méridional, la compétition entre acteurs nationaux amène à une multiplication des infrastructures (Grèce, Italie, Croatie) y compris hors du territoire de l'UE (Turquie).

Dans ce contexte, les grands producteurs de gaz disposant d'une façade maritime voient dans les appétits européens pour le GNL des opportunités nouvelles.

Au-delà des traditionnels exportateurs par voie maritime comme le Qatar, d'autres se tournent vers cette solution (Nigeria, Russie). Le grand acteur de cette nouvelle donne gazière maritime pourrait toutefois bien être l'oncle Sam. Avec le bouleversement causé par les hydrocarbures non-conventionnels, les États-Unis sont devenus en quelques années des exportateurs potentiels de gaz et voient dans l'Europe un débouché naturel. Il y a bien entendu des raisons économiques à cela, mais également un fond géopolitique, puisque du côté de Washington, on pousse au resserrement des liens transatlantiques de sécurité énergétique, notamment au travers de l'OTAN. La déclaration finale du Sommet de Varsovie, en 2016, fait explicitement référence à cette question (point 135).

L'énergie demain : encore un rôle central pour le domaine marin

Le futur du rapport entre la mer et l'énergie, s'il est fait d'hydrocarbures, est également à rechercher du côté des énergies vertes... ou plutôt bleues. Alors que les renouvelables ont jusqu'ici majoritairement été développés à terre, c'est vers la mer qu'il faut se tourner pour lever certaines barrières technologiques. La première d'entre elles, lorsqu'on s'intéresse à l'éolien, tient à la puissance. Si celle des turbines *onshore* est fortement limitée – aux alentours de 2 MW pour la majorité d'entre elles – les projets *offshore* rivalisent de gigantisme, jusqu'à 20 MW pour les plus ambitieux ; *General Electric* a annoncé pour 2021 une turbine de 12 MW, puissance déjà très importante. Cette puissance permettrait donc de disposer de parcs éoliens *offshore* plus puissants ou plus compacts à l'avenir. Néanmoins certaines questions demeurent ouvertes, l'installation en mer ne résolvant pas tous les problèmes tels que la sécurité physique – des installations elles-mêmes et des câbles qui les relient à terre – ainsi que la cybersécurité de ces infrastructures, par exemple.

Ces problématiques présentes pour l'éolien en mer le sont tout autant pour les autres énergies marines renouvelables (EMR) qui connaissent toutefois un décollage plus difficile. Alors que le marémoteur avait été un succès en France avec l'usine de la Rance dans les années 1960, celui-ci a été abandonné². À l'exception de certains territoires particuliers comme l'Écosse, où *Scottish Power* développe des projets d'ampleur dans l'hydrolien, les autres EMR (hydrolien, osmotique, houlomoteur, etc.) semblent connaître des évolutions lentes, loin des promesses des dernières années. En France, la fin du soutien financier de l'État aux filières

2. Il faut attendre l'usine coréenne de Sihwa, en 2011, pour qu'une installation marémotrice détrône la Rance en termes de puissance (250 MW contre 240).

marines renouvelables a provoqué la disparition de certaines entités comme ce fut le cas pour la branche « renouvelables » de *Naval Group*. Le développement erratique des EMR ne doit néanmoins pas occulter leur potentiel. Celui-ci est bien réel et relativement bien distribué sur toute la planète.

L'énergie dans le domaine maritime, c'est aussi la propulsion des navires et, de ce point de vue, l'avenir offre également des changements d'importance. Les évolutions internationales, notamment en ce qui concerne l'Annexe VI de la convention MARPOL, poussent ainsi les régulateurs nationaux et les constructeurs de navires à faire évoluer les méthodes de propulsion. Trois voies s'offrent dès lors – au-delà de la propulsion électrique sans hydrocarbures – pour répondre aux nouveaux standards : d'une part les carburants pétroliers et d'autre part le GNL, puis les biocarburants. Les réglementations de l'Organisation maritime internationale sur les carburants maritimes qui vont entrer en vigueur en 2020 prévoient ainsi une baisse très importante du taux maximal d'émissions de soufre de 3,5 à 0,5 %. L'importance de ce changement oblige les constructeurs à prévoir dès maintenant de nouveaux modes de propulsion, soit en ajoutant des dispositifs d'épuration aux moteurs actuels, soit en changeant de paradigme. Les biocarburants – à base de cellulose notamment – au pouvoir énergétique bien plus limité, sont en l'état peu intéressants. Le GNL, utilisé dans la propulsion des méthaniers, offre quant à lui bien plus d'avantages. Au niveau de l'équilibre émissions de gaz à effet de serre/pouvoir énergétique, son bilan est des plus satisfaisants. Toutefois, au-delà des problèmes de sécurité inhérents au GNL, il faudrait que suffisamment d'infrastructures de rechargement soient disponibles dans le monde. Or, avec la concentration des terminaux GNL dans l'hémisphère Nord, il faudrait un développement rapide de ceux de l'hémisphère Sud pour faire face à la demande. Une fracture énergétique Nord-Sud risque ainsi d'apparaître dans le domaine maritime avec la multiplication pour certains trajets de navires peu polluants dans les zones où les approvisionnements en GNL sont immédiatement disponibles³.

La mer est ainsi un territoire présent comme d'avenir pour l'énergie. Alors que pendant le XIX^e et la plus grande partie du XX^e siècle le domaine maritime n'avait été, pour l'essentiel, qu'un lieu de transit des hydrocarbures du point d'extraction vers celui de consommation, la mer s'est affirmée depuis près de quarante ans comme le nouveau terrain de la géo-économie mondiale. La course aux ressources,

3. Les zones à émissions contrôlées prévues par la convention MARPOL se trouvent pour l'instant uniquement dans l'hémisphère Nord (Baltique, mer du Nord, Caraïbes et côte atlantique de l'Amérique du Nord).

due en partie à l'appétit des nouvelles puissances émergentes, se fait maintenant bien plus en mer qu'à terre. Toutefois, celle-ci n'est pas sans entraîner des tensions, tant la propriété des ressources maritimes semble être plus complexe que celle des zones terrestres. Les ZEE n'étant pas juridiquement l'équivalent des frontières terrestres et leur mécanisme d'attribution se fondant sur la reconnaissance mutuelle et la concorde, elles offrent une plus grande porosité aux contestations en tous genres, au risque parfois de dégénérer en problème sécuritaire voire militaire. Il en va de même des installations liées aux énergies renouvelables en mer qui pourraient, selon l'importance de leur développement, comme ce devrait par exemple être le cas au Royaume-Uni⁴, représenter des vulnérabilités importantes pour les pays d'accueil. En effet, avec une puissance installée respectable, les fermes éoliennes *offshore* pourraient être des cibles de choix pour des agresseurs désireux de créer une panique par rupture du système électrique.

Le transit maritime quant à lui ne cesse de croître, surtout dans le domaine gazier. La prophétie portée par l'Agence internationale de l'énergie à la fin des années 2000 d'un *Golden age of gas* semble en passe de devenir une réalité. L'évolution rapide du secteur du GNL, avec une multiplication aussi bien des terminaux que des navires, tend à renforcer les distances de transport tout en faisant baisser les prix. Une croissance rapide du trafic maritime gazier, si elle est une opportunité en matière de sécurité énergétique, est également une aubaine pour les pays qui maîtrisent les technologies liées, en particulier dans la construction navale.

Au milieu de tout cela, les forces navales des États seront sans doute de plus en plus mises à contribution pour la protection – contre tous types d'adversaires – à la fois des infrastructures et des routes. Alors que, jusqu'ici, le rôle des marines était avant tout centré sur le contrôle des voies d'approvisionnement, celui-ci s'élargit à la protection de points fixes ou semi-fixes (éoliennes, plates-formes *offshore*, etc.). Les forces navales font donc maintenant face au défi de l'intermittence et de la permanence, avec en outre une multiplication des points à défendre. L'accroissement de l'importance de la mer dans le domaine énergétique, si elle est une perspective intéressante du point de vue économique, est également un défi sécuritaire.

4. Le pays a ainsi fait le pari de l'éolien *offshore* pour sa transition avec une augmentation de 175 % de la part de celui-ci dans la production électrique nationale entre 2012 et 2018. L'objectif annoncé est de 30 GW d'éolien *offshore* de capacités au sein du mix électrique britannique, représentant 30 % de la production électrique en 2030.

Le gaz naturel liquéfié, une composante maritime essentielle de la géopolitique des hydrocarbures

Capitaine de vaisseau (RC) Jérôme FERRIER

Président d'honneur de l'Union internationale de l'industrie du gaz

Le gaz naturel présente l'énorme avantage de réduire les émissions de CO₂ de moitié par rapport au charbon et de n'émettre ni soufre ni particules. C'est le complément logique aux énergies renouvelables, par nature intermittentes. Il constitue donc la clef du succès de la transition énergétique vers une économie décarbonée.

Le gaz naturel liquéfié (GNL) est une facilité de transport du gaz par voie maritime longtemps réservée aux pays géographiquement isolés et devenue avec le temps un outil géopolitique sur la scène énergétique mondiale. La part du GNL sur le marché international du gaz naturel n'a cessé de croître ces dernières années pour représenter à ce jour 30 % du commerce international du gaz naturel, 70 % étant transportés par gazoducs. Les développements gaziers actuels en Australie, en Sibérie, en Papouasie-Nouvelle-Guinée ou en Méditerranée orientale appellent à s'interroger sur la redistribution des équilibres énergétiques avec l'apparition de ces nouveaux acteurs.

Historique du GNL

La fabrication du froid date du XIX^e siècle. Le gaz y a joué un rôle important, notamment dans la cryogénie. La liquéfaction du gaz naturel a été mise au point pour faciliter son transport et sa distribution en réduisant son volume dans une proportion de 1 à 600 (1 m³ de GNL = 600 m³ de gaz à la pression atmosphérique) rendant ainsi plus aisée, *via* le transport maritime, l'exportation depuis les pays producteurs géographiquement isolés.

Le commerce du gaz naturel liquéfié a commencé dans les années 1960 avec le gaz algérien en provenance du champ d'*Hassi Rmel*, au centre du Sahara, liquéfié dans l'usine d'Arzew, à proximité d'Oran. Le GNL produit était expédié vers les premiers terminaux européens construits au Havre (1965), à Barcelone (1969), à Panaglia près de La Spezia (1971) et à Fos Tonkin près de Marseille (1972). Le nombre d'acteurs dans le GNL n'a, depuis, cessé de croître et les trois principaux pays exportateurs sont aujourd'hui le Qatar, l'Australie et la Malaisie, l'Algérie n'apparaissant qu'à la 7^e place. À l'autre extrémité de la chaîne, les trois premiers pays importateurs de GNL sont le Japon, la Chine et la Corée du Sud, l'Europe ne se plaçant qu'en 4^e position.

En 2018, il existait 84 trains de liquéfaction répartis sur 31 sites, 470 méthaniers et 140 terminaux méthaniers, dont 27 en Europe. Sur le seul site du Qatar,

premier producteur mondial, 14 trains de liquéfaction ont été successivement construits, chacun constituant une installation industrielle à part entière. La flotte des méthaniers est, elle, en forte augmentation avec 65 navires attendus en 2019, dont les premiers méthaniers brise-glaces pour le projet *Yamal*, en Sibérie. Aujourd'hui, la très grande majorité des méthaniers à construire sont commandés dans les chantiers navals sud-coréens, même si les chantiers navals français furent précurseurs avec la construction des premiers navires de ce type dans les chantiers de l'Atlantique en 1972, de la Ciotat en 1975 et de Dunkerque en 1977.

La forte composante géopolitique du GNL

Le GNL a apporté une composante de souplesse au marché du gaz que les traditionnels gazoducs ne pouvaient pas offrir, en raison du lien physique entre un fournisseur et un client qui pouvaient tous deux être qualifiés de captifs. La Russie par exemple ne pourrait pas s'affranchir de ses exportations vers l'Europe compte tenu des revenus associés et de l'absence d'alternative crédible, quand l'Europe de son côté ne pourrait pas se passer des importations de gaz russe qui représentent environ 30 % de l'ensemble de ses besoins, malgré d'importants efforts de diversification des ressources de gaz et de GNL importées. Les protagonistes n'ont donc d'autre alternative que de se mettre d'accord.

En rompant ce lien rigide entre production et consommation, le GNL constitue désormais un élément essentiel de la sécurité d'approvisionnement pour les pays consommateurs, tout comme de la sécurité des débouchés pour les producteurs. La liberté de destination du produit qu'offre le transport maritime favorise l'arbitrage des marchés et constitue un recours en situation d'urgence, comme nous avons pu le constater lors de la catastrophe de Fukushima en 2011 et la livraison en urgence de cargaisons de GNL additionnelles pour se substituer à la fourniture des centrales nucléaires. Cette souplesse permettra, comme pour le pétrole, l'émergence de marchés régionaux, puis à terme prévisible, d'un grand marché mondial comparable au pétrole brut.

Le GNL algérien et l'Europe

Au début des années 1990, le GNL algérien a fait l'objet des mêmes débats que ceux auxquels nous assistons aujourd'hui à l'égard du gaz russe. Alors que la tension politique était forte entre l'Algérie et les pays d'Europe du Sud,

notamment la France et l'Italie, principaux destinataires à cette époque du gaz algérien, les responsables politiques de ces pays s'interrogeaient pour savoir s'il était raisonnable de dépendre autant d'un État qui représentait à l'époque près de 40 % de leurs approvisionnements. Force est de constater que les contrats ont été scrupuleusement respectés par l'ensemble des parties et qu'une diversification des schémas de transport à partir de l'Algérie a pu même se concrétiser par de nouveaux gazoducs, comme le *Maghreb-Europe*, mis en service en 1996, qui transporte le gaz depuis le gisement d'*Hassi Rmel* jusqu'en Espagne *via* le Maroc et à travers la Méditerranée, en complément cette fois des livraisons de GNL.

Aujourd'hui, l'Algérie ne représente plus que 10 % des approvisionnements français malgré les efforts de la *Sonatrach* pour maintenir le niveau de production de ses gisements et prolonger ses contrats d'exportation, mais les besoins domestiques en Algérie sont tels, notamment pour la génération électrique, que la part des exportations y est en diminution constante.

L'impact du GNL américain

Les États-Unis sont les premiers consommateurs de gaz dans le monde. La baisse des réserves et de la capacité de production nord-américaine a laissé penser, à la fin des années 1990, que Washington redeviendrait importateur de GNL au début des années 2000, comme il l'avait été pendant une courte période au début des années 1980. Les grands opérateurs se sont alors lancés dans la construction de terminaux méthaniers, notamment au Texas, à proximité du *Henry Hub*, qui est le point d'équilibre des réseaux de gazoducs américains et où se détermine le prix de référence international applicable à l'ensemble des marchés gaziers nord-américains.

Le développement des gaz de schiste américains, rendu possible par les prix à la hausse du pétrole et du gaz, a renversé en cinq ans l'utilisation de ces terminaux de regazéification en usines de liquéfaction exportatrices de GNL. La première cargaison de GNL a ainsi pu être exportée à destination du Brésil à partir du terminal de *Sabine Pass*, en Louisiane, en février 2016. D'autres cargaisons ont suivi à destination de l'Amérique du Sud, notamment vers l'Argentine, pour des raisons liées à la proximité géographique, mais aussi à la volonté des États-Unis de reprendre une position stratégique sur la partie méridionale de leur continent après avoir longtemps dépendu du pétrole vénézuélien en complément du pétrole saoudien.

Pour que les États-Unis deviennent, comme ils l'ambitionnent, le troisième exportateur mondial de GNL derrière le Qatar et l'Australie, cela suppose deux conditions : que les prix du gaz se maintiennent à un niveau élevé pour rentabiliser la production de gaz de schiste américaine et que les besoins domestiques demeurent en progression raisonnable, car leur satisfaction demeurera prioritaire sur les exportations. En effet, une part importante de la génération électrique et du développement industriel se fait désormais dans ce pays à partir du gaz naturel qui a contribué à réduire significativement la consommation de charbon et, de façon induite, les émissions polluantes.

L'influence grandissante de la Chine

La consommation de gaz naturel était marginale en Chine au début des années 2000. Les émissions polluantes issues des centrales à charbon étant devenues insupportables pour les habitants des grandes cités, les autorités ont décidé de substituer progressivement le gaz au charbon pour la génération d'électricité. Ils se sont orientés à la fois vers des approvisionnements terrestres par gazoducs en provenance notamment de Russie, du Turkménistan et d'Iran, mais aussi des approvisionnements par GNL, et une douzaine de terminaux de regazéification ont été construits en quelques années sur les côtes chinoises.

Aujourd'hui, le marché chinois du GNL, devenu rapidement le second derrière le Japon et devant la Corée du Sud, concentre tous les espoirs d'un développement soutenu et durable et deviendra à terme son premier débouché.

Les approvisionnements gaziers en provenance de Russie suscitent un débat à Bruxelles

La Russie détiendrait les premières réserves mondiales de gaz naturel devant l'Iran, le Turkménistan et le Qatar. Elle est aussi la seconde en matière de consommation derrière les États-Unis. Depuis le début des années 1980, Moscou approvisionne l'Europe, dont il est devenu le premier fournisseur à hauteur de 30 %, devant la Norvège, 25 %. Certains pays européens sont dépendants à 100 % des livraisons russes : c'est le cas de la Hongrie, de la République tchèque ou de la Slovaquie. D'autres, comme l'Italie ou l'Allemagne, ont une assez forte dépendance avec respectivement 38 % et 30 % de gaz russe.

Dans l'entrelacs des axes gaziers



Sources : Commission européenne ; US Department of Energy.

Pendant près de quarante ans, ces approvisionnements se sont faits par gazoducs jusqu'aux frontières de l'ex-URSS. L'indépendance des ex-pays soviétiques vis-à-vis de la Russie a fait apparaître un rôle clef pour deux États de transit : l'Ukraine et la Biélorussie. Si celle-ci ne présente pas de difficulté particulière, il n'en est pas de même avec l'Ukraine, où les tensions politiques se sont répercutées sur les contrats de transit et leur application. Un désaccord sur les conditions de transit aura même entraîné deux courtes interruptions en 2009 et 2014, suivies d'un rétablissement en quelques jours sous la pression de l'Union européenne.

Afin de diversifier les routes de transit du gaz, la Russie a construit *Nord Stream* (NS1), conduite sous-marine mise en service en 2012 reliant directement la région de Saint-Petersbourg à Greifswald, en Allemagne, d'une capacité de 55 Gm³/an (soit 10 % des approvisionnements européens). Puis elle s'est lancée dans la construction de *South Stream* qui doit relier directement, sous la mer Noire, la Russie à la Bulgarie. Un différend entre la Commission européenne et la Russie sur les conditions de transit à travers la Bulgarie, pays où *Gazprom* est l'actionnaire principal des infrastructures, aboutit à l'interruption des négociations et à la décision de rediriger le gazoduc vers la Turquie, en le rebaptisant *Turk Stream*. Le débat porte aujourd'hui sur le projet russe de doubler *Nord Stream* (NS2) en rajoutant une capacité de 55 Gm³/an, capacité dont l'UE affirme qu'elle n'aurait pas besoin à court terme pour satisfaire la demande européenne.

La réalité est que NS2 menacerait le maintien à terme du transit à travers l'Ukraine en favorisant son contournement, ce qui pourrait avoir des conséquences graves sur les approvisionnements de ce pays. L'UE craint en effet, dans l'hypothèse d'un désaccord contractuel entre l'Ukraine et la Russie, de devoir livrer les quantités russes défaillantes pour assurer la continuité de fourniture, notamment en hiver. Diversifier à la fois les sources et les routes d'approvisionnement pour les fournitures de gaz est une bonne politique, sous réserve de respecter les règles contractuelles et de ne pas déstabiliser les acteurs historiques.

La Russie, consciente de l'importance grandissante du marché du GNL, a décidé ces dernières années, avec l'aide des sociétés occidentales, d'augmenter la part du GNL dans ses exportations. C'est ainsi qu'elle a développé le projet GNL sur l'île de Sakhaline, en mer du Japon, avec le soutien de *Shell*, et, en Sibérie, le projet *Yamal*, sur la péninsule du même nom, au bord de la mer de Kara, avec le concours de *Total*. Pour développer ce gigantesque projet, plusieurs défis technologiques ont dû être surmontés : il a fallu se doter de capacités d'exploitation par des températures pouvant atteindre -50 °C, forer 80 000 puits dans le permafrost

pour soutenir les installations industrielles et construire des méthaniers brise-glaces pour l'évacuation du GNL produit. La destination des cargaisons étant le marché asiatique, ces méthaniers peuvent emprunter la route Nord durant la période de l'année où la glace n'excède pas deux mètres de profondeur, et la route Sud, *via* l'Europe, le reste de l'année. La route Nord présente l'avantage de réduire de moitié la durée du parcours (15 jours au lieu de 30 pour la route Sud).

La Russie, contrainte jusqu'ici d'exporter son gaz naturel vers l'Europe par gazoducs, s'offre désormais, avec le GNL, l'opportunité de futurs arbitrages de nature à diversifier son marché à l'export et à lui donner un atout supplémentaire dans les négociations relatives à l'exportation de gaz par canalisation.

Les découvertes gazières en Méditerranée orientale ouvrent de nouvelles perspectives

La Méditerranée est restée longtemps à l'écart des grandes découvertes pétrolières et gazières *offshore*. L'Égypte exploitait bien quelques gisements à proximité de son littoral, mais rien de significatif. C'est du côté d'Israël que les premières découvertes importantes sont intervenues en 2009 avec les gisements de *Tamar* (180 Gm³), mis en production en 2013, puis de *Leviathan*, découvert en 2010 (500 Gm³), dont la production devrait démarrer en 2019. Ces deux gisements se situent respectivement à 90 et 130 km au large de Haïfa. Les réserves gazières excédant largement ses seuls besoins domestiques, Israël a signé avec l'Égypte un premier contrat d'exportation.

En Égypte, c'est le champ géant de *Zohr*, au large d'Alexandrie, qui a été considéré comme la plus importante découverte de l'année 2015, avec des réserves estimées à près de 850 Gm³. À Chypre, la découverte du gisement d'*Aphrodite* en 2011, dont les réserves pourraient être supérieures à 130 Gm³, a immédiatement soulevé de la part de la Turquie certaines revendications maritimes. Enfin, le Liban a octroyé en 2018 des licences d'exploration à un consortium emmené par *Total* et *ENI* pour un premier forage en 2019.

On voit là se constituer un portefeuille de réserves gazières dépassant largement les besoins propres des pays concernés. Deux options s'offriront aux acteurs de la région : exporter par des gazoducs en partie sous-marins puis terrestres, ou réaliser un projet *offshore* d'exportation directe du GNL par voie maritime. C'est le cas aujourd'hui de certains projets éloignés de la terre qui concentrent sur une même installation la totalité des facilités de production, de séparation, de stockage



Le méthanier *Gallina* se ravitaille auprès du FLNG *Prelude*. © Shell Australia.

et d'expédition du gaz naturel produit. Le projet géant que *Shell* vient de développer en Australie occidentale en est l'archétype. Il s'agit d'un FLNG (*Floating Liquefied Natural Gas*) positionné à 475 km au nord-ouest des côtes australiennes qui extrait et liquéfie en un même point le gaz naturel produit. La plate-forme mesure 488 m de long, 74 m de large, a un tirant d'air de 100 m et pèse jusqu'à 600 000 tonnes en stockage plein pour un coût de 6 milliards de dollars australiens. Les méthaniers peuvent ainsi charger directement le GNL depuis le FLNG, permettant à la plate-forme de s'affranchir de toute connexion terrestre.

Ce concept nouveau d'installation marine intégrée constitue le futur des productions gazières *offshore* et pourrait être une solution à la problématique apparue en Méditerranée orientale.

L'Iran et le Qatar : une suprématie qui se joue sur un gisement *offshore*

Le Qatar a développé sa richesse sur l'exploitation d'un gisement de gaz qui a la particularité de se trouver à cheval sur sa ZEE (*North Field*) et celle de l'Iran (*South Pars*). Il se trouve que cette production contribue depuis plus de vingt ans à asseoir la richesse du Qatar en faisant de ce pays le premier exportateur mondial de GNL. L'Iran, en raison des sanctions internationales qui pèsent sur lui, n'a pas commencé à exporter le gaz de *South Pars*. Faute d'*unitisation* de la structure, c'est-à-dire une répartition négociée des parts de chacun, le moment viendra où des phénomènes physico-chimiques dans les réservoirs pourraient déséquilibrer les productions respectives des deux gisements et entraîner de sérieuses tensions politiques. Il serait préférable qu'un accord entre les deux pays intervienne au préalable.

Le GNL carburant marin du futur

Jusqu'en 2010, les seuls navires utilisant le GNL comme carburant étaient les méthaniers. L'intérêt du GNL comme carburant généralisé à l'ensemble de la flotte est apparu suite à l'introduction de règles plus strictes sur les émissions d'oxydes de soufre et de particules imposées par l'Organisation maritime internationale.

Les armateurs ont rapidement mesuré les conséquences de ces nouvelles réglementations pour l'industrie et le commerce maritime. Les compagnies de ferrys d'abord, avec le ferry *Megastar* de la compagnie *Tallink* mis en service en 2017. La compagnie *Britanny Ferries* est la première en France à avoir fait construire le *Honfleur*, ferry au GNL mis en service en 2018 qui assure la liaison Ouistreham/Southampton. La compagnie de croisières *Carnival* de son côté a franchi le pas de la carburation au GNL avec le *Costa Smeralda*, opérationnel fin 2019, qui sera suivi par un paquebot supplémentaire chaque année sur les quatre prochaines années. *MSC* a, quant à elle, commandé quatre paquebots actuellement en construction aux *Chantiers l'Atlantique* qui seront opérationnels à partir de 2021. Enfin, la compagnie française *CMA-CGM* a passé commande de neuf porte-conteneurs de 22 000 EVP, le premier livrable fin 2019, pour assurer la liaison Shanghai/Rotterdam.

Conclusion

Le gaz naturel est connu depuis les Sumériens qui, trois mille ans avant notre ère, vénéraient les feux éternels émis par du gaz s'échappant de poches naturelles. Il a largement contribué à la révolution industrielle qui, au XIX^e siècle, a favorisé le développement des pays occidentaux. La génération d'électricité constitue aujourd'hui pour le gaz un débouché majeur qui permet aux pays grands consommateurs de charbon comme les États-Unis, la Chine ou l'Inde de maîtriser leurs émissions polluantes en réduisant la part du charbon au profit du gaz dans leur balance énergétique.

Mais c'est dans le domaine du transport, notamment maritime, que le GNL carburant, qui représente actuellement moins de 1 % de la consommation gazière, connaîtra une croissance très forte dans les prochaines années.

Il est heureux de constater que cette énergie ancestrale reste promise à un brillant avenir.

Les énergies marines renouvelables, porteuses d'une ambition énergétique et industrielle pour la France

Anne GEORGELIN

Responsable de filières Énergies marines renouvelables

Syndicat des énergies marines renouvelables

« Réfléchissez au mouvement des vagues, au flux et reflux, au va-et-vient des marées. Qu'est-ce que l'océan ? Une énorme force perdue. Comme la terre est bête ! Ne pas employer l'océan ! »

Victor Hugo, *Quatre-vingt-treize*, 1874.

L'indignation de Victor Hugo en témoigne, l'idée d'exploiter l'énergie des océans est ancienne. La force des vagues, des vents marins, des courants, des marées ou encore la variation des paramètres physico-chimiques de l'océan peuvent être utilisées comme sources d'énergie renouvelable pour répondre à nos besoins en électricité ou en production de froid. La France, notamment grâce à la géographie de son vaste espace maritime et à la richesse de ses savoir-faire industriels et portuaires, dispose d'un fort potentiel pour exploiter ces énergies. Pourtant, malgré une expérience de pionnier avec l'installation de l'usine marémotrice de la Rance il y a plus de cinquante ans et un grand nombre de brevets obtenus par des sociétés françaises dans le secteur de l'hydrolien, c'est ailleurs en Europe que le marché de l'éolien en mer s'est largement développé ces dernières années. Parmi la diversité des technologies d'énergies marines renouvelables (EMR) et leurs stades de maturité différenciés, notre pays peut trouver des atouts pour réussir sa transition énergétique et développer de nouvelles filières industrielles compétitives, porteuses d'emplois sur les territoires.

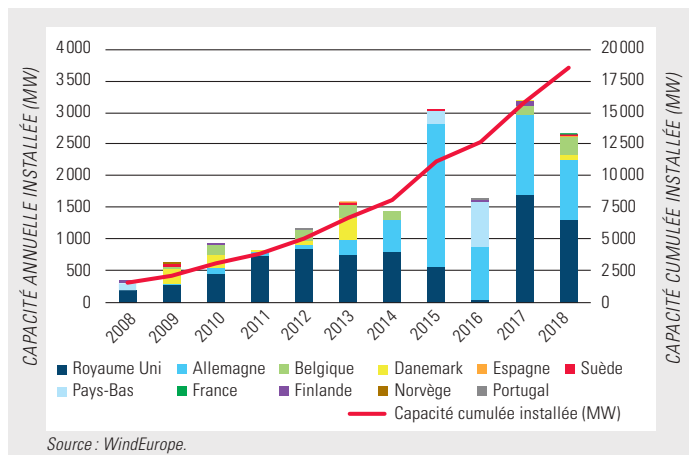
Panel des technologies d'énergies marines renouvelables

La filière des énergies marines renouvelables recouvre aujourd'hui une grande diversité de technologies utilisant les différentes forces et caractéristiques de la mer : l'éolien en mer, l'hydrolien, le houlomoteur, le marémoteur, l'énergie thermique des mers et l'énergie osmotique.

L'installation d'éoliennes en mer vise à transformer l'énergie cinétique des vents en mer, particulièrement forts et réguliers, en énergie mécanique, puis en électricité (grâce à des génératrices entraînées par le mouvement des pales, actionnées par le vent). Les éoliennes en mer fonctionnent comme les éoliennes à terre, mais sont fixées sur des fondations posées au sol (éolien en mer posé) ou installées sur des structures flottantes, faites de béton ou d'acier, ancrées aux fonds marins (éolien en mer flottant). Le choix entre ces différentes fondations, posées ou flottantes, dépend de la bathymétrie des sites ; quant à la vitesse de vent propice à l'installation des éoliennes en mer, une vitesse nominale de 7m/s (13,5 nœuds) est aujourd'hui considérée comme minimale. Avec plus de 4 500 éoliennes en mer installées ces

vingt-cinq dernières années, l'énergie éolienne en mer posée constitue actuellement la seule technologie d'énergie marine déjà parvenue en phase commerciale à l'échelle européenne. La technologie est éprouvée et peut être installée jusqu'à des profondeurs de 50 mètres environ, différents types de fondations (*jacket*, monopieu ou gravitaire) permettant d'adapter les structures à la nature du sol. L'éolien en mer flottant, une solution technique nouvelle, aujourd'hui déployée sur quelques sites de démonstration, permettra de produire de l'électricité plus loin des côtes, où la mer est beaucoup plus profonde (jusqu'à 350 mètres de fond) et les vents marins encore plus forts et plus stables. De nouveaux gisements, aujourd'hui inexploitable, pourront ainsi être utilisés, notamment en Méditerranée et dans l'Atlantique, en réduisant encore plus la visibilité de ces installations.

Capacité éolienne en mer installée par année et cumulée, fin 2018



L'énergie hydrolienne permet d'exploiter l'énergie cinétique contenue dans les courants associés au déplacement des masses d'eau qui accompagne le phénomène de marée. Leur fonctionnement est aussi simple que celui d'une éolienne : la force des courants marins actionne les pales d'une ou plusieurs hélices, l'énergie mécanique produite par la rotation des pales est transmise à un alternateur et ce dernier produit de l'énergie électrique acheminée par des câbles sous-marins jusqu'au rivage. La diversité des technologies hydroliennes existantes actuellement, qui peuvent être posées sur les fonds marins ou flottantes, permet aussi bien d'exploiter des courants marins particulièrement puissants (dont la vitesse peut s'élever jusqu'à 5 m/s) que l'énergie de sites moins énergétiques mais parfois plus simples d'accès, tels que dans les fleuves ou les estuaires. L'hydrolien présente le grand intérêt d'être

une énergie tout à fait prédictible, car l'intensité et le rythme des marées sont très largement prévisibles, et de pouvoir occuper peu d'espace, car du fait de la densité de l'eau, plus forte que celle de l'air, les machines peuvent être compactes. L'énergie hydrolienne peut également être exploitée dans les fleuves et les estuaires, avec des machines de plus petites dimensions et de moindre puissance qu'en milieu marin.

L'énergie marémotrice consiste à exploiter l'énergie potentielle de la marée en utilisant les différences de niveau entre haute et basse mer. Les variations périodiques du niveau de la mer sous l'effet de la marée sont donc particulièrement prédictibles. La première utilisation attestée en France de l'énergie marémotrice date du début du XII^e siècle: ainsi, l'usine marémotrice de la Rance, mise en service en 1967, a été installée sur un site qui avait déjà connu dans l'histoire de nombreux moulins à marée. À ce jour, quatre centrales sont en fonctionnement au monde: Sihwa, en Corée du Sud, avec 254 MW a détrôné l'usine française de la Rance (240 MW), vient ensuite Annapolis au Canada (20 MW) puis une usine de 5 MW et quelques installations de taille réduite en Chine. La technologie marémotrice est mature et maîtrisée; néanmoins, les sites propices à de telles activités sont rares et nécessitent de lourds investissements sur le territoire.

L'énergie houlomotrice est une forme concentrée de l'énergie du vent: en effet, lorsque celui-ci souffle sur la mer, des vagues se forment et transportent de l'énergie cinétique. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle flottant ou côtier, elles libèrent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique. Les technologies houlomotrices n'ont pas encore atteint un niveau de maturité comparable aux autres EMR, mais font l'objet d'importants travaux de R&D et de nombreux prototypes, sur la base de matériaux métalliques ou plus innovants. Globalement, les latitudes élevées sont mieux exposées et les côtes ouest européennes, comme le golfe de Gascogne, disposent d'un fort potentiel. Le potentiel énergétique est également fort à La Réunion, en Polynésie et en Nouvelle-Calédonie ainsi que localement en Martinique et en Guadeloupe. Dix fois plus forte en hiver qu'en été, l'énergie de la houle a l'avantage d'être en phase avec la demande électrique.

Développée par la France dans les années 1930 puis dans les années 1980, l'énergie thermique des mers (ETM) permet d'exploiter la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans: l'énergie est issue de l'échange thermique entre l'eau froide et l'eau chaude. Pour que le cycle de l'ETM fonctionne, il est nécessaire de disposer d'un différentiel d'au moins 20°C. L'ETM est donc une technique particulièrement adaptée à la zone intertropicale, où l'amplitude de températures est importante. Dans cette région, on peut en

effet passer de plus de 20°C en surface à 5°C ou moins au-delà de 1 000 mètres de profondeur. Cependant, l'énergie thermique des mers n'est pour l'instant économiquement exploitable qu'à une distance raisonnable des côtes habitées. L'ETM constitue ainsi une source d'énergie très adaptée aux régions insulaires qui présentent une demande énergétique importante couplée à un besoin en eau douce souvent non négligeable. À noter que la climatisation est aussi une application directe de l'énergie thermique des mers avec le système SWAC (*Sea Water Air Cooling*), en utilisant l'eau profonde froide directement comme réfrigérant pour des machines thermiques ou pour du conditionnement d'air, qui offre aujourd'hui une solution mature et compétitive de production de froid renouvelable pour équiper hôtels, bâtiments publics, hôpitaux, etc. D'autres usages sont également associés à l'ETM, tels que le dessalement d'eau de mer (un petit hybride ETM de 1 MW est capable de produire quelque 4 500 mètres cubes d'eau douce par jour, soit suffisamment pour couvrir les besoins d'une population de 20 000 personnes) et l'aquaculture, valorisant la richesse en éléments nutritifs de l'eau froide.

Moins connue et encore très peu mature, l'énergie osmotique permet d'exploiter la différence de salinité entre l'eau douce et l'eau de mer. Les deux natures d'eau étant séparées par une membrane semi-perméable, utiliser une hauteur d'eau ou une pression créée par la migration de molécules à travers ladite membrane génère un débit qui peut alors être turbiné pour produire de l'électricité.

Malgré des stades de maturité différents, le potentiel technique exploitable (PTE) des énergies marines renouvelables est immense :

ÉNERGIES MARINES : PTE MONDIAL DES 5 FILIÈRES STRATÉGIQUES				
PTE > 3 000 GW	PTE > 1 000 GW		PTE > 100 GW	
ÉOLIEN <i>OFFSHORE</i> FLOTTANT <i>vecteur énergétique vents marins</i> = 3 000 à 4 000 GW	ÉOLIEN <i>OFFSHORE</i> POSÉ <i>vecteur énergétique vents marins</i> = 1 000 à 1 500 GW	HOULOMOTEUR <i>vecteur énergétique houle et vagues</i> = 1 000 à 1 500 GW	HYDROLIEN <i>vecteur énergétique courants des marées</i> = 75 à 100 GW	ETM (Énergie thermique des mers) <i>vecteur énergétique différentiel de température fond/surface</i> = 100 à 150 GW
FILIÈRES À POTENTIEL MONDIALISÉ				TROPICALES (sans rupture technologique)
PTE EMR mondial = 20 000 TWh, soit l'équivalent de la consommation électrique mondiale actuelle				

Source : INDICTA.

Les EMR: atouts et solutions pour le mix énergétique français

La lutte contre le changement climatique, l'indépendance énergétique, la sécurité d'approvisionnement et la compétitivité des moyens de production d'électricité sont des enjeux majeurs pour notre société. Les énergies renouvelables constituent une réponse à ces enjeux et contribuent au développement d'une offre nationale de production d'électricité non émettrice de gaz à effet de serre. La loi de transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015 fixe l'objectif d'une part de 32 % d'énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie et 40 % de la production électrique en 2030.

La France est l'un des rares pays à bénéficier d'un potentiel de développement important pour chacune des sources énergies marines renouvelables. En complément des énergies renouvelables installées à terre (hydroélectricité, solaire photovoltaïque, éolien terrestre, etc.), les EMR constituent autant de solutions renouvelables pour atteindre nos objectifs de transition du mix énergétique français, grâce à leurs nombreux atouts, parmi lesquels :

- différents types d'application, comme la production d'électricité, le froid renouvelable ou le stockage d'énergie, offrant des opportunités pour la transition de l'ensemble de nos besoins énergétiques ;
- une courbe de production hautement prédictible ; le vent (et la houle) est par nature variable et peut fluctuer d'un jour à l'autre, mais la totalité de l'énergie produite par l'ensemble du parc éolien français peut être prévue grâce aux outils de prévisions météorologiques aujourd'hui particulièrement précis. Ses trois façades maritimes permettent à notre pays de bénéficier de plusieurs régimes de vent, offrant une bonne complémentarité des productions qui en sont issues. L'énergie provenant des phénomènes de marée (hydrolien, marémoteur) a l'avantage de pouvoir être prédite avec exactitude plusieurs années à l'avance ; quant à l'énergie thermique des mers, elle est disponible en permanence.

L'énergie éolienne en mer constitue une ressource énergétique continue, avec un taux de production élevé, grâce à la régularité des flux de l'océan, permettant d'injecter massivement et régulièrement une électricité renouvelable et locale sur notre réseau – l'espace maritime offrant la possibilité d'installer des machines de très larges dimensions (de plusieurs centaines de mètres de diamètre). Elle se caractérise par des installations très puissantes (de 500 à 1 000 MW) et un productible élevé, grâce à des vents marins particulièrement forts et réguliers,

conduisant les éoliennes à fonctionner près de 90 % de l'année. À titre d'exemple, la production d'un parc éolien en mer de 500 MW couvre l'équivalent de la consommation domestique en électricité de plus de 700 000 personnes.

Les perspectives de baisse des coûts sont remarquables, comme en témoigne la filière de l'éolien en mer qui a atteint, en moins de dix ans, une grande compétitivité en Europe du Nord, certaines installations allant même jusqu'au prix de marché de l'électricité (ce qui implique un niveau de soutien public nul). Cette rupture économique a été permise par l'augmentation de la puissance des turbines, passée en quelques années de 5-6 MW à 8-10 MW et bientôt au-delà, par l'effet d'échelle et de série ainsi que par les gains de productivité dans l'installation et la maintenance des parcs.

L'impact environnemental et paysager est limité et maîtrisé, l'ensemble des installations faisant l'objet d'une étude d'impact environnemental approfondie permettant de dimensionner au mieux les mesures d'évitement, de réduction et de compensation des impacts potentiels pendant les phases de construction et d'exploitation jusqu'au démantèlement du parc. Le retour d'expérience à l'échelle européenne démontre que les impacts de l'éolien posé sur l'environnement sont limités, ce qui a conduit un certain nombre d'États à poursuivre leur politique volontariste pour le développement des EMR.

Des synergies se sont créées avec les autres activités maritimes, permettant de mutualiser des savoir-faire (autour de la résistance mécanique des structures, de la gestion de la corrosion, de la maîtrise des conditions d'installation et de maintenance en mer, etc.), des activités de la chaîne de valeur sur les moyens de production mais aussi les moyens transverses comme les navires (de pose, de maintenance, de services), et de créer des synergies avec les technologies de production d'énergie embarquée à partir d'EMR. Des évaluations en matière de gestion prévisionnelle des emplois et des compétences et des formations nécessaires au développement des EMR sont également réalisées en commun au sein de l'industrie française, en particulier maritime, en amont de la réalisation des parcs EMR.

La France possède un grand nombre d'atouts pour développer les énergies marines renouvelables. Avec le deuxième espace maritime au monde étendu sur 11 millions de km² et un territoire métropolitain réparti sur quatre façades maritimes, notre pays dispose d'un potentiel de développement de l'éolien en mer, posé comme flottant, parmi les plus importants d'Europe (à hauteur de plusieurs dizaines de milliers de MW) et du deuxième potentiel européen pour l'hydrolien, derrière le Royaume-Uni, avec un gisement techniquement exploitable

de plus de 5 000 MW réparti essentiellement entre le passage du Fromveur et le Raz-Blanchard. Les infrastructures portuaires françaises sont particulièrement adaptées au développement d'installations EMR : les principaux ports français – Brest, Cherbourg, Dunkerque, Le Havre, Marseille, Nantes-Saint-Nazaire, etc. –, bénéficient de positions géographiques stratégiques permettant de rayonner sur les grands marchés européens, Royaume-Uni, Allemagne, Belgique, Danemark notamment. Ils concentrent des compétences historiques fortes dans les domaines de l'énergie, de la mécanique, de la métallurgie ou encore de la logistique, et disposent de tirants d'eau suffisants pour accueillir les navires d'installation des parcs, ainsi que de vastes espaces disponibles pour l'implantation d'usines et de zones de stockage. Les zones propices au développement des EMR se situent à proximité de grands centres de consommation d'électricité et le réseau de transport électrique français, très maillé, est particulièrement bien adapté pour accueillir et distribuer l'énergie produite par les futures installations EMR.

Enfin, notre pays peut également compter sur une dynamique de R&D continue et dynamique depuis plus de dix ans, portée par des investissements privés et avec le soutien de l'État dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir opéré par l'ADEME ou l'Agence nationale de la recherche, et sur un tissu industriel compétent, issu des secteurs de l'énergie, du maritime et de l'*oil & gas*, engagé dans le développement de nouvelles solutions technologiques.

Ainsi, compte tenu du potentiel des EMR, leur développement pourrait permettre de contribuer à hauteur de 10 % de notre électricité en 2035, et à une part encore plus élevée ensuite. Pour l'éolien en mer, cet objectif correspond à une capacité installée de 14 000 MW, ce qui représente la consommation électrique de plus de 10 millions de foyers, sur une emprise en mer inférieure à 1 % de l'espace maritime français. Au niveau européen, on estime qu'à l'horizon 2050, les énergies marines renouvelables couvriront un quart de la production d'électricité renouvelable totale. Les EMR sont en outre une alternative durable aux moyens de productions fossiles utilisés dans les zones non interconnectées, comme les territoires d'outre-mer, en permettant d'exploiter une ressource locale, propre et économiquement abordable, par rapport aux conditions de prix des moyens de production en place.

État des lieux et perspectives sur le développement des EMR en France

Depuis plus de dix ans, la France a soutenu et accompagné le développement des énergies marines renouvelables.

Aujourd'hui, six parcs éoliens posés sont en développement, d'une puissance proche de 500 MW chacun, attribués en 2012 et 2014 à l'issue de deux appels d'offres organisés par l'État. Près de 400 éoliennes seront ainsi installées au large des côtes françaises, pour une capacité totale de près de 3 000 MW. Ces projets, situés au large de Dieppe-le-Tréport, Fécamp, Courseulles-sur-Mer, Saint-Brieuc, Saint-Nazaire et Yeu-Noirmoutier ont fait l'objet d'un grand nombre d'études (dont l'étude d'impact environnemental), de phases de concertation (dont un débat public) et, à l'issue de la phase d'instruction administrative, ont obtenu les autorisations nécessaires à leur construction. Certaines de ces autorisations ayant fait l'objet d'un processus de recours administratifs, durant parfois plusieurs années, les premières mises en service de ces parcs devraient avoir lieu à partir de 2021. En 2016, une nouvelle procédure de mise en concurrence a été engagée par l'État, afin de construire et exploiter un parc éolien en mer au large de Dunkerque : le lauréat de ce projet, d'une puissance d'environ 500 MW également, devrait être désigné au cours de l'année 2019.

La France accuse un certain retard par rapport à son programme initial de développement de l'éolien en mer, prévu par le Grenelle de la mer, qui envisageait la mise en service de 6 000 MW en 2020. Le marché mondial, très concentré en Europe, s'est développé bien plus rapidement depuis une dizaine d'années, la puissance installée ayant été multipliée par neuf depuis 2010 : alors que 2 000 MW étaient en fonctionnement en 2010, plus de 18 500 MW sont aujourd'hui connectés au réseau électrique européen, le Royaume-Uni, l'Allemagne et le Danemark totalisant 80 % du marché. Le parc éolien *offshore* bat régulièrement des records de croissance, comme en 2017, année qui a vu les capacités augmenter de plus de 25 % (+ 3 000 MW installés).

La France a également initié le développement de l'éolien en mer flottant, par un appel à projets de l'ADEME attribué en 2016, soutenant quatre fermes pilotes totalisant une aide de l'État de 1,2 milliards d'euros. Une ferme pilote permet de préfigurer une installation commerciale en testant plusieurs machines simultanément afin de valider les modèles technico-économiques de l'installation et du fonctionnement d'un parc dans des conditions semblables à celles de futures fermes de plus grande ampleur. Situées en Atlantique (Groix-Belle-Île) et en Méditerranée (Leucate-Barcarès, Gruissan, Fos-sur-Mer), ces fermes pilotes de trois à quatre éoliennes et 24 MW testeront toutes une technologie différente de flotteurs et d'ancrage et comptent, d'ici leur mise en service prévue entre 2021 et 2022, parmi les tous premiers projets d'éolien en mer flottant au monde. Si quelques autres projets de ce type ont été concrétisés en 2017 et 2018 (un projet au Japon,

un prototype au Portugal, une ferme en Écosse), la dynamique française lancée sur l'éolien flottant est unique au monde. D'ores et déjà, la France compte l'un des premiers démonstrateurs d'éolienne flottante en service : l'éolienne *Floatgen* (2 MW) installée depuis le printemps 2018 au large du Croisic sur le site d'essai SEM-REV (École centrale de Nantes) et qui injecte sa production sur le réseau électrique.



Floatgen, première éolienne flottante installée au large des côtes françaises.

© Ideol / ECN / V. Joncheray.

Concernant l'hydrolien océanique et fluvial, notre pays dispose en 2019 d'un site d'essai opérationnel dans l'estuaire de la Gironde installé à Bordeaux, d'une première ferme pilote fluviale installée sur le Rhône fin 2018, et de plusieurs machines marines immergées au large de la Bretagne : une machine raccordée à Ouessant, une turbine installée dans le golfe du Morbihan et une dernière machine installée sur le site d'essai marin de Paimpol-Bréhat.

Enfin, un démonstrateur d'énergie thermique des mers est en développement à La Réunion, tandis que plusieurs projets de SWAC sont à l'étude en Polynésie, en Martinique et à La Réunion.

Grâce à ces premiers projets, la France a également réussi à structurer une filière industrielle autour des énergies marines renouvelables qui représente d'ores-et-déjà plus de 2 600 emplois et un investissement cumulé de près de 1,3 milliard d'euros, bien qu'aucune installation ne soit encore mise en service. Les acteurs

et les territoires français ont considérablement investi, notamment dans l'adaptation des infrastructures portuaires pour lesquelles l'investissement de plusieurs régions littorales s'élève à plus de 600 millions d'euros. Un industriel mondial de premier plan a déjà construit à Saint-Nazaire une usine de production et d'assemblage de turbines et nacelles, une usine de production de pales d'éoliennes a été mise en service à Cherbourg et d'autres sont en construction, notamment au Havre, par le *leader* mondial de la fabrication d'éoliennes en mer qui s'est engagé à construire des usines destinées notamment au marché français. La fabrication des champs éoliens à court terme et des autres technologies EMR à moyen terme nécessite la mobilisation de nombreux savoir-faire et compétences, depuis la conception des éléments mécaniques et électroniques en amont, jusqu'à l'assemblage et l'installation en mer des structures en béton, acier et composites en bout de chaîne, en passant par la fabrication des différents composants des parcs – fondations, pales, mâts, génératrices, nacelles, postes électriques en mer, transformateurs, câbles de raccordement, etc. La maintenance et l'entretien des machines feront encore appel à d'autres corps de métiers, en particulier dans le secteur maritime. On établit à 15 000 le nombre d'emplois qui vont être créés avec la mise en place des premiers parcs éoliens en mer. Ces emplois se situent dans les régions littorales, mais aussi sur l'ensemble du territoire. Ces perspectives sont cohérentes avec le constat des pionniers européens qui dénombrent plus de 10 000 emplois directs au Royaume-Uni¹ et 15 000 en Allemagne². De son côté, le développement de l'éolien en mer flottant constitue un relai de croissance pour le secteur de l'éolien en mer posé, mais aussi pour d'autres filières, dont l'activité est en décroissance ou cyclique (*oil & gas*, activités industrielles portuaires, chantiers navals, etc.). L'éolien en mer flottant présente également l'avantage de réaliser, à terre ou dans les ports, l'ensemble des activités d'installation et d'assemblage qui doivent être menées sur site, en mer, pour la technologie posée, offrant ainsi un axe supplémentaire de réduction des coûts.

Les technologies et savoir-faire français s'exportent déjà : ingénierie, industrie, développement de projet, sous-ensembles stratégiques de la chaîne de valeur, de sorte que 80 % du chiffre d'affaires de la filière des EMR en 2018 ont été réalisés à l'export.

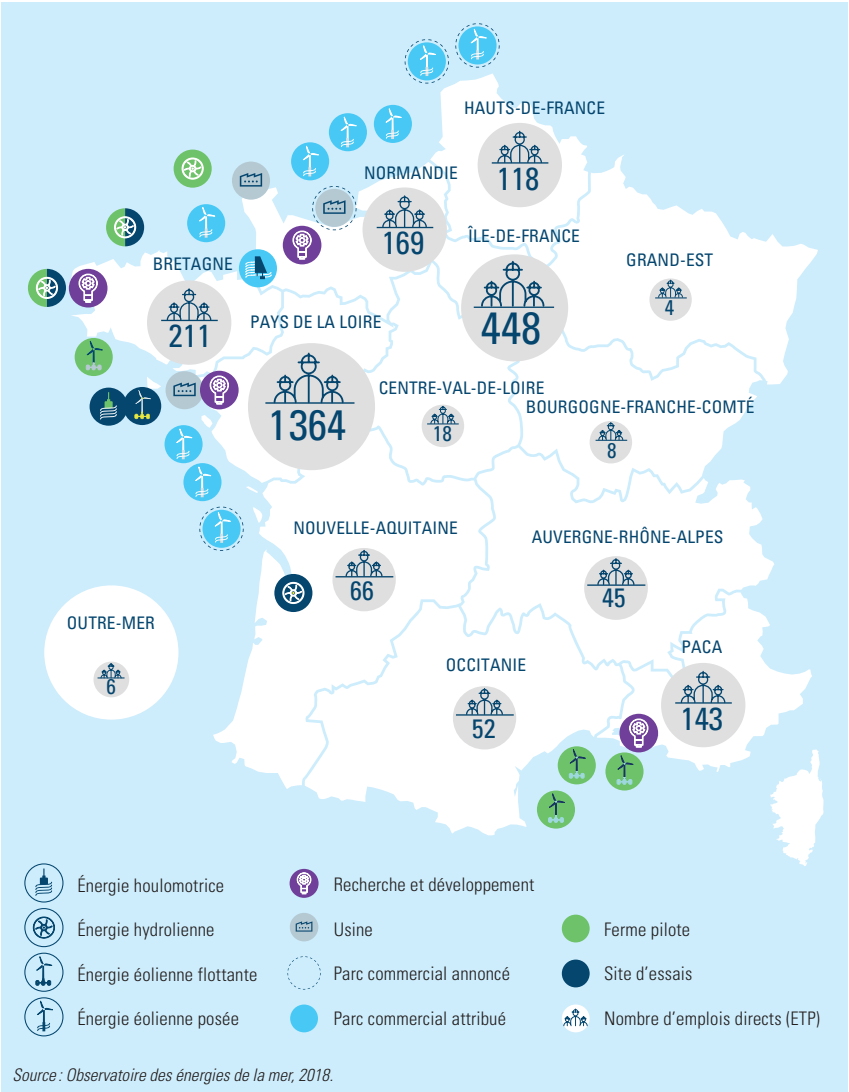
Les investissements génèrent de plus de la valeur dans l'économie réelle : les retombées économiques liées aux plans industriels (hors fiscalité directe liée à l'exploitation des parcs) sont, avec les seuls six premiers projets éoliens en mer, de l'ordre de 5 milliards d'euros pour l'État. Le développement des parcs

1. Office for National Statistics, <https://www.ons.gov.uk/economy/environmentalaccounts/bulletins/finalesimates/2017>

2. *Offshore Schafft Arbeit*, GWS, 2017.

s'accompagnera également de retombées fiscales, la taxe spéciale éolienne en mer bénéficiant notamment chaque année aux communes situées à proximité des parcs, aux comités des pêches maritimes et des élevages marins, à l'Agence française pour la biodiversité (AFB) et aux organismes de secours et de sauvetage en mer.

Cartographie des emplois des énergies marines renouvelables en 2017



Quels défis pour poursuivre le développement des EMR?

La poursuite du développement des énergies marines renouvelables fera face à plusieurs défis dans les prochaines années.

Ces dernières années, la filière éolienne en mer européenne a connu des baisses de prix considérables, au point de dépasser beaucoup plus rapidement que prévu toutes les projections réalisées en matière de réduction des coûts : l'appel d'offres pour le parc de *Kriegers Flak* (Danemark) a été remporté par *Vattenfall* en novembre 2016 à un prix fixe de 49,90 €/MWh ; le consortium *Shell, Eneco, Van Oord, Diamond Generating Europe* a remporté l'appel d'offres pour le parc *Blauwwind II* aux Pays-Bas la même année à 54,5 €/MWh. De nombreux facteurs expliquent cette baisse des coûts constatée : l'industrialisation de la chaîne de fabrication, l'accroissement de la concurrence, l'augmentation de la puissance des turbines, l'optimisation des fondations sont des leviers importants de réduction des frais d'investissement. La mutualisation de la maintenance entre les parcs ou l'emploi de moyens maritimes adaptés peuvent permettre la réduction des coûts d'opération et de maintenance. Enfin, la planification de l'espace maritime, la simplification des procédures, l'encadrement des recours contentieux, associés à un rythme d'appels d'offres régulier et des volumes suffisants sont les conditions essentielles de la réduction des coûts, notamment en France. Désormais devenu une source d'énergie très compétitive, l'éolien en mer n'a pas pleinement réalisé tout son potentiel. Pour poursuivre encore la baisse des coûts, sécuriser les investissements consentis, réaliser leur potentiel d'emplois et développer de nouvelles offres (ex. moyens maritimes, installations *offshore*), la mise en place d'un rythme d'appels d'offres régulier, planifié et concerté entre les acteurs des territoires est désormais indispensable.

Le défi de l'éolien flottant est double : la technologie doit à court terme démontrer sa fiabilité (par la concrétisation des fermes pilotes) et passer très rapidement à une phase de commercialisation et d'industrialisation qui permettra d'engager la filière sur une courbe de réduction des coûts, convergente avec celle de l'éolien en mer posé, facilitée par un nombre important de composants communs et de retours d'expérience acquis avec la technologie posée. À condition de rester dans la course internationale, l'éolien flottant présente également une forte opportunité industrielle pour la France, car l'ensemble des services, produits, compétences et activités françaises associés à l'éolien flottant pourront être exportés, en Europe pour les flotteurs, partout dans le monde pour les activités d'ingénierie à haute valeur ajoutée. L'avance qui pourra être acquise sur la maîtrise des outils et méthodes

d'ingénierie spécifiques à l'éolien flottant (couplage entre flotteur et éolienne) sera différenciante pour capter une part importante du marché international.

La France est ainsi un pays *leader* concernant le nombre de brevets technologiques déposés et exploités pour l'hydrolien : une trentaine, juste derrière les États-Unis. Après la phase de prototypage en cours, de premières fermes pilotes devront être mises à l'eau, pour tester les technologies en conditions réelles de fonctionnement. Au-delà et à moyen terme, la phase commerciale déterminera la réduction des coûts de production en combinant plusieurs facteurs comme l'effet de série, afin de réaliser des économies d'échelle sur toute la chaîne d'approvisionnement, l'optimisation de la productivité des hydroliennes, grâce à des évolutions technologiques, comme des machines plus puissantes, et un meilleur rendement. Enfin, la diminution des coûts d'installation et d'exploitation, par l'optimisation des moyens et méthodes employés, permettra à l'hydrolien de réduire ses coûts de production.

Enfin, concernant l'houlomoteur et la technologie ETM, les défis sont avant tout techniques dans la mesure où la résistance de tels systèmes, quelles que soient les conditions de mer, constitue le point essentiel. Les expériences, essais ou tests doivent se poursuivre pendant de longues années et les perfectionnements sont incessants.

« La demande en électricité ne cessera de croître... »

Entretien avec Philippe SAUQUET

Directeur général Gas, Renewables & Power et

Directeur général Strategy-Innovation - Groupe Total

Études Marines: Nous avons suivi avec intérêt l'évolution du groupe *Total* ces dernières années. Votre PDG, Patrick Pouyanné, annonce que l'électricité sera l'énergie du XXI^e siècle, vous investissez dans le GNL, le solaire, l'éolien en mer... Sur quels éléments se fonde cette évolution ?

Philippe Sauquet: Pour bien comprendre l'évolution de *Total* et les choix que nous opérons aujourd'hui, il faut en réalité revenir un petit peu en arrière, et plus précisément à la décennie 1970. À l'époque, il y a les fameuses prévisions du Club de Rome annonçant qu'il n'y aura plus une goutte de pétrole en l'an 2000 et, même si cela s'est avéré être complètement faux, nous avions alors des inquiétudes réelles. C'est la raison pour laquelle, dès les années 1970, le groupe s'investit dans différents types d'énergie. Le gaz bien entendu, puisque quand on trouve du pétrole, on trouve du gaz et inversement, mais aussi dans les mines d'uranium – ce qui nous a amenés, par exemple, à prendre une participation dans la *COGEMA* –, les mines de charbon, mais aussi le solaire. C'est donc dans cette période, il y a plus de 40 ans maintenant, que nous posons les bases d'une évolution vers un métier d'énergéticien.

Puis vient le début des années 2000 et de nouvelles inquiétudes liées à l'envol de la consommation d'hydrocarbures du fait du décollage économique de la Chine. Nous observons une demande qui augmente année après année dans des proportions jamais vues et l'on se dit qu'avec un maximum de 40 ans de réserves de pétrole devant nous, le *peak oil* pourrait arriver beaucoup plus vite que prévu. C'est ce qui nous pousse à nous tourner de nouveau vers d'autres types d'énergie. Le gaz est, là encore, une évidence, mais aussi le charbon et bien entendu le solaire. Puis arrive la fin de la décennie 2000-2010 et un nouveau changement de paradigme avec la révolution du pétrole et du gaz « non conventionnels » couplée à la crise financière de 2009. La production d'hydrocarbures augmente, leur consommation diminue et, dans le même temps, l'impératif de la lutte contre le changement climatique s'impose vraiment, avec un volet supplémentaire : la pollution de l'air qui devient une préoccupation fondamentale en Chine et interroge sur le devenir du charbon. Je n'oublie pas Fukushima qui fait planer de sérieuses questions sur le nucléaire. Ce panorama nous a conduits à nous poser des questions un peu fondamentales qui, avec la nomination de notre nouveau PDG, se sont traduites par une vision et une stratégie nouvelles.

Stratégie qui passe donc par l'électricité...

En fait, tout part de la demande en énergie que nous voyons croître de manière toujours importante, l'Inde, le continent africain, une bonne partie de l'Asie ayant

encore des besoins considérables. Ce diagnostic posé, nous savons qu'il va nous falloir arrêter le charbon – nous en sommes sortis totalement en 2015 –, facteur de pollution désormais insoutenable dans les mégapoles chinoises ou indiennes, et proposer une alternative qui ne sera pas le nucléaire, aussi bien pour des raisons de coûts que de prolifération.

Étant un acteur mondial, il faut en outre que nous déclinions notre stratégie à travers les continents en prenant bien soin de différencier nos solutions selon que les pays sont développés, donc en capacité d'augmenter le coût de l'énergie *via* des taxes, ou en voie de développement, avec pour priorité un accès à l'énergie à un prix abordable. C'est ce facteur prix qui explique que l'on voie la demande en pétrole continuer à augmenter de 1 ou 1,5 % par an malgré la pression pour le climat. C'est en effet une source d'énergie qui peut faire le tour de la planète pour un ou deux dollars et dont les réserves sont suffisamment importantes pour ne pas craindre un *peak oil*. En parallèle, nous pensons que la demande en électricité ne cessera de croître, à la fois car elle correspond à une manière facile et propre de consommer de l'énergie, mais aussi parce que sa production est très flexible, votre réseau pouvant être alimenté par des renouvelables, du gaz, de l'hydro ou du charbon quand vous ne pouvez pas faire autrement. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de nous investir de façon massive dans l'électricité en la générant à partir de gaz ou de renouvelables, les deux étant totalement liés.

En quoi gaz et renouvelables sont-ils liés ?

Ce qu'il faut bien comprendre, c'est que tous les systèmes électriques, européens comme mondiaux, se sont construits sur une capacité fondée sur la demande de pointe. La plupart du temps, la demande est plus faible et les opérateurs vont pouvoir choisir quel type de génération électrique ils vont privilégier : renouvelable, au gaz, nucléaire, autre. Mais, en période de pointe, et sachant que l'électricité ne se stocke pas et que celle d'origine renouvelable est intermittente, le seul choix possible dans la plupart des pays du monde est de recourir aux centrales thermiques fonctionnant soit au charbon, soit au gaz.

La problématique est alors une problématique de coût. Dans les pays développés, comme en Europe où les centrales à gaz et à charbon coexistent, vous pouvez orienter le choix en jouant sur les taxes. Ainsi le charbon, historiquement moins cher que le gaz, était privilégié au Royaume-Uni jusqu'à ce que se mette en place une taxe sur le CO₂. En période de pointe, les centrales à gaz ont dès lors été le

premier recours et vous avez pu constater une baisse conséquente des émissions de CO₂ dans ce pays, sans augmentation significative du prix de l'électricité. Pour les pays en développement, la problématique est différente et l'on peut dire qu'ils se séparent en deux : ceux qui ont du gaz à proximité et ceux qui n'en ont pas. Dans les premiers, de ce point de vue, le phénomène est d'ailleurs similaire dans les pays développés, le gaz est clairement la solution la plus économique. On l'a vu de manière presque caricaturale aux États-Unis avec le développement du gaz non conventionnel : du jour au lendemain, l'électricité a été générée à base de gaz et le charbon a été écarté. Donald Trump peut ensuite faire la promotion du charbon, ce n'est plus le sujet, car en coût de production, le gaz est meilleur marché que le charbon. Là où il y a concurrence avec le charbon, c'est quand il y a transport, quand vous devez importer du gaz. Le charbon est un solide et un solide n'est pas cher à convoier. Vous avez la possibilité de l'importer d'Afrique du Sud, d'Australie, d'Indonésie sur de très grandes distances. Le gaz, à l'inverse, est plus cher à transporter. Il a peu de densité énergétique, il occupe de l'espace, donc quand vous transportez du gaz, vous transportez beaucoup d'espace, ce qui renchérit son coût. Il n'en demeure pas moins que le gaz, en se substituant à la génération électrique au charbon, représente à nos yeux le moyen le plus rapide et le plus économique de réduire les émissions de CO₂.

C'est la raison pour laquelle vous avez investi de façon importante dans le gaz naturel liquéfié (GNL) ?

Le GNL est en effet absolument indispensable pour promouvoir le gaz sur l'ensemble de la planète, pour lui donner une dimension mondiale. Et là encore, pour un motif de coût. Un gazoduc nécessite de gros tuyaux, beaucoup plus gros que les *pipelines* de pétrole, ce qui est relativement onéreux. La façon la plus économique de transporter du gaz sur grandes distances est en fait le GNL : en le refroidissant à -160 degrés Celsius, on le transforme en liquide, ce qui diminue son volume par 600 et permet le transport par bateau. Ce qui coûte cher ici, c'est la liquéfaction : le transport par méthanier n'est pas prohibitif et, pour le regazéifier, il suffit de le laisser se réchauffer, ce qui n'est pas très compliqué. C'est donc aujourd'hui la technique permettant de ravitailler n'importe quel pays doté d'une façade maritime de façon économique et sûre tout en s'affranchissant des contraintes géopolitiques. Car, et c'est la grande nouveauté, il y a aujourd'hui, de multiples sources de GNL possibles, entre les États-Unis, la Russie, le Qatar, l'Australie, le Nigeria ou l'Iran un jour, s'il revient dans la communauté internationale. C'est une vraie rupture par rapport à une époque où les pays avaient

des craintes vis-à-vis d'un approvisionnement en gaz du fait d'une dépendance géographique liée à une production majoritairement concentrée au Moyen-Orient, mais aussi à une solution de transport par gazoducs qui vous met dans la main des pays de transit. C'est la raison pour laquelle, si l'évidence économique d'un gazoduc entre la production iranienne et les besoins indiens apparaît patente, le projet ne se réalisera sans doute jamais, le transit devant s'effectuer par le Pakistan.

C'est donc grâce au GNL que le gaz est devenu une vraie option économique et géostratégique et une meilleure option que le charbon qui va se renchérir de plus en plus sous l'effet des taxes sur le CO₂ mais aussi des coûts de production, avec des banquiers de plus en plus réticents à investir dans des projets miniers. C'est la raison pour laquelle, enfin, nous jouons notre rôle de promoteur du gaz et de la composante renouvelable, convaincus que les deux sont liés, et ce d'autant plus dans les pays en voie de développement où l'on trouve du soleil, du vent et suffisamment d'espace pour éviter les problèmes rencontrés en France, où l'éolien engendre toujours des contestations à proximité des habitats.

Vous avez pourtant candidaté à l'appel d'offres pour le parc éolien *offshore* de Dunkerque : y attendez-vous moins de contestations ?

Ce n'est certainement pas le motif ! Non, nous avons candidaté parce que nous croyons désormais à cette technologie et que son coût est arrivé à un niveau acceptable. En ce domaine, nous sommes passés par une phase de scepticisme, pas tellement concernant la réduction des coûts – qui nous semblait devoir venir naturellement avec le gigantisme croissant des éoliennes –, mais du point de vue de la maintenance et de l'entretien, interventions qui, en mer, sont toujours complexes. Comme en plus on ne pouvait investir dans tous les domaines, nous nous sommes contentés d'un rôle d'observateur. Une fois que nous avons été convaincus que la courbe de décroissance des coûts était engagée, que la technologie était mature, l'autre sujet était de savoir à quel moment nous allions rentrer sur le marché. À 150/200 euros par mégawattheure, ce n'était pas forcément pertinent ; maintenant que nous sommes parvenus à des niveaux de prix comparables aux autres énergies renouvelables intermittentes, que nous ne sommes pas très loin des prix du marché, cela fait sens pour nous, d'où notre candidature. La frontière suivante sera l'éolien flottant... qui offre un énorme potentiel. Dans l'exploitation pétrolière et gazière, nous sommes passés par les mêmes étapes : nous avons commencé par nous poser sur le fond de la mer puis, quand on a voulu dépasser quelques centaines de mètres, nous sommes passés à des structures flottantes ancrées. C'est la même idée pour les

éoliennes *offshore* mais, du point de vue du coût, il y a encore des marges. Si j'insiste sur ce paramètre de coût, c'est parce que dans notre industrie, il est fondamental. Dans le parfum, si vous montez le prix de 10 %, les clients seront toujours là, le prix n'étant pas le critère prioritaire. Si en revanche vous augmentez le prix de l'énergie de 10 % sur la planète, vous avez des répercussions immédiates sur la croissance mondiale. Le vrai défi, pour nous, est d'arriver à faire baisser les coûts des énergies renouvelables ce qui suppose, vu la somme des investissements, de ne pas se tromper de filière, d'être à peu près certains que nos paris technologiques déboucheront sur des filières énergétiques optimisées.

Dans le domaine du solaire, on a le sentiment que le pari est en train d'être gagné...

Il est gagné depuis longtemps si l'on considère que toute l'énergie qui est sur Terre vient du soleil... même si elle met parfois un peu de temps à se transformer, quelques fois des millions d'années, quelques fois instantanément. En ce domaine, nous avons des bases, posées dès les années 1970, sur lesquelles nous avons pu construire lorsque nous avons décidé d'investir de façon importante, en gros il y a une dizaine d'années. À l'époque, on produisait de l'électricité *via* des panneaux voltaïques à un coût tournant autour de 500 euros par mégawattheure, mais nous étions persuadés qu'il y avait un potentiel de baisse de prix important. Nous avons donc investi dans les cellules, les panneaux solaire : les coûts ont été divisés par dix, nous sommes même devenus numéro deux mondial... et la Chine s'est emparée de la quasi-totalité du marché ! Pourquoi ? Parce que le choix a été fait à un moment donné de développer à marche forcée le photovoltaïque dans les pays développés en autorisant l'importation sans barrières douanières de panneaux chinois, moins onéreux car subventionnés.

Et c'est ce qui risque de se passer dans un autre secteur fondamental pour les énergies renouvelables, celui du stockage, des batteries...

Sur le stockage, il faut avoir à l'esprit que c'est un sujet relativement nouveau : tant que votre mix électrique n'est constitué que de 5 % de renouvelables intermittents, ce n'est pas un sujet. Là où cela le devient, c'est quand vous voulez que votre mix comprenne 10 %, 15 %, 20 % ou 30 % d'énergie renouvelable. Car à ce niveau, sachant que l'enjeu pour les opérateurs est de pouvoir couvrir les pointes de consommation, vous avez besoin d'électricité : pas uniquement quand il y a du

vent, qu'il fait beau ou jour, vous en avez besoin à l'instant T et immédiatement. C'est là que la question du stockage devient un vrai sujet.

En ce domaine, la solution a longtemps reposé sur les barrages, mais avec le défaut qu'ils ne peuvent servir que de façon saisonnière : une fois que vous avez libéré l'eau, généralement en hiver, au moment de la pointe d'électricité, vous ne pouvez plus y recourir. Nous avons donc travaillé sur le potentiel des batteries qui sont des êtres complexes, notamment sur le volet de la restitution de l'énergie que vous y avez stockée. C'est ce qui explique, au passage, le problème sur lequel butent pour le moment les constructeurs automobiles pour obtenir des rayons d'action optimaux pour leurs véhicules, problème qui se pose avec encore plus d'acuité dans le contexte des nouvelles normes d'émissions de CO₂ de l'Union européenne. Les constructeurs sont contraints de passer aux véhicules électriques, ce qui rebat totalement les cartes du *leadership* dans ce secteur. L'industrie automobile européenne, à la pointe dans le moteur thermique, se retrouve en effet à la traîne dans le moteur électrique.

Contrairement à un moteur à combustion thermique qui est une œuvre d'art, un moteur électrique est lui extrêmement basique – en gros c'est une batterie avec des roues –, ce qui signifie que la valeur ajoutée du véhicule résidera dans sa batterie. Les constructeurs qui seront capables de proposer une batterie pouvant se charger extrêmement rapidement et dotée d'une autonomie très longue feront la différence. Et en ce domaine, la technologie la plus prometteuse en matière de densité énergétique est la batterie lithium-ion, dans laquelle les acteurs asiatiques – chinois, coréens et japonais – ont pris de bonnes longueurs d'avance. C'est ce qui explique le projet « d'*Airbus* de la batterie » porté par les gouvernements européens qui réalisent qu'il y a urgence à faire émerger un ou des champions en ce domaine. Car si rien n'est fait, il y a de fortes chances que l'industrie des batteries lithium-ion soit 100 % asiatique et 90 % chinoise, avec le risque de voir dans nos rues demain des véhicules, certes électriques, mais majoritairement asiatiques, à l'image de ce qui s'est passé dans le domaine des cellules et des panneaux photovoltaïques.

Concernant le stockage, il y a un vieux rêve, l'hydrogène : est-ce un sujet que vous suivez ?

L'hydrogène a beaucoup d'avantages mais aussi beaucoup d'inconvénients. L'avantage le plus évident est bien entendu qu'au moment de la combustion, seule de la vapeur d'eau est générée. En revanche, il y a beaucoup d'inconvénients, au premier rang desquels le fait qu'il faille le produire. C'est un sujet que nous

connaissions bien, puisque nous en sommes un des utilisateurs principaux pour nos raffineries, pour désulfurer nos produits et le problème, c'est que quand on en produit, on émet du CO₂. Un autre inconvénient réside dans le fait que l'hydrogène soit un gaz, or qui dit gaz dit coût de transport, d'autant que sa densité est beaucoup moins forte que celle du méthane, nous obligeant à le comprimer, ce qui n'est pas anodin en matière de sécurité. On peut réaliser des véhicules fonctionnant au gaz naturel comprimé : si vous allez en Argentine par exemple, que vous ouvrez le coffre des taxis, vous verrez une bonbonne de gaz qui est à une pression de quelques bars et ne pose pas de problème. Si vous voulez avoir la même quantité d'énergie dans votre coffre avec de l'hydrogène, il faudra par contre en passer par des centaines de bars, ce qui n'est pas anodin... Il y a toujours des solutions technologiques, mais cela coûte cher.

La civilisation de l'hydrogène dont on rêve parfois n'est donc pas impossible à trouver mais, à mon sens, ce n'est pas pour demain. Il faut se donner le temps de la rêver et c'est pourquoi il me semble essentiel de continuer à explorer le sujet, notamment dans deux directions : la production et le transport. Il faut travailler à produire de l'hydrogène vert, utiliser de l'électricité à base de renouvelables pour, à partir d'eau, séparer l'hydrogène de l'oxygène. Le problème aujourd'hui c'est que cela demande beaucoup d'énergie et faire de la recherche sur ce sujet, cela a un sens, parvenir à des électrolyseurs abordables, cela a du sens. Un deuxième sujet à creuser se trouve du côté des électrolyseurs de petite taille, pour réduire les problèmes de transport d'hydrogène. On peut imaginer une station-service abritant votre électrolyseur dans une borne, borne dans laquelle vous mettriez de l'eau pour réaliser votre électrolyse et charger votre véhicule. J'ai vu cela à Boston et cela mérite d'être approfondi car, avec l'hydrogène, vous pouvez compter sur une autonomie de 500 km, ce qu'attend le conducteur habitué au moteur thermique.

Le terme de transition s'applique assez bien à notre secteur en définitive : il a le mérite d'indiquer que nous sommes sur un chemin, qu'il ne faut pas forcément vouloir résoudre tous les problèmes du futur dès aujourd'hui, au risque de faire des bêtises. Notre étalon de référence est aujourd'hui le remplacement du charbon par le gaz, car on sait que cela fonctionne, mais nous continuons en parallèle à explorer le potentiel de l'hydrogène, car un jour, il y aura des applications, des solutions à moindre coût. Mais pour l'heure, nous en sommes encore à la transition énergétique.

Propos recueillis par l'ASP Marion Soller, l'ASP Mahmut Sarp
et Cyrille P. Coutansais

Énergies renouvelables : l'enjeu des ressources minérales

Patrice CHRISTMANN

*Responsable de la division Stratégie des ressources minérales
Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)*

L'être humain dépend depuis l'aube de son existence des ressources naturelles pour sa survie et, au-delà, pour son bien-être. Ces ressources peuvent être divisées en deux grandes catégories : les ressources vivantes (ressources biotiques) et les ressources minérales, matières premières extraites du sous-sol proche ou lointain (la mine la plus profonde du monde, la mine d'or de Mponeng, en Afrique du Sud, descend à 3,9 km sous terre).

Les matières premières minérales peuvent être des minéraux utilisés pour leurs propriétés intrinsèques (couleur, dureté, résistance aux hautes températures) ou en tant que sources d'éléments chimiques, essentiellement de métaux. Les minerais sont des assemblages de minéraux dont certains contiennent des métaux en quantités économiquement significatives. Cet article traite des matières premières minérales non énergétiques qui rendent possible une gamme énorme, sans cesse plus diversifiée, de services et fonctionnalités qui, sans leur usage, n'existeraient pas. Sans elles nos maisons (sauf celles entièrement en matières d'origine végétale), nos infrastructures, notre approvisionnement en eau, en énergies (y compris en énergies renouvelables!), nos médias, nos technologies de l'information et de la communication (dont nos ordinateurs et nos *smartphones*), nos moyens de transport, nos systèmes de sécurité et de défense, nos systèmes de santé et bien d'autres choses encore n'existeraient simplement pas.

Ce sont les grandes découvertes de la chimie, de la physique et de la science des matériaux survenues essentiellement à partir du XIX^e siècle qui ont été à la base du développement économique mondial. Elles ont à la fois permis de produire des tonnages de plus en plus élevés de minéraux et de métaux et de développer une gamme d'usages et de services de plus en plus vastes grâce à de multiples innovations technologiques, au rythme toujours plus rapide.

Des défis majeurs pour le XXI^e siècle

Si, au début du XX^e siècle, seules étaient utilisées les propriétés les plus évidentes des éléments (densité, malléabilité ou résistance mécanique, résistance à la corrosion, température de fusion ou de cristallisation), aujourd'hui ce sont les propriétés les plus « intimes » des éléments qui le sont, notamment la structure électronique de leurs atomes et leurs propriétés quantiques (expliquant notamment les propriétés optiques de certains éléments, par exemple la luminescence de divers éléments du groupe des terres rares).

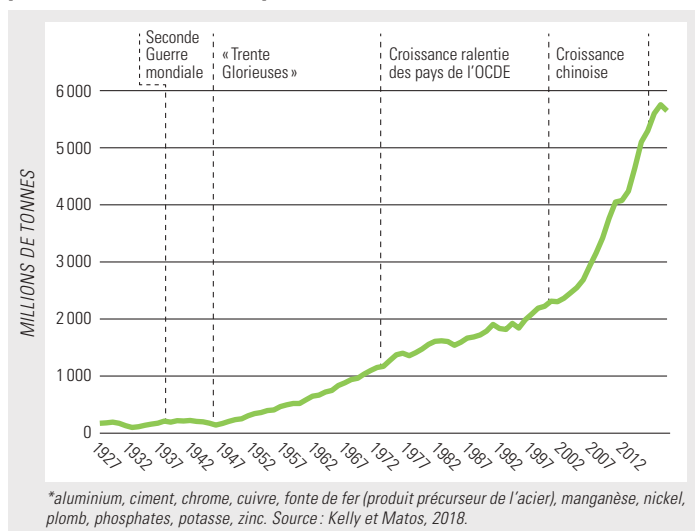
Les technologies industrielles et des formes d'organisation permettant la production de masse sont apparues aux États-Unis au début du XX^e siècle, avec les travaux de Frederick Winslow Taylor (1856-1915). Elles se sont considérablement développées en Europe, au Japon et aux États-Unis dans le cadre de la Seconde Guerre mondiale. Après la guerre, une conjugaison de facteurs, inédite dans l'histoire de l'humanité, a entraîné une croissance rapide de la demande et de la production de matières premières minérales stimulée par :

- la reconstruction dans les régions sinistrées après le conflit ;
- la maîtrise de processus de production industrielle toujours plus complexes permettant, du côté de la demande, la production de tonnages rapidement croissants de matières premières minérales, et du côté de l'offre, la mise sur le marché d'une gamme sans cesse plus large de biens de consommation innovants ;
- les innovations dans le domaine de la métallurgie et de la science des matériaux ;
- l'automatisation des procédés rendue sans cesse plus performante grâce aux technologies de l'information et de la communication ;
- la croissance rapide de la taille des navires vraquiers permettant le transport maritime des minéraux¹ et des minerais depuis les pays producteurs vers les pays où la disponibilité d'énergie bon marché permet d'implanter des fonderies et des raffineries de métaux à des conditions économiquement attractives.

Le dynamisme de la croissance d'après-guerre, qui a duré près de trente ans, de 1945 au premier choc pétrolier (1973), période souvent désignée, y compris en France, sous le nom de « Trente Glorieuses », est bien visible sur la figure 1. Celle-ci représente la croissance des matières premières minérales les plus utilisées, hors sables, graviers et enrochements, matériaux pour lesquels il n'existe pas de statistiques internationales de production. Cette croissance a été particulièrement élevée dans les pays développés, aujourd'hui membres de l'OCDE. Au cours de cette période, la production d'acier a crû en moyenne de 7,4 % par an, la consommation d'acier étant fortement corrélée à la croissance économique mondiale. À cette phase de croissance rapide de l'offre et de la demande a succédé

1. Les plus grands vraquiers actuels, utilisés par la société *Vale* pour le transport du minerai de fer brésilien vers la Chine, ont une capacité de 400 000 tonnes sèches. Selon une étude récente (UNCTAD, 2018), le transport de vrac (charbon, bauxite et alumine, minerai de fer, phosphates, céréales) a crû de 448 millions de tonnes en 1970 à 3 196 millions de tonnes en 2017, soit plus de 600 % en moins de cinquante ans.

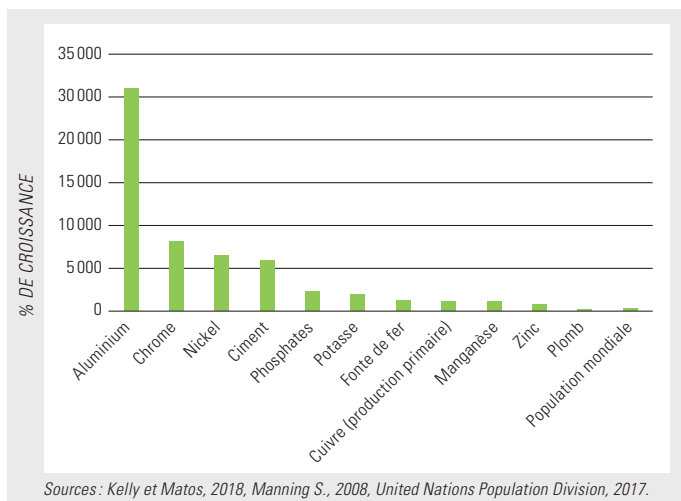
Figure 1. Évolution de la production mondiale des matières premières minérales les plus largement utilisées*



une phase de croissance plus molle, qui a duré jusqu'en 2001. Elle a été causée par la combinaison des coûts élevés du pétrole et du gaz, du ralentissement de la demande dans les pays développés et de l'effet du niveau élevé de développement des infrastructures et d'équipement en biens de consommation. Au cours de cette période 1974-2001, la production d'acier n'a crû que de 0,8 % par an, en moyenne. Une troisième phase apparaît très nettement sur ce diagramme à partir de 2002, liée à la croissance très rapide de l'économie chinoise, représentant environ 20 % de la population mondiale. Cette croissance est le principal facteur de la forte demande mondiale en matières premières minérales observée depuis 2012. Au cours de cette période, la production mondiale d'acier a connu une forte accélération, avec une croissance de 4,8 %/an en moyenne.

La figure 2, ci-après, montre la progression de la production mondiale individuelle de ces matières premières minérales entre 1927 et 2015, exprimée sous forme de pourcentage par rapport à 1927, et la compare à l'évolution de la population humaine mondiale au cours de la même période. Cette figure montre qu'à l'exception du plomb, l'augmentation de la production, et donc de la demande, a été beaucoup plus rapide que celle de la population mondiale, soulignant la croissance spectaculaire de l'intensité de la consommation de matières premières minérales survenue, pour l'essentiel, depuis 1945.

Figure 2. Pourcentage de croissance de la production annuelle mondiale des principales matières premières minérales et de la population mondiale (1927-2015)



Les tendances notées ci-dessus devraient se poursuivre pendant la majeure partie du XXI^e siècle, plusieurs facteurs soutenant une demande élevée en matières premières minérales :

- la poursuite de la croissance de la population mondiale. Selon le scénario démographique médian publié par les Nations unies, la population mondiale, estimée à près de 7,6 milliards de personnes en 2017, pourrait atteindre près de 9,8 milliards de personnes en 2050 (+2,2 milliards, soit une croissance de 29 %). L'Afrique devrait être la première région mondiale de croissance démographique. Si aujourd'hui encore la consommation de matières premières minérales y demeure faible par rapport à celle des pays riches, le continent pourrait dans les décennies à venir rattraper une grande partie de ce retard, ce qui aurait un impact important sur la demande ;

- le développement rapide de la classe moyenne, définie par un pouvoir d'achat compris entre 10 et 100 \$ *per capita* et par jour, corrigé des parités de pouvoir d'achat. Estimée à près de 2,3 milliards de personnes en 2015, la classe moyenne pourrait plus que doubler, à près de 4,7 milliards de personnes d'ici 2030, dont 60 % vivraient en Asie (notamment en Chine et en Inde, pays dont la classe moyenne comporterait alors 2,2 milliards de personnes) ;

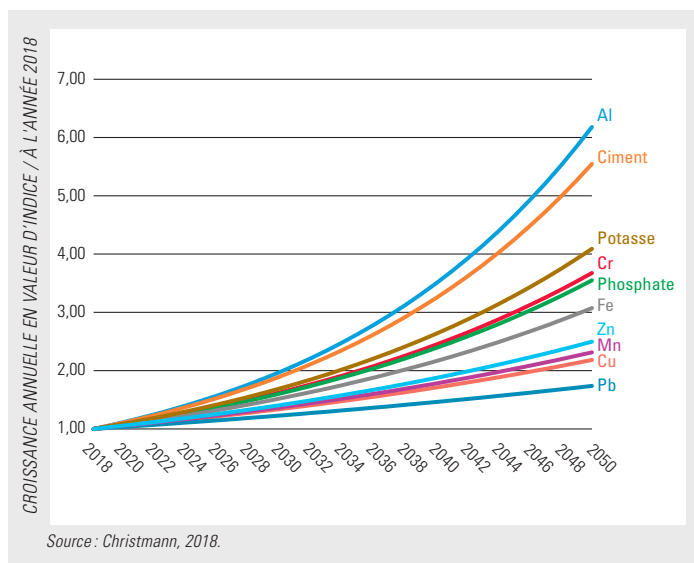
- l'urbanisation. Les Nations unies estiment qu'en 2015, près de 4 milliards de personnes vivaient en milieu urbain, soit 54 % de la population mondiale. En 2050, ce total pourrait atteindre 6,7 milliards de personnes, soit 68 % de la population mondiale;

- la transition écologique. Deux grandes composantes de l'indispensable transition vers des modes de production et de consommation plus durables, générant notamment moins d'émissions de gaz à effet de serre, y contribueront. Il s'agit de la production d'énergie à partir de sources renouvelables (soleil et vent) et de l'électromobilité. Le recours aux sources intermittentes d'énergie que sont le soleil ou le vent nécessitera, en plus des capacités de production, de construire d'importantes capacités de stockage ainsi que des réseaux intelligents permettant de gérer ces installations.

Ces déterminants auront pour effet, pendant plusieurs décennies encore, la poursuite de la croissance exponentielle de la demande en matières premières minérales.

Ci-après apparaît le scénario de croissance de la demande en matières premières minérales d'ici 2050 pour les matières premières les plus largement utilisées.

Figure 3. Scénario de croissance de la demande mondiale en matières premières minérales usuelles (2018-2050)



Ce scénario, s'il se vérifie par la réalité des prochaines décennies, se traduirait, par rapport au niveau observé en 2018², par une croissance de plus de 600 % de la demande en aluminium, d'environ 550 % de celle en ciment et de plus de 300 % de celle en acier.

Il est beaucoup plus difficile d'établir des scénarios relatifs aux métaux plus rares tels que le cobalt, le gallium, l'indium, le lithium, le niobium, le tantale, le tungstène, le sélénium, le rhénium, le tellure ou le vanadium. Dans de nombreux cas, il s'agit de sous-produits qui ne sont disponibles que parce qu'il existe une production industrielle de leur métal porteur. Ainsi le sélénium, le rhénium ou le tellure sont des sous-produits existant dans certains minerais de cuivre, leur extraction ne pouvant se faire que lors du raffinage électrolytique du cuivre, par valorisation des boues qui s'accumulent au fond des cellules d'électrolyse.

La demande en tel ou tel métal rare est souvent très dépendante du développement du marché des technologies nécessitant son usage, celles-ci évoluant à un rythme de plus en plus rapide. Deux exemples illustrent ce propos : au cours de la décennie précédente (2000-2010) les ampoules fluorescentes compactes (AFC), dont la production nécessite deux terres particulièrement rares, l'euprium et le terbium, ont été produites en grandes quantités, car elles offraient la meilleure solution en termes de rapport coût/économies d'énergie. La forte demande en euprium et en terbium liée à leur production a conduit les experts des terres rares à les considérer comme des ressources particulièrement stratégiques. Aujourd'hui, le marché des AFC s'effondre car les diodes électroluminescentes (LED) offrent plusieurs avantages majeurs au consommateur : efficacité énergétique fortement accrue, grande flexibilité des solutions d'éclairage et meilleure longévité des équipements. Les LED ne nécessitant pas, ou très peu, d'euprium et de terbium, le débouché majeur de ces deux éléments est en train de se réduire considérablement, ceux-ci devenant moins stratégiques.

Le second exemple est celui des batteries au lithium ion dont la demande mondiale explose littéralement du fait du développement très rapide du marché des véhicules électriques et de celui des nombreux équipements électriques et électroniques portables qui bénéficient des performances de ces batteries. Selon la technologie choisie pour leur production, la composition de la batterie varie, mais les deux

2. Les estimations de l'offre et de la demande présentées dans cet article ne tiennent pas compte de l'existence de stocks, notamment au niveau des principales bourses de négoce et de marchés d'options relatives aux métaux que sont le *London Metal Exchange* (LME), le *New York Mercantile Exchange* (NYMEX) et le *Shanghai Futures Exchange* (SHFE). L'évolution de ces stocks ne modifie pas le scénario.

types aujourd'hui les plus largement répandus (batteries lithium-cobalt et lithium-nickel-manganèse-cobalt) ont nécessité environ 50 000 tonnes de cobalt en 2017, soit plus de la moitié de la production mondiale de cobalt raffiné la même année. Le cobalt est aujourd'hui l'un des métaux critiques pour l'économie de l'Union européenne, car sa production minière provient à 60 % de la République démocratique du Congo, où elle est de manière croissante contrôlée par des investissements chinois. Ce n'était pas le cas en 2010, lors de la première édition de l'étude de la Commission européenne relative aux métaux critiques pour l'Union. La demande en cobalt, de l'ordre de 10 000 t/an pour la production de batteries, ne représentait alors qu'une faible partie de la demande totale. Du fait du développement rapide de l'électromobilité, cette demande pourrait croître de l'ordre de 8 %/an au cours des prochaines années. Cependant, au-delà de 2025-2030, de nouvelles technologies de batteries, nécessitant beaucoup moins de cobalt, voire pas du tout, pourraient devenir disponibles à grande échelle. Ces deux exemples illustrent les limites des scénarios concernant les métaux rares et la nécessité d'une veille technologique pour anticiper le mieux possible les évolutions à venir du côté de la demande, une veille relative aux projets d'exploration et de développement miniers étant nécessaire en parallèle pour anticiper au mieux la tendance de l'offre. Ce type de veille est réalisé par des sociétés spécialisées, essentiellement anglo-saxonnes, et dans divers pays par les pouvoirs publics à travers leurs services géologiques. En France, en appui au Comité pour les métaux stratégiques (COMES), le site public [mineralinfo.fr](http://www.mineralinfo.fr), dépendant des ministères de l'Économie et des finances, de l'Enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation ainsi que du ministère de la Transition écologique et solidaire, publie des fiches de criticité et des rapports rédigés par les experts du BRGM documentant les enjeux liés aux matières premières minérales cruciales pour l'économie française³.

Le *Cyclope*, ouvrage annuel de référence analysant les marchés mondiaux de l'ensemble des matières premières sur environ 800 pages⁴, comporte un ensemble de chapitres dédiés aux matières premières permettant de comprendre l'évolution de la demande. Les présentations données chaque année par *CRU*, *McKinsey* et le BRGM à l'occasion du *World Materials Forum* organisé à Nancy proposent des analyses libres d'accès des grandes tendances sous-tendant l'offre et la demande en matières premières minérales usuelles ou rares réalisées par quelques-uns des meilleurs spécialistes internationaux.

3. Lien direct vers ces documents : <http://www.mineralinfo.fr/page/metaux-strategiques>

4. <http://www.cercle-cyclope.com/>

De telles perspectives de croissance posent de nombreuses questions. Les ressources minérales disponibles et accessibles permettront-elles de tels rythmes d'exploitation ? Quel pourrait être le rôle des ressources minérales marines profondes dans ce contexte de forte croissance de la demande ? Les investissements, essentiellement privés, nécessaires à l'exploration puis à la mise en production de toutes les nouvelles mines seront-ils au rendez-vous ? Les impacts environnementaux et sociétaux de ces productions seront-ils gérables et compatibles avec les Objectifs de développement durable des Nations unies (ODD), publiés en 2015 ? Quels sont les défis auxquels se trouvent confrontées la France et l'Union européenne ?

Les progrès de l'économie circulaire peuvent permettre de réduire la demande en matières premières minérales primaires, c'est-à-dire extraites du sous-sol, sans toutefois permettre d'espérer que cela modifie radicalement le scénario évoqué ici.

Il existe aujourd'hui une prise de conscience croissante relative aux limites planétaires, tant au niveau des acteurs économiques que politiques. Le réchauffement climatique n'est qu'un aspect de ces limites, d'autres facteurs comme l'effondrement de la biodiversité, la déforestation des forêts tropicales, la perte de sols fertiles faisant peser de graves menaces sur l'avenir de l'humanité. Le concept d'économie circulaire offre, de ce point de vue, de nombreux leviers d'action pour réduire cette demande :

- l'amélioration des processus industriels nécessaires à la production des biens et services, depuis l'exploration et l'exploitation minières, le traitement des minerais, la métallurgie et le raffinage des métaux ;
- l'écoconception, pouvant permettre plusieurs bénéfices en termes d'utilisation durable des matières premières minérales (allègement du produit, réduction de la consommation en énergie au cours de sa phase d'utilisation, réduction du besoin en matières premières minérales nécessaires à la production, meilleures possibilités de maintenance et/ou de réutilisation de composants spécifiques du produit, meilleure recyclabilité) ;
- la réutilisation, après un processus de reconditionnement et de validation de composants spécifiques ;
- le recyclage des métaux et minéraux contenus dans les produits en fin de vie.

Mais l'économie circulaire ne pourra apporter qu'une réponse très partielle à la demande en matières premières minérales tant que perdureront les facteurs de croissance de la demande évoqués ci-dessus.

Disponibilité des matières premières minérales pour le futur

Le risque d'épuisement des ressources minérales ne paraît pas devoir être la principale menace à gérer dans les décennies à venir. L'industrie minérale dispose actuellement des technologies permettant l'exploitation souterraine de gisements jusqu'à une profondeur de 4 km dans les régions à gradient géothermique (élévation de la température avec la profondeur) faible. Les six mines les plus profondes du monde, des mines d'or sud-africaines, comportent toutes des zones exploitées entre 3 et 4 km de profondeur. Au Canada, les mines de Creighton (nickel) et de Kidd Creek (cuivre et zinc) descendent jusqu'à une profondeur comprise entre 2,5 et 3 km. En Europe, plusieurs mines en activité en Finlande, Pologne et Suède descendent à des profondeurs comprises entre 1 et 1,5 km.

De telles conditions demeurent exceptionnelles, la plupart des exploitations actuelles et passées n'ayant exploité que des gisements affleurant en surface, et ce sur des profondeurs n'excédant que rarement quelques centaines de mètres. En d'autres termes, seulement une toute petite partie des concentrations minérales d'intérêt économique potentiel contenues dans la partie économiquement accessible de la croûte terrestre (schématiquement, la tranche comprise entre la surface et 3 km de profondeur) a été identifiée à ce jour. Divers travaux scientifiques récents ont tenté d'évaluer les stocks de métaux potentiellement contenus dans cette tranche. Ainsi, le Service géologique des États-Unis (USGS) a conduit une évaluation internationale des stocks de cuivre potentiellement présents dans les zones géologiquement favorables à la présence de gisements de cuivre jusqu'à une profondeur d'1 km. Ce stock potentiel est estimé à près de 4 milliards de tonnes de cuivre métal, alors que les réserves⁵ de cuivre connues à l'échelle mondiale sont estimées à 830 millions de tonnes. Il permettrait de répondre à la demande mondiale résultant du scénario suivant.

5. Les réserves sont la partie du stock géologique dont l'exploitabilité à des conditions économiques satisfaisantes est démontrée par une étude de faisabilité du projet d'exploitation. Ces conditions étant variables, ces réserves fluctuent en fonction, notamment, des variations des cours des métaux.

D'une manière générale le stock géologique restant à découvrir dans les trois premiers kilomètres de la croûte terrestre devrait largement suffire à pourvoir aux besoins de l'humanité au cours de ce siècle. Les problèmes à venir ne seront vraisemblablement pas des problèmes d'épuisement des ressources. Il existe d'ailleurs de nombreux gisements connus, définis par des études de faisabilité, attendant les investissements nécessaires à leur mise en production.

Rôle des ressources minérales marines profondes

Dans ce contexte de forte croissance de la demande mondiale, les ressources minérales marines profondes⁶ représentent un enjeu considérable par la magnitude du stock de métaux potentiellement accessibles dans divers types de gisements (amas sulfurés liés aux fumeurs noirs, encroûtements cobaltifères, nodules polymétalliques, terres rares des boues sédimentaires des grands fonds du Pacifique). Ces ressources ne sont pas encore exploitées, mais elles pourraient l'être dans les années à venir.

Un seul projet est proche de la production, l'amas sulfuré à cuivre, zinc et or de *Solwara-1*, situé en mer de Bismarck, dans les eaux territoriales de la Papouasie-Nouvelle-Guinée. Ce projet, conduit par la société *Nautilus Minerals*⁷, a fait l'objet du développement d'équipements robotisés pour l'exploitation minière à environ 1 500 m de profondeur, une première mondiale. *Nautilus Minerals* peine cependant à réunir les capitaux nécessaires pour assurer la mise en production de ce gisement. Initialement prévue en 2019, celle-ci pourrait se trouver retardée de nombreuses années.

Un projet (2011-2016) cofinancé par la Commission européenne et mis en œuvre par la Communauté du Pacifique a permis de faire le point sur les connaissances relatives au patrimoine minéral marin des États insulaires membres de cette communauté, d'identifier les enjeux et de proposer des éléments du cadre institutionnel et réglementaire nécessaire à leur éventuelle mise en valeur dans

6. L'épithète « profondes » est utilisée pour distinguer celles déjà partiellement exploitées du plateau continental et des zones littorales. Ces ressources, de natures très différentes, résultent d'accumulations de minéraux denses provenant de l'altération et de l'érosion d'affleurements continentaux. Il s'agit pour l'essentiel des diamants du plateau continental au large de la Namibie, de la cassitérite (minerai d'étain) indonésienne et des sables noirs, véritables concentrés de minéraux lourds contenant des proportions variables d'un gisement à l'autre de grenats, d'ilménite et de rutile (minerais de titane), de monazite (minerai de terres rares), de zircon (minerai de zirconium et d'hafnium). Des gisements de sables noirs sont exploités dans plusieurs pays dont l'Afrique du Sud, l'Australie, l'Inde, la Malaisie, le Sénégal et la Sierra Leone.

7. <http://www.nautilusminerals.com>



Nodule polymétallique. © Géry Parent.

le futur⁸. De même, le gouvernement de la Polynésie française a fait réaliser par l'Institut de recherche pour le développement (IRD) une expertise collégiale relative à son patrimoine minéral marin profond et aux conditions qui seraient à développer pour en permettre une éventuelle mise en valeur future. Le rapport souligne l'existence ponctuelle d'encroûtements cobaltifères qui pourraient, si leur extension était prouvée et des méthodes d'exploitation respectueuses développées, représenter un atout pour le développement de cette collectivité d'outre-mer qui possède une zone économique exclusive d'une surface comparable à l'Union européenne.

De nombreux projets d'exploration et de développement technologique sont en cours, soit dans les eaux de la zone économique exclusive de certains pays, par exemple le Japon, soit dans les eaux internationales, cette exploration étant particulièrement active dans la zone de Clarion-Clipperton (Pacifique Est). Dans les eaux internationales, la régulation et l'attribution de permis reviennent à l'Autorité des fonds marins (*International Seabed Authority*), un organisme

8. Site Internet du projet, donnant accès à une riche documentation : <http://dsm.gsd.spc.int/>

intergouvernemental établi en 1994. Son site Internet⁹ permet d'accéder à une riche documentation scientifique et de suivre l'actualité de la recherche relative aux ressources des grands fonds marins située en dehors des zones économiques exclusives des différents pays.

Aujourd'hui, et peut-être pour longtemps encore, l'exploitation des ressources minérales marines profondes se heurte à deux grandes problématiques. La première, certainement la plus importante à l'heure où les grands équilibres écosystémiques se trouvent menacés, est celle des impacts environnementaux des exploitations. Personne n'a encore pu décrire les impacts sur l'écosystème océanique des bruits, des plumes sédimentaires et de la destruction de la faune benthique qui résulteraient d'une exploitation industrielle des ressources minérales marines profondes. Les connaissances relatives à la prévention de ces impacts sont encore embryonnaires. Sur le plan économique, la pertinence du recours à l'exploitation des matières premières minérales des grands fonds marins pose question, car il existe de nombreux gisements à terre attendant les investissements nécessaires à leur développement. Par ailleurs, il paraît plus facile de vérifier les performances environnementales d'une exploitation à terre et d'en corriger les éventuels impacts.

Les investissements nécessaires pour assurer les approvisionnements futurs seront-ils au rendez-vous ?

L'atteinte des objectifs de production décrits par le scénario ci-dessus demandera des investissements considérables¹⁰ dans l'exploration, pour identifier les gisements destinés à remplacer les réserves actuelles, mais aussi pour accroître fortement la production. Or, les investissements annuels en exploration minière sont en forte chute depuis 2012, année correspondant à un maximum historique de 21,5 milliards de dollars américains investis à l'échelle mondiale dans l'exploration des métaux non-ferreux (métaux précieux compris). En 2017, seulement 8,4 milliards de dollars furent investis (montants exprimés en monnaie courante), soit à peine 39 % du niveau atteint en 2012, 50 % de cet investissement allant à la recherche de gisements d'or. Il en résulte un sous-financement chronique de la recherche de gisements des matières premières minérales usuelles mentionnées ici. Et ceci alors même que l'exploration devient de plus en plus onéreuse, car la

9. <https://www.isa.org.jm/>

10. L'ordre de grandeur est de plusieurs centaines de milliards de dollars américains. La seule production de cuivre au Chili nécessitera, selon la Commission chilienne du cuivre, 65,4 milliards de dollars d'investissements au cours de la période 2018-2027 pour la maintenance des opérations actuelles et la mise en production de nouveaux gisements.

recherche de gisements profonds et cachés est nettement plus coûteuse, et risquée, que celle de gisements affleurants. Un autre facteur tirant les coûts à la hausse est la complexité croissante des études de faisabilité que les sociétés minières doivent produire en appui de leurs demandes de permis d'exploitation. Cette complexité croissante est liée à des exigences de plus en plus fortes de la part des autorités en matière d'identification des impacts environnementaux et sociaux des projets miniers et de définition de stratégies crédibles ayant pour objectif de les réduire autant que techniquement possible. Les deux ruptures catastrophiques de digues à stériles dans des mines brésiliennes de la société *Vale*, faisant de nombreuses victimes en 2015 et 2019, auront probablement comme conséquence une évolution des lois et codes miniers vers des pratiques environnementales encore plus rigoureuses. Cela devrait allonger le temps nécessaire entre la découverte de gisements et leur mise en production et augmenter les incertitudes inhérentes à tout projet minier. Il n'y a pas là de quoi attiser l'appétit d'investisseurs. Les marchés du cuivre et du zinc pourraient donc connaître de fortes tensions dans les années à venir.

Les impacts environnementaux et sociétaux de ces productions seront-ils gérables et compatibles avec les Objectifs de développement durable des Nations unies ?

Dans un monde qui se trouve confronté à des défis environnementaux menaçant la pérennité de l'espèce humaine, les politiques visant à la seule atteinte d'objectifs financiers à court terme risquent d'accélérer l'issue d'une catastrophe dont les prémices sont connues depuis plusieurs décennies. Les contraintes relatives aux ressources en eau, en terres fertiles, en biomasse, le réchauffement climatique et le risque de son emballement brutal au-delà de ce qui pourrait être gérable, la disparition rapide de nombreuses espèces vivantes et des services écosystémiques qu'elles rendent, les grandes tendances décrites ci-dessus rendent nécessaire de repenser en profondeur l'économie et la pensée politique mondiales, et cela paraît urgent. Ni les entreprises, ni les politiques ne peuvent continuer de générer les externalités de plus en plus massives actuellement observables, laissant au citoyen-contribuable la responsabilité de se débrouiller avec, alors qu'il a souvent contribué à les générer par ses choix de consommation.

Il y a urgence à redéfinir le terme de compétitivité. Fondée sur la seule dimension économique, elle conduit au moins-disant environnemental et social, c'est-à-dire à la catastrophe dont les sinistres contours sont de plus en plus précis au fur et

à mesure que passe le temps. Ce nécessaire travail peut et doit se faire dans le cadre des Nations unies. Il est indispensable si les États et les entreprises, qui se sont engagés en 2015 sur les ODD des Nations unies, veulent éviter au monde les pires convulsions.

Une gouvernance internationale des ressources naturelles impliquant les États, les entreprises et la société est indispensable, l'urgence appelle à son développement.

Dans ce contexte, le Groupe international sur les ressources des Nations unies a publié son rapport sur la gouvernance des matières premières minérales au XXI^e siècle en avril 2019. Il comporte de nombreuses recommandations relatives au développement d'une nécessaire gouvernance des matières premières minérales dont la production des plus usuelles représente de nos jours 16 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Elles forment un référentiel économique, environnemental et social constituant un permis d'exploitation « développement durable » (*Sustainable Development Licence to Operate*) intégrant les dimensions économiques, environnementales et sociales nécessaires pour permettre à l'industrie minière mondiale de maximiser ses contributions aux ODD.

Défis pour la France et l'Union européenne

Aujourd'hui, la France ne produit aucun des métaux qu'elle consomme et les importe bien souvent de pays situés à l'extérieur de l'Union européenne. La situation de l'UE est très variable selon les matières premières, comme le montrent les exemples du tableau ci-contre.

Alors qu'elle représentait 21,7 % du PIB mondial en 2016, elle n'a produit qu'entre 10 % (cas de l'acier, cependant largement produit à partir de minerai de fer importé, la production européenne ne représentant que 1 % de la production mondiale) et 0 % de métaux. Sa situation est celle d'une très forte dépendance aux importations. Même lorsqu'elle produit certains métaux au stade de la métallurgie, cette production est largement fondée sur l'importation des minerais nécessaires (voir le tableau sur le cas de l'aluminium et de l'acier), sans pour autant contrôler l'amont minier dont elle dépend.

La situation de dépendance de l'Europe et de la France contraste fortement avec celle de la Chine. Ce pays est devenu de manière très volontariste, en l'espace de trois décennies, le premier producteur mondial de plus de trente matières premières

**Part de l'UE dans la production mondiale 2016 (sauf ciment, production 2015),
exprimée en tonnes d'une sélection de matières premières minérales**

Matières premières	Production minière (PM)	Source	UE-28	Monde	Part de l'UE
Bauxite	PM	WMD	1 944 190	284 933 806	0,7 %
Aluminium	Production métallurgique	WMD	2 249 935	58 804 268	3,8 %
Minerai de fer	PM	WMD	18 179 223	1 575 123 716	1,2 %
Acier	Production métallurgique	SSY	162 024	1 626 954	10,0 %
Chrome (Cr2O3)	PM	WMD	469 140	13 092 060	3,6 %
Ciment (2015)	Production industrielle	USGS	169 953 000	4 100 000 000	4,1 %
Cobalt	PM	WMD	2 308	126 234	1,8 %
Cuivre	PM	WMD	931 386	20 417 159	4,6 %
Germanium	Production métallurgique	WMD	–	122	0,0 %
Lithium (Li2O)	PM	WMD	314	78 549	0,4 %
Manganèse	PM	WMD	18 440	15 414 509	0,1 %
Molybdène	PM	WMD	–	279 309	0,0 %
Nickel	PM	WMD	43 454	1 953 503	2,2 %
Niobium	PM	WMD	–	91 827	0,0 %
Phosphates	PM	WMD	338 230	83 983 506	0,4 %
Zinc	PM	WMD	698 141	12 524 698	5,6 %

Source : WMD, Reich *et al.*, 2018 ; WSA, World Steel Association, 2018 ; USGS, Van Oss H. G., 2017 - Cement - Chapter on cement in vol. 1 on Minerals and Metals of the Minerals Yearbook - USGS - <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/myb1-2015-cemen.pdf>

minérales essentielles à l'économie mondiale, développant des filières verticalement intégrées, de la mine à la production industrielle d'une gamme sans cesse plus large de biens inondant les marchés mondiaux. L'État joue un rôle central dans le développement de ces filières industrielles par le biais des financements qu'il accorde aux entreprises en direct ou *via* ses déclinaisons régionales.

La stratégie industrielle de l'Union européenne et de la France est quasiment inexistante, le rôle de la puissance publique se limitant à essayer d'organiser un libre échange mondial sans distorsions de concurrence, laissant aux entreprises le soin d'organiser leurs chaînes de valeur à l'échelle mondiale au mieux de leurs intérêts financiers. La notion de politique industrielle est quasiment absente du langage politique français et européen, dominé par la mystique de la libre concurrence. Le traité sur l'Union européenne (Traité de Lisbonne) ne conférant aucune compétence à l'Union dans le domaine des matières premières minérales, celle-ci ne peut développer de stratégies industrielles nécessitant la maîtrise des sources d'approvisionnement.

En ce qui concerne les matières premières minérales, l'Union européenne ne peut agir que dans les domaines de l'environnement, de la libre concurrence et du marché unique, du commerce, de l'énergie et de l'enseignement supérieur et de la recherche. Elle n'a pas les bases juridiques, ni les moyens matériels, pour pouvoir consolider ses actions dans ces différents domaines – par ailleurs de tailles modestes vu la faiblesse de son budget – en une politique industrielle visant à se positionner de manière équilibrée face aux grands blocs économiques du début du XXI^e siècle que sont les États-Unis et la Chine. L'entrée en lice progressive de l'Inde comme nouvelle superpuissance mondiale élargira encore le risque de l'émergence d'un ensemble de nouveaux empires économiques et politiques, alors que plus que jamais le monde a besoin d'approches multilatérales pour gérer intelligemment les défis auxquels l'ensemble de l'humanité se trouve confrontée.

La politique européenne telle qu'elle est à ce jour contraste fortement avec la stratégie économique et politique chinoise, élaborée avec constance depuis l'ère de Deng Xiao Ping, dirigeant de 1978 à 1992 et véritable fondateur de la Chine moderne. Le gouvernement chinois a clairement affiché ses ambitions industrielles à long-terme dans nombres des industries innovantes qui structureront l'économie de ce siècle : énergies renouvelables, électromobilité, technologies de l'information et de la communication. Aujourd'hui ce pays produit plus de 50 % du cobalt, du gallium, du tantale, du tungstène, du vanadium, des terres rares et détient des participations financières importantes dans des producteurs australiens et chiliens de lithium ou dans le capital d'un des trois producteurs mondiaux de niobium. Ceci renforce non seulement son industrie avale, soutenue par un effort massif dans l'enseignement et la recherche, mais aussi sa capacité à peser sur les cours de nombreuses matières premières et ainsi limiter la concurrence. Malheureusement, à ce jour, la Chine n'a officiellement rejoint aucune des initiatives existantes visant

à améliorer la transparence ainsi que la responsabilité environnementale et sociale de l'industrie minière mondiale.

Cette situation est une menace pour l'avenir de l'Union européenne et de ses États membres, menace face à laquelle nos institutions et notre société sont dans une situation de faiblesse, très bien illustrée par le cas des terres rares décrit par Guillaume Pitron dans son livre *La guerre des métaux rares* paru en 2018. Il ne reste qu'à espérer que la prise de conscience des énormes défis de développement durable auxquels l'humanité entière se trouve confrontée permettra d'esquisser une gouvernance mondiale dont le besoin se fait pressant.

Dépendance énergétique : développement et protection des flux stratégiques maritimes

Capitaine de frégate Franck MAIRE

Bureau stratégie et politique – Cabinet du chef d'état-major de la Marine

En 2015, la Tasmanie, une île peuplée de plus d'un demi-million d'habitants, située au sud de l'Australie, a été privée d'électricité pendant près de six mois. L'île s'est retrouvée en état d'urgence électrique et une centaine de groupes électrogènes a dû être acheminée. Comment une telle situation a-t-elle pu se produire ? L'explication est simple : si l'île est théoriquement capable de produire sa propre électricité grâce à ses centrales hydroélectriques, elle est aussi reliée à la côte sud de l'Australie par le *Basslink*, câble électrique sous-marin HVDC (haute tension courant continu) de 370 km qui sert d'alimentation de secours et transporte la production excédentaire des barrages vers l'île-continent. Mais cette année-là, la Tasmanie a connu une période de sécheresse qui a entraîné un niveau très bas des retenues d'eau, impactant sa propre production d'électricité. Le *Basslink*, capable d'absorber 500 MW, a été naturellement sollicité mais cette sur-sollicitation a entraîné sa fusion partielle à 100 km des côtes. Le dysfonctionnement de cette voie d'approvisionnement énergétique a eu des conséquences désastreuses pour l'île. Cet exemple parmi d'autres démontre une dépendance souvent sous-estimée aux flux énergétiques qui transitent le plus communément dans le milieu océanique. Cette dépendance concerne en réalité aujourd'hui un grand nombre d'États, dont la France, et justifie le fait de déployer des moyens conséquents qui garantiront la protection de l'ensemble des flux énergétiques à travers le monde.

Une dépendance énergétique accrue, y compris pour la France

Malgré les prises de conscience environnementales récentes, nos sociétés actuelles et futures sont et seront gourmandes en énergie. En quatre décennies, la consommation énergétique mondiale a presque doublé chaque année. Nos transports, notre industrie, nos services, nos habitats ou notre agriculture sont dépendants de la fourniture d'énergie. En France, la répartition de la consommation d'énergie finale (c'est-à-dire après transformation) est de l'ordre de 44 % de produits pétroliers, 22 % de gaz naturel, 14 % d'énergies renouvelables – ces trois pourcentages s'entendant hors électricité – et 25 % d'électricité, cette dernière étant à plus des deux tiers d'origine nucléaire¹ et à 20 % renouvelable (hydraulique, éolien, solaire, bioénergies). Pour les énergies renouvelables, la source est en accès libre (vent, soleil, courant de marées...) mais sa transformation en électricité dépend de matières premières peu ou pas disponibles sur notre territoire. L'éolien, l'hydrolien ou le photovoltaïque sont encore tributaires de ressources dites

1. 72 % nucléaire, 12 % hydraulique, 7 % gaz, le fioul et le charbon ne comptant que pour 2 %.

critiques, notamment de « terres rares² ». Le stockage électrique pour sa part, en particulier pour les batteries, est consommateur de lithium, de cobalt et de nickel dont les zones de production sont très éloignées.

Des flux qui transitent à travers le monde

Les pays friands d'énergie ne sont pas ceux qui en produisent le plus et les zones les plus densément peuplées ne sont pas toujours les mieux nanties en matières premières ou en sources renouvelables. Les pays d'Europe, berceaux de la révolution industrielle et gros consommateurs, même s'ils montrent des disparités, ont pour la plupart des besoins stratégiques d'approvisionnement auprès de fournisseurs externes plus ou moins lointains. La France ne fait pas exception. Même si notre pays est probablement parmi les plus indépendants sur le plan de la production énergétique, il a besoin d'importer régulièrement des matières premières, notamment des métaux critiques, et des énergies sous formes fossiles. Or, les stocks de ces matières premières indispensables à la fourniture d'énergie ne sont pas toujours situés sur nos territoires, ce qui explique qu'elles doivent être transportées vers les lieux de consommation et de transformation. La France importe ainsi 99 % de sa consommation en charbon, pétrole, gaz naturel, mais aussi uranium. Comment transitent ces matières premières devenues vitales pour le bon fonctionnement de notre société ? Une grande partie *via* le milieu maritime au sein duquel se sont développées des artères essentielles pour le flux de matières premières, mais qui parfois peuvent être vulnérables. Afin de garantir ces approvisionnements, nous devons nous prémunir contre des risques et des menaces de plus en plus nombreux (piraterie, terrorisme, catastrophes naturelles...) qui pèsent sur ces stocks et flux énergétiques. Compte-tenu de la complexité des situations géopolitiques desquelles naissent bien souvent ces risques et menaces, la Marine nationale a un rôle clef à jouer dans la sécurisation de ces approvisionnements stratégiques vitaux.

Un flux, trois segments

L'approvisionnement en matières premières énergétiques d'intérêt vital, quelle que soit leur forme (gazeuse, liquide ou solide), peut être segmenté en trois grandes étapes : production, transport et réception, avec des caractéristiques variables.

2. Ces métaux sont également incontournables aujourd'hui dans la fabrication des aimants permanents, des poudres de polissage, de verres et de céramiques. Le raffinage du pétrole, les générateurs électriques et la plupart des écrans (LCD, smartphones...) sont consommateurs de « terres rares ».

Première étape : elles doivent être extraites et conditionnées. Cette première étape peut être source de vulnérabilités en fonction de la situation physique et géopolitique du site de production. Une mine à ciel ouvert dans un pays ami comme l'Australie n'est pas soumise aux mêmes menaces qu'une plate-forme pétrolière ou une usine de liquéfaction de gaz au large du Nigeria. Une tendance lourde peut être constatée dans la géographie des lieux d'extraction : en raison de la diminution des potentialités terrestres, les zones productrices sont le plus souvent en mer, à l'image des champs gaziers israéliens, égyptiens et chypriotes en Méditerranée orientale, australiens en océan Indien, du pétrole sud-américain et, déjà, des possibilités offertes par l'Arctique. Et quand bien même l'extraction ne serait pas *offshore*, les gisements prometteurs se trouvent souvent dans des secteurs où le transport maritime est incontournable.

Deuxième étape : le transport. Certains volumes peuvent être acheminés par voie terrestre (route, rail, gazoduc, oléoduc...) mais les plus gros transitent par voie maritime ou fluviale : plus de 60 % du trafic mondial de brut est assuré par la mer. Pour la France, 99 % du pétrole importé est acheminé par cette voie, en provenance principalement du Moyen-Orient, de la CEI (Kazakhstan et Russie en tête) et du continent africain (Nigeria, Algérie, Libye)³. Pour le gaz⁴, la configuration est différente. Le gaz naturel liquéfié (GNL), qui représente 32 % des flux totaux de gaz naturel dans le monde, est acheminé par méthaniers. Il constitue entre le tiers et le quart des approvisionnements nationaux selon les années. Le reste est reçu sous forme gazeuse *via* des gazoducs, dont certains sous-marins (atterrage à Dunkerque du *Franpipe* en provenance des champs norvégiens). Il n'y a pas d'arrivée de gazoduc sur la côte méditerranéenne⁵. Il est à souligner que la dépendance au gaz de l'Europe occidentale est en hausse, tant en raison de l'accroissement de la production électrique d'origine gazière que de l'appauvrissement des réserves domestiques. Dans cette augmentation, la part du GNL est croissante et par conséquent, l'importance de son transport⁶. Pour le combustible nucléaire, la France a besoin d'environ 9 000 t/an d'uranium naturel, dont la totalité est importée, pour alimenter son parc de 58 réacteurs. Les sources d'approvisionnement se situent dans différentes zones géographiques,

3. En 2017 : 24 % du Moyen-Orient (11 % pour l'Arabie saoudite), 27 % d'Afrique, 18 % du Kazakhstan et 15 % de Russie.
4. En 2017 : 43 % de Norvège, 21 % de Russie, 11 % Pays-Bas et 10 % Algérie. 24,4 % sous forme de GNL (Qatar, Algérie, Nigeria) re-gazéifié dans l'un des sites métropolitains (Fos, Montoir, Dunkerque).

5. Les productions algérienne et libyenne sont écoulées vers la métropole *via* l'Italie et l'Espagne (gazoducs *Trans-Mediterranean*, *Galsi*, *Greenstream* pour la première, *Maghreb-Europe* et *Medgaz* pour la seconde).

6. Le GNL devient rentable par rapport au transport par gazoduc sur de grandes distances : 3 000 km pour 3 mds de m³/an, 6 000 km pour des volumes de 25 mds de m³/an. Pour de courtes distances, Norvège ou Algérie, le gazoduc est plus adapté, mais pour le Qatar ou l'Australie, le méthanier est préférable.

principalement au Niger, au Canada, en Australie et au Kazakhstan⁷. Pour parvenir aux centrales métropolitaines, cet uranium emprunte obligatoirement un tronçon maritime. Comme il est peu crédible que la France renonce à l'électricité nucléaire dans les quinze ans, sauf catastrophe majeure, ce flux reste primordial.

Dernière étape: la réception de la matière première énergétique et son éventuel reconditionnement pour être soit directement transformée soit transportée par un autre moyen. Cette opération s'effectue dans une infrastructure portuaire⁸ pour les navires ou dans des terminaux spécialisés pour les gazoducs/oléoducs. Les produits sont dès lors transformés en électricité ou raffinés, puis distribués. Leur transit maritime est alors achevé. Certains hydrocarbures raffinés peuvent être ultérieurement exportés⁹, principalement par voie terrestre ou fluviale. Hors électricité non nucléaire, l'approvisionnement énergétique de la France se fait donc en majeure partie par voie maritime.

Flux et géographie

Nos flux d'approvisionnement énergétique dépendent en très grande partie de l'extérieur, qu'ils soient terrestres ou maritimes. Dans un futur proche, la dépendance nationale évoluera certainement grâce aux énergies renouvelables, dont une partie substantielle sera produite en mer¹⁰, mais aussi aux optimisations du stockage, au changement des modes de consommation ou à une plus grande sobriété *via* les économies d'énergie. Cependant, comme la dépendance aux combustibles et carburants fossiles demeurera, la sécurisation du transport de ces matières restera primordiale. L'avantage de la voie maritime est que le point d'origine du flux peut être modifié plus aisément que celui du tracé d'oléoducs ou de gazoducs, même gérés en réseau. C'est la raison pour laquelle une gestion géopolitique de nos sources est indispensable. Nous devons toujours identifier les vulnérabilités du canal d'approvisionnement qui nous relie à ces sources. Le développement de l'exploitation des réserves *offshore* peut aussi être à l'origine de différends de souveraineté entre nos fournisseurs potentiels, ce qui pourrait, à l'avenir, aller jusqu'à entraîner des conflits étatiques de forte intensité.

7. En 2016, plus des deux tiers de la production mondiale d'uranium provenaient des mines de trois pays: Kazakhstan (39,4 % de la production mondiale en 2016), Canada (22,5 %) et Australie (10,1 %).

8. L'importation de la totalité du pétrole brut se fait *via* trois ports: Marseille (43 %), Le Havre (43 %) et Saint-Nazaire (13 %), où sont localisées six des huit raffineries métropolitaines.

9. La France est exportatrice d'essence et de fioul de propulsion navale, importatrice de carburants diesel et aviation (kérosène). La tendance pourrait évoluer avec l'évolution de la motorisation des véhicules.

10. En particulier par des fermes d'éoliennes fixes ou flottantes, des systèmes hydroliens ou des réacteurs nucléaires flottants (*Small Modular Reactors*).

La France reste très tributaire du pétrole et du gaz, mais ces fluides ne proviennent pas tous du même bassin d'extraction et n'empruntent pas le même parcours. Il en est de même des terres rares, même si pour le moment la Chine reste notre principal fournisseur¹¹. Pour les métaux critiques, la production de lithium est concentrée dans l'hémisphère Sud (Australie, Chili, puis Argentine), la Chine n'étant qu'au quatrième rang. Pour le cobalt, le principal producteur est la République démocratique du Congo (65 % du total mondial), suivie de la Chine, du Canada et de la Russie, quasiment au même niveau, autour de 7 %. De plus, la production du minerai doit être différenciée de celle du métal raffiné. Dans le domaine énergétique, le choix des fournisseurs est donc crucial. Les pôles d'origine des flux nationaux maritimes sont répartis sur quelques grandes zones productrices : Moyen-Orient, Afrique de l'Ouest et du Nord et CEI avec des évolutions prévisibles pour le gaz (Égypte, Arctique, Trinité-et-Tobago, Australie) et des fluctuations certaines pour les métaux critiques (attitude chinoise face à l'offre et la demande domestique). Pour le trafic maritime, certains points de passage obligés (PPO) existent et perdureront : les détroits d'Ormuz, de Bab el-Mandeb et le canal de Suez sont des artères énergétiques de première importance pour les hydrocarbures, le pétrole en particulier¹². Le canal du Mozambique constitue une route alternative qu'il ne faut pas non plus négliger. En effet, par sa souplesse, le transport maritime autorise non seulement la diversification des sources et des partenaires commerciaux, mais aussi le choix de l'itinéraire emprunté. Les routes océaniques n'étant pas uniques, un contournement de ces points de passage qui, de fait, ne sont plus « obligés » est toujours possible. On peut s'affranchir du goulot Bab el-Mandeb – Suez¹³ par le cap de Bonne-Espérance. La durée de transit entre le golfe Arabo-Persique et nos ports pétroliers est certes augmentée, mais cet itinéraire autorise le transport par VLCC/ULCC (*Very/Ultra Large Crude Carriers*, supérieurs à 200 000 tonnes de port en lourd de brut) plus rentables que les *Suezmax* limités par le gabarit du canal.

Autre avantage du transport maritime, le risque pesant sur les navires est moins important que celui qui pèse sur les infrastructures terrestres, oléoducs et gazoducs en particulier. L'immensité des océans et la mobilité des navires permettent de s'affranchir partiellement du marquage ou de l'empreinte terrestre des installations de transport d'énergie.

11. La Chine produit 89 % des besoins mondiaux et abrite 44 % des réserves connues, mais représente 67 % de la consommation. La production australienne s'élève à 9 %, deuxième rang mondial.

12. Pour d'autre pays, Australie, Japon, Chine ou Corée du Sud par exemple, le détroit de Malacca est un passage incontournable pour les flux énergétiques. En Europe, les détroits turcs sont également de grande importance pour le transit vers la Méditerranée d'une grande partie du pétrole azéri ou kazakh.

13. Cette situation s'est produite entre 1967 et 1975 à la suite de la Guerre des Six jours et de la fermeture du canal en raison des explosifs immergés. La Marine nationale avait largement contribué à sa réouverture.

Des voies maritimes vulnérables aux menaces

La vulnérabilité des routes maritimes ne peut être néanmoins occultée. La nature même des navires de transport d'énergie (*tankers* surtout) est génératrice de risques. Ce sont des cibles attirantes car relativement lentes, basses sur l'eau en pleine charge, potentiellement inflammables et nécessitant d'énormes distances d'arrêt du fait de leur inertie ; ces navires constituent donc de potentielles « bombes flottantes ». En outre, les méthaniers et pétroliers (contrairement aux transports d'uranium) ont des trajets connus, prévisibles, programmés dans le temps et l'espace, et empruntent des PPO. Même si les zones d'opération ne sont pas identiques, les plates-formes d'extraction pétrolière ou gazière ne sont pas à l'abri de dangers potentiels, en raison de leur isolement en mer et de la nécessité de les ravitailler par d'autres navires. Enfin, la multiplication de satellites permettra à tous ceux qui auront accès à ces données de suivre les mouvements de n'importe quel navire quasiment en temps réel.

De manière plus générale, les menaces qui portent sur les flux maritimes peuvent être rangées dans trois grandes catégories susceptibles de s'interpénétrer et de se corréler dans l'espace, le temps ou en raison des objectifs recherchés par le ou les agresseurs éventuels. Terrorisme maritime, piraterie ou menaces étatiques peuvent peser sur nos flux énergétiques en provoquant des ruptures plus ou moins longues dans la chaîne d'approvisionnement. Même si leurs modes opératoires et objectifs peuvent être très différents, allant du gain financier immédiat pour le brigandage à l'obtention d'un avantage politico-stratégique pour un État agressif, les effets sur notre Nation seront puissants, avec probablement des conséquences directes.

La piraterie, opportuniste par essence, sera génératrice de nuisances et de coûts mais n'occasionnera pas de rupture d'approvisionnement. Si elle peut créer un événement médiatique (prise d'otages), sa concentration zonale (actuellement le golfe de Guinée) n'affectera que marginalement les importations de brut et de gaz. Par sa localisation dans les approches nigérianes, elle affecte ainsi les pétroliers, les plates-formes et navires de soutien, tout comme les terminaux de chargement, mais ne perturbe que marginalement la chaîne globale.

Le terrorisme maritime, quant à lui, peut concerner les trois segments et viser des cibles sur le sol national, y compris outre-mer¹⁴. Ses objectifs stratégiques sont

14. La *Société anonyme de la raffinerie des Antilles* (SARA) possède une unité de raffinage en Martinique et des dépôts en Guadeloupe et Guyane avec appointements. Elle reçoit du brut du Venezuela et d'Afrique de l'Ouest et alimente en produits pétroliers les trois départements français d'Amérique.

de menacer ou de perpétrer des actions violentes pour perturber les infrastructures et les flux d'échanges afin de déstabiliser un gouvernement ou une population. Il peut être transnational, d'origine idéologique, ethnique ou religieuse, mais également être soutenu par un État sous forme de proxys¹⁵ bien équipés et entraînés. Il reste d'importance très marginale comparé à sa forme terrestre ou au regard du reste des activités criminelles en mer. Toutefois, tout comme les attentats à terre, dans nos villes, son poids médiatique et ses conséquences politiques et stratégiques sont démesurés par rapport aux moyens engagés, généralement de petites embarcations rapides, basses sur l'eau, des explosifs artisanaux et des équipages restreints. Le terrorisme sous les formes connues à ce jour peut sérieusement menacer les flux de deux manières : un mode opératoire qui ferait peser une insécurité extrême sur un point de passage obligé pour un flux majeur (blocage d'Ormuz pour les transports d'hydrocarbures) ou une attaque sur une infrastructure d'intérêt vital pour l'approvisionnement énergétique du pays (complexe Fos-Lavera-Martigues). Dans les deux cas, ce seront des actions planifiées, avec une préparation et de la logistique, voire le soutien d'un État hostile.

Cette menace terroriste en milieu maritime est protéiforme et les scénarios ne manquent pas, du blocage de chenaux portuaires par échouage à la prise de contrôle d'un méthanier-suicide, en passant par le verrouillage d'un détroit par minage ou missiles sol-mer côtiers.

Il est nécessaire de souligner la frontière floue qui existe entre des actions terroristes soutenues par une puissance et une crise volontairement déclenchée par un État qui instrumentaliserait l'énergie dans le cadre d'une politique de guerre. La différence peut se situer dans l'intensité : une fermeture de détroit ou un embargo total poserait plus de difficultés au consommateur/client mais aussi à l'attribution de la responsabilité au niveau des relations internationales. Une action d'un État peut difficilement se protéger derrière l'anonymat, celle de factions téléguidées laisse une part d'ambiguïté.

La comparaison entre les détroits d'Ormuz et de Bab el-Mandeb est intéressante : l'Iran a plusieurs fois agité la menace d'une fermeture d'Ormuz par ses propres forces régulières ou assimilées (IRGC). Cependant, s'il priverait les pays du Golfe de leur artère d'exportation, il se pénaliserait fortement lui-même pour vendre son brut et importer les produits pétroliers raffinés dont il est dépendant. En revanche,

15. Factions armées entraînées et téléguidées par un État pilote qui les utilise en lieu et place d'une armée officielle : le Hezbollah ou les Houtis pour l'Iran, par exemple.

une utilisation de groupes armés avec un *modus operandi* terroriste (rébellion houtie, Hezbollah ou autres) interdisant le transit par la mer Rouge serait plus handicapante pour l'Europe occidentale et moins signante.

Les modes opératoires sont extrêmement variés : l'action de haute intensité sur les *tankers* ou méthaniers, la destruction de gazoducs sous-marins, l'interdiction de zone par minage offensif, l'obstruction d'un canal après prise de contrôle d'un navire... toutes les options et combinaisons d'agressions sont possibles. Néanmoins, une menace moins violente mais extrêmement perturbatrice peut se révéler la plus dangereuse : la cyberattaque sur les systèmes numérisés de gestion du trafic et des cargaisons maritimes. Les systèmes bancaires et de contrôle du trafic aérien ont déjà été victimes d'actions de lutte informatique offensive. Leurs cyberdéfenses ont été considérablement durcies, mais qu'en est-il du trafic maritime dans sa globalité ? Un acte malveillant sur la gestion des cargaisons de liquides, la pression d'un gazoduc ou la température d'une unité de liquéfaction ou encore une attaque cyber ou électromagnétique sur les systèmes de positionnement et de navigation sont envisageables et auraient probablement des effets désastreux sur les flux énergétiques.

Une sécurisation des flux indispensable

L'accessibilité des grands axes maritimes est stratégique et vitale. Nos espaces maritimes ont une profondeur variant en fonction du risque ou de la menace au regard du délai nécessaire pour mettre en œuvre une parade. Leur maîtrise, à défaut de leur contrôle, est capitale. Il convient donc de les connaître, d'y surveiller les flux, d'y réguler les activités pour garantir, à tout moment, notre défense et notre sécurité, faire respecter nos droits souverains et prévenir toute menace qui pourrait affecter notre territoire.

Pour sécuriser les flux et ainsi renforcer la sûreté de la France, la protection et le développement de ses intérêts, la première démarche passera par une amélioration de la gouvernance de nos espaces maritimes en confortant le modèle national pour l'action de l'État en mer et en renforçant la cohérence de la fonction garde-côtes. L'outil législatif face aux risques et menaces devra être adapté en fonction de leurs évolutions. Une meilleure connaissance de nos espaces, permanente et continue, doit également être recherchée. Pour agir, il faut connaître et anticiper. Le recueil, l'exploitation, la fusion et l'analyse de l'information maritime sont primordiaux. Du contrôle naval volontaire à l'usage des satellites d'observation,

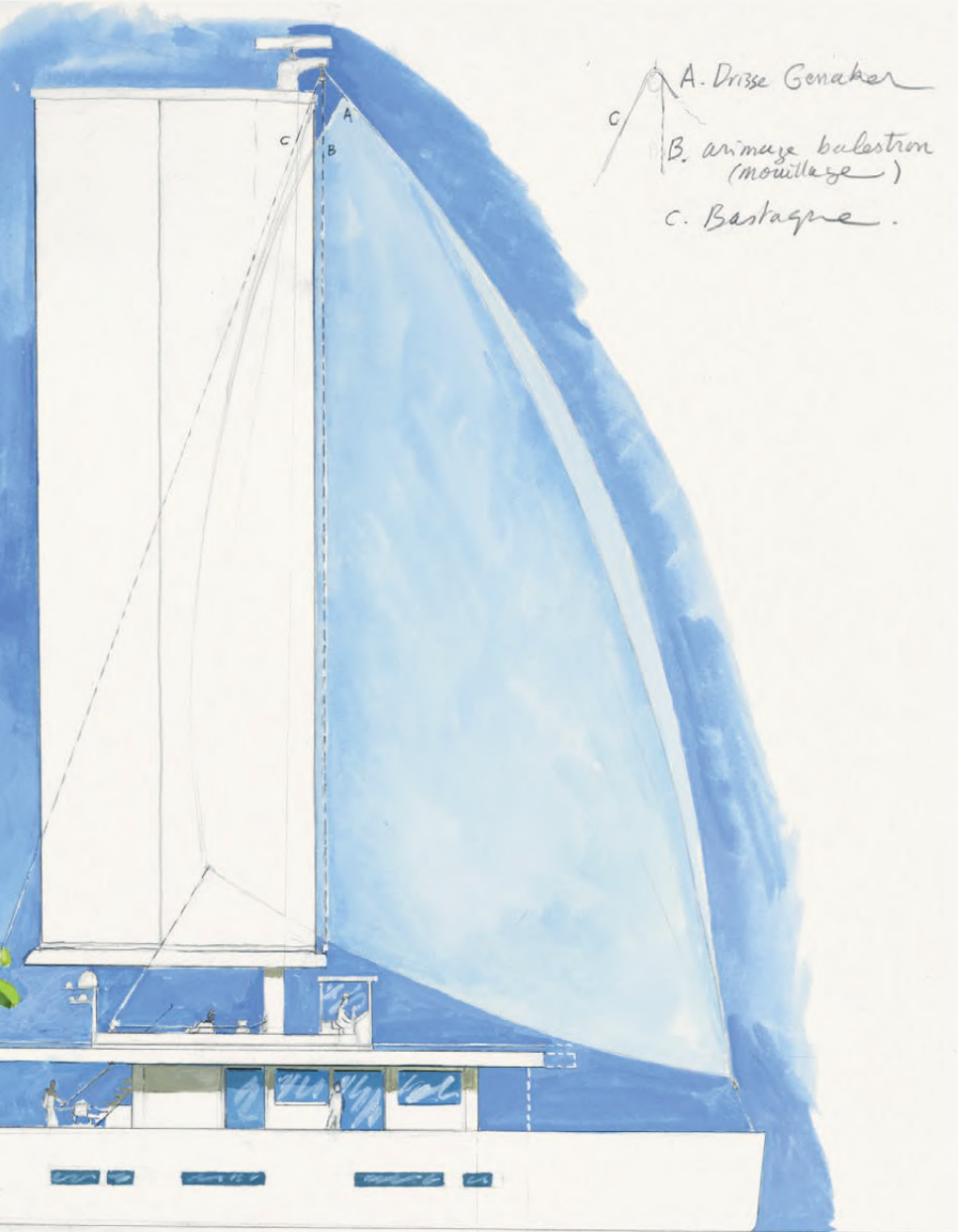
des vols de surveillance maritime aux interceptions électromagnétiques, tous les moyens, militaires ou civils doivent être sollicités pour élaborer une situation maritime cohérente et complète dans l'environnement de nos flux. L'acquisition d'une quantité de renseignements et de données pléthorique devra être valorisée par une analyse pertinente et une prise de décision dans lesquelles le recours aux processus d'intelligence artificielle sera indispensable. Enfin, donner du préavis à la chaîne décisionnelle est nécessaire mais pas suffisant si nous ne sommes pas capables d'agir. La sécurisation de nos voies d'approvisionnement énergétique passe par des moyens d'action. Du chasseur de mines qui assainit les chenaux portuaires jusqu'aux unités de première ligne qui peuvent escorter des convois, en passant par des équipes de commandos embarqués, les unités de la Marine nationale sont et resteront l'outil le mieux adapté pour protéger nos flux et garantir nos approvisionnements, donc notre sécurité.

Nous vivons dans un monde de flux et de stocks qui sont vitaux pour le commerce, les communications ou l'énergie. Les réserves changent, les débits augmentent, mais les besoins subsistent et s'accroissent. Dans ce contexte, la France a des intérêts stratégiques et économiques primordiaux à défendre, tant vis-à-vis de ses approvisionnements vitaux, en particulier énergétiques, que pour la promotion et la défense d'opérateurs nationaux majeurs. Ils sont vulnérables et peuvent être menacés à tous les niveaux et par de multiples acteurs, criminels opportunistes, terroristes, puissances étatiques qui utiliseront tout le spectre de la violence et des technologies performantes. Pour protéger notre population et le fonctionnement quotidien de notre économie, des instruments étatiques puissants sont indispensables. La Marine nationale, par sa polyvalence, sa flexibilité, sa présence permanente ou régulière dans tous les espaces océaniques et sa connaissance du domaine maritime est un outil majeur pour apporter les réponses nécessaires aux menaces futures sur nos approvisionnements.

Mais la multiplicité des enjeux et l'immensité des zones à couvrir rend cette tâche difficile à réaliser sans une complémentarité de moyens : une connaissance du trafic mondial et des outils de traitement pour détecter les signaux faibles ; des moyens de surveillance (satellites, radars, aéronefs, drones, navires...) pour identifier et caractériser les menaces potentielles ; des moyens nautiques adaptés (hélicoptères, embarcations...) pour intervenir *in fine* contre cette menace ; sans oublier le cadre juridique indispensable pour conduire l'action efficacement.



Le Bateau-atelier,
étude pour un catamaran, 2017.
© Titouan Lamazou.



A. Drisse Genaker

B. armure balestron
(mouillage)

C. Bastagne.

Agrandir
surface Atelier? →

« Le bateau-atelier, un retour aux sources »

Entretien avec Titouan LAMAZOU,
Artiste et navigateur

Études Marines: Le Bateau-atelier est un navire s'inscrivant dans une logique de développement durable; cette préoccupation était-elle présente dès l'origine du projet?

Titouan Lamazou: Ce bateau et son usage sont le fruit d'intuitions qui se sont bâties au cours de mes voyages, au fil des années, à la croisée de mes sillages. J'y songe depuis toujours, mais il y a quarante ans, le développement durable n'était clairement pas au cœur du projet. Nous vivions la fin des Trente Glorieuses, mais nous ne le savions pas encore et nous n'avions pas conscience de ses effets profondément délétères. À cette époque, au cours de mes premières navigations avec Éric Tabarly, ces considérations ne nous effleuraient pas, bien que ma vocation maritime fût influencée par la lecture de Bernard Moitessier, l'un des premiers « lanceurs d'alerte ». Pourtant aujourd'hui, lorsque je regarde en arrière, je me rends compte qu'Éric, par son mode de vie économe, était comme Bernard, un écologiste avant l'heure qui prônait le dénuement par l'exemple. Ce n'est que petit à petit que je me suis éveillé à une conscience militante, à ces préoccupations ressenties jusqu'à de manière intuitive – du fait d'une vie passée à côtoyer la nature, en montagne ou en mer. De plus, les phénomènes de pollution maritime sont insidieux, on ne s'en aperçoit pas vraiment... On parle aujourd'hui du plastique dans les océans, mais en réalité ce sont majoritairement des micro-plastiques, invisibles à l'œil nu. On va être choqué par celui qui parsème les rivages, mais en mer on ne les voit pas alors qu'ils sont, nous le savons aujourd'hui, encore plus néfastes à la biodiversité. Tout ceci pour dire que je n'étais pas sensibilisé à ces questions au départ. Le concept initial du Bateau-atelier était plus « anthropocentré » et concernait essentiellement la merveilleuse diversité de l'humanité. Des chercheurs sont venus renforcer l'équipage: le concept est dorénavant un plaidoyer « Arts et Sciences » étendu à l'immense biodiversité à laquelle appartient cette humanité, un plaidoyer pour la préservation de l'environnement. Le navire lui-même se doit d'être un manifeste environnemental, un compromis le plus vertueux possible avec un objectif: émission zéro.

C'est une façon aussi de reprendre une certaine forme d'errance...

Une façon plutôt de continuer l'errance, mais cette fois en retrouvant la lenteur qui lui convient. Aujourd'hui, tout va vite. Le monde ne sait pas où il va, mais il y va vite! Quand je vais à Bordeaux, je mets deux heures quand j'en mettais trois l'année dernière... Je ne suis pas mécontent, mais qu'est-ce que j'y ai gagné? Lorsque Cendrars se rendait à New York, à bord de paquebots, ça lui prenait huit jours.

Il n'y avait pas le *Concorde*, mais il y écrivait ses plus beaux poèmes. Les États-Unis n'en étaient pas moins déjà un grand pays. Il y a un siècle, c'était les prémices de l'automobile et, aujourd'hui, sept personnes sur dix se rendent à leur travail en voiture. Les tours n'existent que par l'invention de l'ascenseur, les banlieues-dortoirs où personne ne se côtoie que par l'avènement de l'automobile. Ce « progrès » a généré des routes, des infrastructures coûteuses, des accidents, du stress, des PV, une sorte d'esclavage... On s'est drôlement compliqué la vie. « *Qu'advient-il des âmes de tous ces chevaux qui ne naîtront jamais?* » disait Jim Harrison. Les voyages sont presque devenus une punition. Quand on lit Kessel, ce grand bourlingueur, on comprend que ce qui compte ce n'est pas la destination, mais le déplacement. J'ai eu la chance de connaître les derniers trains qui nous transportaient de nuit sur un mode *Orient-Express*, avec des nappes sur les tables du wagon-restaurant, des boiseries remplacées aujourd'hui par une déco de *McDo* dans nos TGV... C'était un plaisir alors d'aller à la gare. La lenteur demeure pourtant le moyen le plus rapide pour aller à l'essentiel. La vitesse nous fait perdre du temps.

Vous cherchez une certaine forme de lenteur et reprenez un rôle de passeur en vous coulant dans le sillage de la pensée archipélagique d'Édouard Glissant...

Oui, cette idée brillamment conceptualisée par Glissant qu'il y ait dans le monde des archipels de la pensée, des esprits qui se répondent, m'a rassuré dans mes intuitions. Dans mes pérégrinations antérieures, c'est l'humain qui m'attirait avant tout. Aujourd'hui toujours, mais comme un cousin, qui n'est pas à côté de la nature, encore moins au-dessus, mais qui appartient à la biodiversité, au vivant, au même titre que les libellules si chères à Gilles Bœuf!

Le Bateau-atelier va me permettre en effet de relier, d'effectuer un rôle de passeur et de porte-voix pour ces pensées qui se dédouanent des frontières, de la couleur de peau, d'une appartenance nationale et *a fortiori* religieuse. Un porte-voix des mémoires enfouies par l'histoire réécrite des vainqueurs. Il y a tant à apprendre des visions du monde en dehors de celle unilatérale des monothéismes, de l'idéologie occidentale. Celle des Océaniens par exemple, qui a été totalement occultée, reléguée au rang de préhistoire jusqu'à récemment : ce qui s'est passé avant l'histoire qui n'aurait débuté qu'à l'arrivée de Cook ! J'y consacre une large place dans l'exposition du quai Branly¹. Chantal Spitz, qui a publié le premier roman tahitien

1. « Le bateau-atelier de Titouan Lamazou », Musée du Quai Branly.

en langue française², m'a raconté par exemple l'anecdote de son fils rentrant de l'école, relatant son cours d'histoire dévoilant que son île était habitée autrefois par des sauvages. Elle lui a demandé si, à son avis, sa grand-mère était une « *sauvage* » ! Les chercheurs, les écrivains de Tahiti en sont à un point où ils se félicitent du film *Vaiana* de *Disney* qui a permis aux jeunes de prendre conscience de leur histoire !

Il y a pourtant eu, depuis les années 1960-1970, un important travail sur la mémoire ; il ne s'est pas diffusé ?

C'est vrai que les Océaniens, les Marquisiens notamment, ont réalisé un travail considérable avec des chercheurs de l'Institut de recherche pour le développement, du Muséum national d'Histoire naturelle, notamment pour retrouver la toponymie originelle de tous les lieux, de toutes les baies, qui avait été renommés par les nouveaux arrivants. C'était un enjeu considérable, car comme le dit Camus : « *En nommant mal les choses, on ajoute au malheur du monde* ». Marque d'un désintérêt, mais manière de nier les civilisations abordées et de mieux les annexer. Nombre de noms de lieux, baies, pointes, etc. honoraient les dieux d'une civilisation d'oralité polythéiste qui ne convenait pas à la suprématie chrétienne. Or là, du fait que cette mémoire passait de bouche à oreille, tout risquait de se perdre définitivement. Il a donc fallu aller dans les villages pour retrouver les anciens, ceux qui avaient conservé des bribes de tout cela et puis harmoniser l'ensemble, puisque parfois, de village en village, les terminologies diffèrent sensiblement. Il faudra sans doute un peu de temps pour que ces travaux intègrent les programmes scolaires !

Dans le même ordre d'idée, le grand linguiste tahitien Jean-Claude Teriierooiterai est parvenu avec ses collègues d'Hawaï et de Nouvelle-Zélande à retrouver toute la toponymie du ciel océanien !

Et par conséquent leur science de la navigation ?

Exactement ! Car si Cook et Bougainville ont soi-disant « découvert » des îles du Pacifique pourtant déjà peuplées, c'est que leurs habitants n'étaient pas tombés du ciel, mais bien arrivés par la mer, et cela des siècles avant eux. À bord de navires qui sont probablement les agencements de nature les plus sophistiqués qu'ait jamais imaginé Sapiens : les fameuses pirogues à balanciers qui ont inspiré nos catamarans

2. *L'île des rêves écrasés*, Les éditions de la Plage, 1991 (réédition Au vent des îles, 2003).

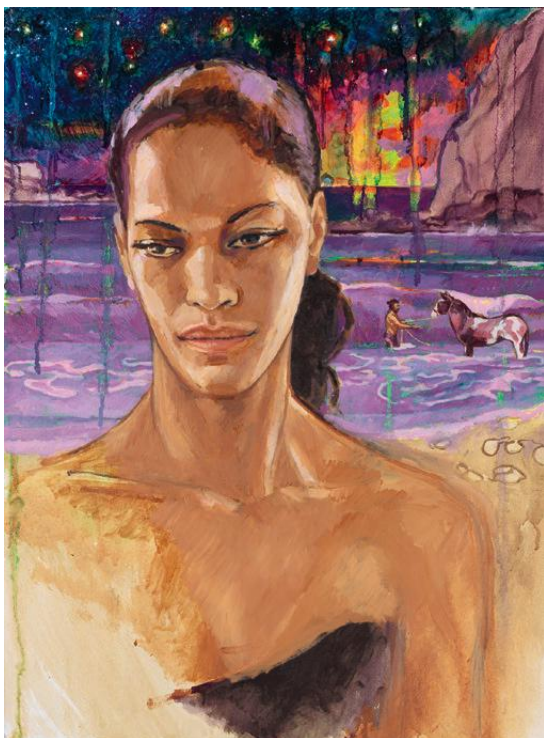
et multicoques modernes. Leur science astronomique transmise par des chants et poèmes mnémotechniques était impressionnante et leur a permis de se repérer sur le plus vaste océan de la planète, sans instruments de navigation. Aujourd'hui, on salue à juste titre la victoire de Jean-Luc Van den Heede dans la *Golden Globe Race* en soulignant qu'il a fait le tour du monde sans autre instrument qu'un vieux sextant, ce qui est formidable, mais il faut bien imaginer que les Océaniens n'avaient même pas de sextant, c'était ça leur sextant (*il montre sa main*)... C'est avec la main qu'ils mesuraient la hauteur des étoiles, étoiles dont ils connaissaient la position et la succession, qui leurs servaient de guide : les *Rua*, le chemin des étoiles. Et tout ce savoir, cette connaissance étaient transmis uniquement par voie orale, à travers ces mélodies qu'ils apprenaient par cœur et se transmettaient de marin en marin, de génération en génération.

On vous sent passionné par cette civilisation...

Oui, celle-ci en particulier, car je la côtoie depuis longtemps. Mais comme toutes les autres. Il est rassurant et précieux qu'au regard de la globalisation qui uniformise l'apparence et la vision du monde, ces différences survivent. *A priori* de nos jours, les Océaniens se sont coulés dans le moule : ils sont connectés, ne peuvent se passer de leur portable, de leurs outils numériques. Mais quand on creuse, on s'aperçoit de leurs distinctions. Leur notion du temps par exemple, qui est fondamentalement différente de la nôtre, est révélatrice : il n'y a pas d'imparfait et de futur dans leur grammaire. C'est un chapelet de présents qui se succèdent. Le passé y est néanmoins conceptualisé, mais à l'inverse du nôtre qui est perçu dans notre dos, faisant face à l'avenir, l'océanien fait face au passé, les pieds bien ancrés dans le présent. Le futur demeurant une vue de l'esprit.

Un peu comme vous d'une certaine manière : ce Bateau-atelier est-il une façon de reprendre la mer, de renouer avec vos premières amours ?

Oui, une continuité en tout cas. Même si je ne connaissais pas du tout la mer à l'origine, ni les marins dans ma jeunesse. Mais j'étais attiré par ce monde, attiré par cet inconnu, les gens qui vont en mer, j'avais envie de les côtoyer. Mon amour des cartes a sans doute joué aussi : on rêve dessus étant gamin, puis on cherche à découvrir tous ces endroits qui nous ont fait vagabonder par la pensée. Les cartes sont rassurantes aussi. Par exemple, autrefois on utilisait les *pilot-charts*, avant les satellites, pour nous indiquer la route, la météo. Lors d'un *Vendée Globe*, on



Meleana, 2018. Ua Huka, Îles Marquises. Huile sur papier.
© Titouan Lamazou.

s'aperçoit qu'une bonne partie de la route parcourue est celle que Vasco de Gama avait empruntée, contournant les mêmes anticyclones, se laissant porter par les mêmes vents dominants...

Tout ceci pour dire qu'à un moment donné, j'ai ressenti un besoin de mer. Faire marcher un bateau, au fond, il n'y a rien de plus élémentaire : il suffit de positionner les voiles dans le vent. Mais arriver à bien le faire, à être un marin, « faire corps avec le bâtiment », cela demande des années... Et pour peu que l'on ait de bons enseignants ! J'ai eu la chance d'appartenir à l'équipage d'Éric Tabarly qui m'a fait prendre un sacré raccourci dans ce domaine et m'a permis, de manière inattendue, de remporter des épreuves de course au large avant de me consacrer pleinement à nouveau à ma vocation première d'artiste. Cet accès au monde des marins a fait partie de la construction nécessaire et est devenue partie intégrante de mon parcours. Je ne sais pas si l'on peut appeler cela un retour...

Y a-t-il des passerelles entre les deux? La pratique de la mer peut-elle nourrir la pratique de l'art ou ce sont deux univers aux antipodes?

Pour moi, il n'y a pas vraiment de différence entre les deux. C'est ma vie. Le mouvement, l'errance m'inspirent. Je suis un artiste «voyageur». Pourtant, on ne dit pas un artiste «sédentaire»! Dans la pratique, pour gagner des courses, il faut rassembler un certain nombre de facteurs, qui sont l'expérience, les moyens, l'envie de gagner et je pense que dans une œuvre d'art, c'est un peu la même chose: pour arriver à terminer un tableau, il ne faut jamais laisser tomber, il faut réunir de mêmes éléments similaires de détermination. Il y a en revanche un gros avantage dans la course au large, c'est la ligne d'arrivée. Quand vous passez la ligne d'arrivée du *Vendée Globe* en tête, vous pouvez vous dire que vous avez été meilleur que les autres, et vous êtes reconnu comme tel. Dans le domaine artistique, à l'inverse, vous ne savez jamais véritablement si vous êtes simplement arrivé! On dit qu'un artiste fait de son mieux pour ne jamais parvenir à son but. Le «sport», c'est plus simple!

Avez-vous toujours voulu peindre, créer?

En tout cas depuis l'âge de onze ans. C'est du moins l'âge où j'ai annoncé à mes parents que je souhaitais devenir artiste... C'était une autre époque et, à quinze ans, je sillonnais seul l'Europe en train pour aller au musée à Madrid, à Rome... Ma passion c'était d'aller au musée. Et mes parents trouvaient cela très bien. C'était une autre époque. J'ai appris en imitant, essayé d'aller au plus près des maîtres, regardé comment ils avaient fait, tenté de refaire (comme j'ai appris la mer en imitant Tabarly). Je me plaisais aux Beaux-Arts. Mes profs de cette époque appartenaient au mouvement supports-surfaces. J'aimais leur enseignement, mais j'ai été happé par l'appel des Alizés! Mon travail artistique a été induit par ce choix de vie intuitif.

En quoi avez-vous le sentiment de vivre un retour aux sources concernant la peinture?

On mentionne aussi un retour aux sources concernant la navigation avec mon implication actuelle dans le projet du Bateau-atelier... Il s'agit plutôt d'une continuité, l'accomplissement d'un long parcours initiatique en quelque sorte, où se rejoignent les divers sillages qui l'ont formé. Pour la peinture, vous faites allusion à ces grandes toiles récentes réalisées à l'atelier et à la peinture à l'huile qui n'appartenaient pas au travail de «carnettiste» ordinairement connu grâce

à mes premières publications et à mon mode de vie voyageur, d'inspiration vagabonde, ayant privilégié au début des supports de petits formats et l'utilisation de la gouache au pouvoir siccatif quasi instantané. Mes frères se sont en effet amusés récemment au regard de ces grandes toiles: « *Cela ressemble à ce que tu faisais quand tu avais quinze ans, juste avant de partir de la maison!* ». Le désir de grandes toiles et de « retour » à la peinture à l'huile est en réalité concomitant avec la préparation du Bateau-atelier: un atelier itinérant. C'est tout le paradoxe de ce désir de « sédentarité en mouvement » que j'ai passé ma vie à formuler. On peut parler d'un retour aux sources de mon intuition première, mais qui n'a jamais cessé de se construire. Le temps est venu qu'elle s'accomplisse. À cela s'ajoute une nécessité contemporaine: la nécessité urgente ressentie aujourd'hui de contribuer du mieux que je peux à faire rayonner un autre regard, celui des artistes et des chercheurs sur notre monde en mutation, en un plaidoyer pour la préservation de l'environnement.

Propos recueillis par l'EV1 Hélène Dupuis, l'ASP Marion Sollier
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

N°12 - *Ruptures.* Juin 2017

N°13 - *Marins.* Décembre 2017

N°14 - *Liberté.* Juin 2018

Hors série - *La Marine dans la Grande Guerre.* Novembre 2018

N°15 - *Nourrir.* Janvier 2019

LES PUBLICATIONS DU CESM

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

Études marines

Chaque semestre, des regards croisés sur un sujet maritime, de géopolitique, d'économie, d'histoire...

Cargo Marine

Des études apportant une connaissance approfondie d'une problématique navale ou maritime.

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.

Les @mers du CESM

Cette revue de veille bihebdomadaire, également diffusée par mail, compile les dernières actualités concernant le domaine naval et maritime.

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

Vous pouvez également vous abonner sur simple demande à :
cesm.editions.fct@intradef.gouv.fr

ISSN 2119-775X

Dépôt légal juin 2019
Achevé d'imprimer au 2^e trimestre 2019
Impression Sipap-Oudin, Poitiers
Réalisation Marie-Laure Jouanno

ÉNERGIES

« Réfléchissez au mouvement des vagues, au flux et reflux, au va-et-vient des marées. Qu'est-ce que l'océan ? Une énorme force perdue. Comme la terre est bête ! Ne pas employer l'océan ! »

Si Victor Hugo pestait dans *Quatre-vingt-treize* face à l'incapacité des hommes à exploiter l'énergie des océans, on peut gager que son regard ne serait pas le même de nos jours. La mer est désormais parsemée de plates-formes *offshore* allant puiser gaz et pétrole à plus de 3 000 mètres de profondeur... Sillonnée de méthaniers qui transportent d'un point à l'autre de la planète du gaz naturel liquéfié. Elle voit fleurir enfin des champs d'éoliennes sur les littoraux des continents européens, américains ou asiatiques.

Ressources, production, flux : si les océans sont un nouvel eldorado énergétique, ils deviennent également une source de tensions géopolitiques et géostratégiques nouvelles...



N°16 – Juin 2019
Centre d'études stratégiques de la Marine

