



Hydrolienne D10 © Balao pour Sabella

Les hydroliennes, une solution à base d'énergie marine pour la transition énergétique

Benoît Bazire

Président de Sabella

Principes généraux des hydroliennes et technologies

L'énergie cinétique des marées

La technologie hydrolienne exploite l'énergie cinétique des courants marins

Les énergies marines renouvelables sont appelées à jouer un rôle majeur dans le mix énergétique de demain. Elles sont au cœur des ambitions européennes avec un objectif de 1 Gigawatt de puissance installée pour 2030.

Parmi toutes les sources d'énergie en mer, l'exploitation des courants de marée fait l'objet de nombreux projets car ces courants sont les plus prévisibles et les plus stables.

Grâce à l'énergie des marées, les hydroliennes peuvent alimenter les zones côtières en électricité et produire de l'hydrogène vert.

et plus particulièrement ceux des marées, engendrés par l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil, phénomène connu et prédictible.

Parmi toutes les sources d'énergie renouvelables, les courants de marée sont les plus prévisibles et les plus stables.

La nature de cette énergie lui confère des atouts significatifs :

- une source d'énergie durable, invisible, inépuisable et non polluante ;
- une énergie fiable et prédictible, permettant une évaluation précise de la production

d'électricité exploitable et des capacités de stockage ;

- une ressource présentant une densité énergétique importante permettant une implantation de machines dans une emprise spatiale faible (70 MW dans 1 km², soit environ 1GW dans 15 km²) à proximité du littoral et à faible impact sur l'environnement ;

- les hydroliennes sont par ailleurs invisibles, puisque posées sur le fond marin, ce qui améliore l'acceptabilité sociétale. Leur lieu d'implantation étant dans du courant marin de forte amplitude, elles se situent hors des zones de pêche et en particulier de chalutage.

Cependant l'installation et la maintenance des hydroliennes se heurtent à des difficultés dues à leur environnement car les hydroliennes posées ne peuvent être installées que dans des zones de forts courants et en eaux profondes (de 50 à 100 m). Ces zones sont hostiles en termes d'accessibilité, d'intervention de maintenance et de manutention pour leur pose.

C'est pourquoi, en France, le principal gisement d'énergie marine a reposé longtemps sur l'énergie marémotrice avant de pouvoir considérer les solutions de type hydrolienne, leurs contraintes de fiabilité les rapprochant du domaine spatial, où la réparation des satellites est rarement envisageable.

Impacts des hydroliennes sur l'écosystème

La majorité des hydroliennes sont constituées d'une turbine arrimée à une structure porteuse, suffisamment lourde pour être simplement posée sans travaux (à « fondation gravitaire »), ce qui permet de minimiser l'impact sur le fond marin ¹. D'autres technologies existent avec des géométries ou des systèmes d'arrimage différents tout en respectant le même principe de fonctionnement.

¹ Poids moyen du démonstrateur D10 de Sabella environ 100 t, poids moyen de l'embase environ 300 t.

En exploitation, l'impact environnemental est minime et les risques pour la faune marine sont limités pour l'ensemble des technologies d'hydroliennes. En effet, les zones d'installation présentent l'avantage d'être peu fréquentées en termes de faune et de flore, réduisant ainsi l'impact sur l'écosystème. De plus la vitesse de rotation des pales (10 à 15 tours par minute) des hydroliennes limite les dangers pour la faune.

Aspects technologiques

Le principe de l'énergie hydrolienne est proche de celui des centrales hydroélectriques au fil de l'eau, à la différence près que c'est le courant marin qui fait tourner les turbines des hydroliennes. Ces dernières fonctionnent donc dans les deux sens de la marée.

La rotation des turbines installées en mer entraîne un alternateur produisant un courant électrique variable (fonction du courant), qui est redressé par un convertisseur avant d'être acheminé à terre puis relié au réseau d'électricité terrestre. La puissance, exprimée en kilowatt (kW) d'une hydrolienne dépend ainsi du diamètre du diamètre des pales de sa turbine et de la vitesse du courant de marée ².

Facteur de charge moyenne

La puissance cinétique d'un fluide traversant un disque est proportionnelle à sa surface, donc au carré de son diamètre, à la masse volumique du fluide et au cube de sa vitesse :

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

En pratique, la veine du fluide s'élargit au voisinage des pales de l'hydrolienne, ce qui fait chuter sa vitesse. La puissance récoltée est ainsi limitée à 60 %, soit

² A titre indicatif la puissance moyenne d'une hydrolienne est de 1 MW (les plus petites actuellement commercialisées sont de 100 kW, une technologie à axe vertical construit actuellement des turbines à 2,5 MW) ; par comparaison la puissance des éoliennes offshore dépasse aujourd'hui 10 MW.

La Société Sabella

Fondée en 2008, par un groupe d'entrepreneurs et d'industriels, venant de l'ingénierie, du monde du pétrole offshore et de l'industrie lourde, Sabella est une entreprise qui conçoit, développe et intègre des hydroliennes.

La mission de Sabella³ est de fournir des solutions permettant d'alimenter en électricité les zones côtières et à terme de produire de l'hydrogène vert grâce à l'énergie des marées. Cette PME basée à Quimper compte aujourd'hui 25 personnes et est impliquée dans de nombreux projets d'énergie renouvelable tant en France qu'à l'étranger.

Historique de l'actionariat

Depuis sa création, la société SABELLA a mobilisé plusieurs levées de fonds :

- en juin 2014, une première levée de fonds a permis de consolider les fonds propres et de sécuriser le budget du projet D10 grâce à une augmentation de capital auprès de deux fonds d'investissement, (Demeter Ventures et Go Capital) et de trois industriels (IWD, Farinia et Geopetrol) dont deux trouvent des synergies d'activités dans la construction des hydroliennes ;
- en 2016, Bpifrance entre dans le capital de l'entreprise ;
- en 2019, Sabella a fait partie de la première promotion de l'Accélérateur Transition Énergétique lancé par l'Ademe et Bpifrance.

- en janvier 2021, GE Renewable est rentré au capital de Sabella suite au rachat par Sabella des brevets couvrant les technologies hydroliennes développées par General Electric, Alstom, Rolls Royce et Tidal Generation ;

Depuis ses débuts Sabella est soutenue par l'Ademe, la région Bretagne, le département du Finistère, ainsi que par l'Union européenne.

16/27 de la puissance théorique. Cette limite, appelée limite de Betz, est commune aux éoliennes. Il faut en outre déduire les pertes de la machine liées aux caractéris-

³ Sabella est le nom latin d'un ver marin tubicole (sabelle en français), dont la forme et les mouvements rappellent ceux d'une hydrolienne.

“ Contrairement aux vents, les courants marins sont prévisibles à long terme car le courant de marée se retourne régulièrement de façon sinusoïdale, avec des amplitudes connues, variables avec la lune. ”

●●● tiques des pales de l'hélice utilisée et à la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, ce qui conduit à un rendement global de 40 à 50 % entre l'énergie marine théoriquement extractible et l'énergie électrique produite.

Pour une hydrolienne placée dans un courant de 3 m/s (soit 6 noeuds environ), si l'on souhaite obtenir une puissance de 1 MW, il faut une surface d'interception de l'ordre de 180 m², ce qui correspond à un diamètre de 15 mètres. Le démonstrateur de Sabella est équipé d'un rotor dont le diamètre est de 10 mètres.

Contrairement aux vents, les courants marins sont prévisibles à long terme car le courant de marée se retourne régulièrement

de façon sinusoïdale, avec des amplitudes connues, variables avec la lune. Au moment du retournement de ce courant (les étales de marée), les hydroliennes ne produisent plus d'énergie puis changent de sens de rotation et produisent de nouveau de manière efficace lorsque la vitesse du courant atteint de nouveau 2 noeuds (soit près de 1m/s). Elles passent à pleine puissance au-delà de 4 noeuds (près de 2m/s).

La masse volumique de l'eau étant 800 fois plus élevée que celle de l'air, les hydroliennes sont beaucoup plus petites que les éoliennes (dans un rapport 3 à 4) pour une même puissance et ceci bien que la vitesse du courant soit 3 à 4 fois plus faible que celle du vent dans les sites sélectionnés.

Calculé sur la période 2012-2022, le facteur de charge moyen du parc éolien est de 23,6 % alors qu'il est de 14,2 % pour le solaire ⁴. Ce facteur de charge est de l'ordre de 40 % pour les éoliennes offshore et compris entre 30 et 40 % pour l'hydrolien, en fonction des sites et des courants (le Raz Blanchard possède des vitesses de courant pouvant aller jusqu'à 12 noeuds [6 m/s]. alors que le Fromveur a une vitesse maximale de 8 noeuds [4m/s]).

Les hydroliennes Sabella : deux projets technologiques qui fusionnent pour développer une gamme de produits verts

Les hydroliennes utilisent les courants issus des marées pour produire de l'électricité. Cette production est à la fois renouvelable et prédictible. Du fait qu'elles sont posées

⁴ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/facteurs-de-charge-et-taux-de-couverture-nationaux-mensuels-eoliens-et-solaires-janvier-2012-a-mars-2022/>

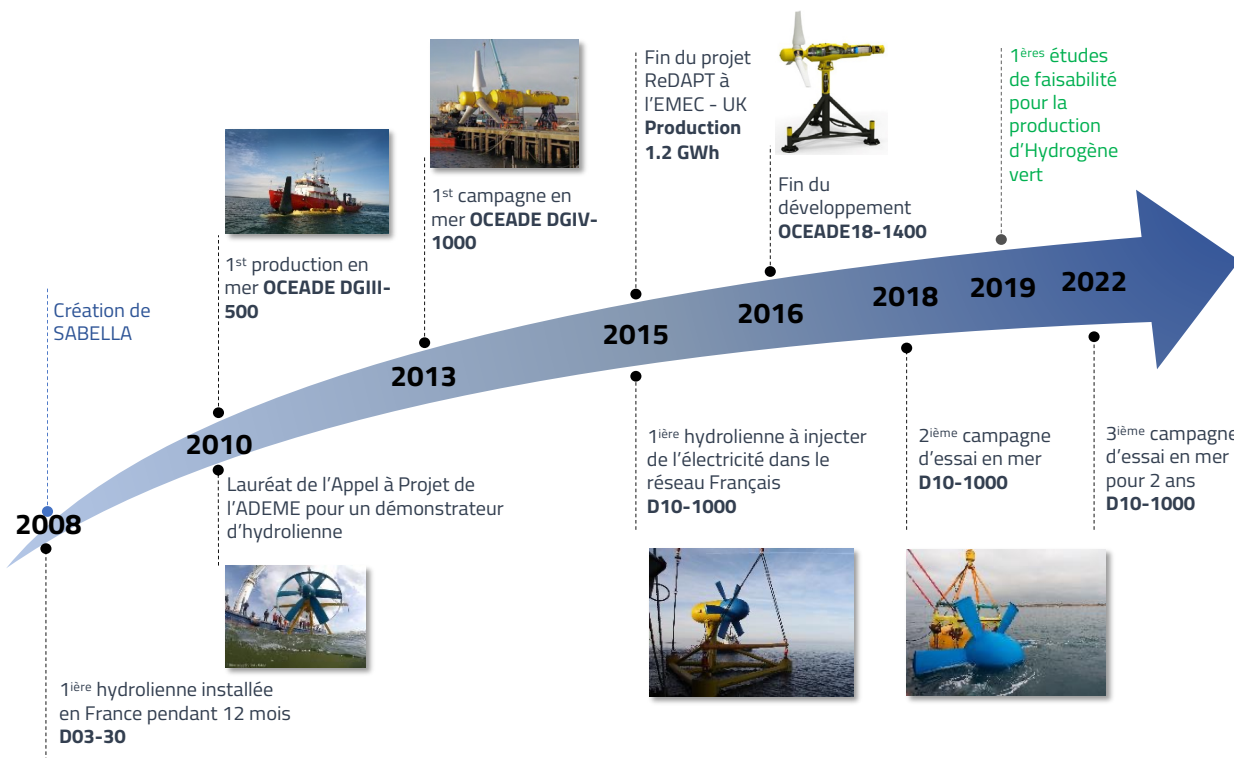


Figure 1 : Les expérimentations réalisées par Sabella depuis 2008.

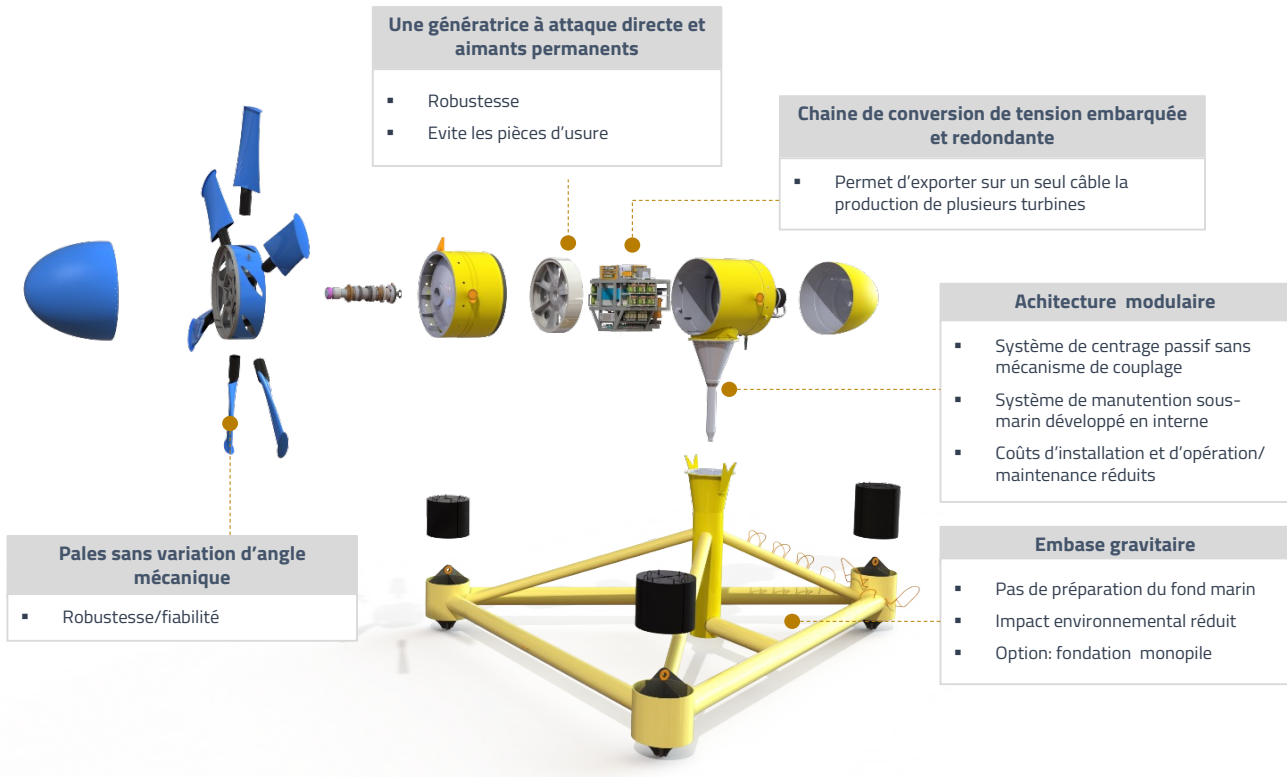


Figure 2 : Concepts de base de l'hydrolienne Sabella.

sur le fond de la mer ⁵, à des profondeurs comprises entre 30 et 100 mètres, la pose et le relevage de ces turbines nécessitent un savoir-faire particulier.

La technologie des hydroliennes de Sabella a fait l'objet de très longues recherches et de nombreuses expérimentations, depuis 2008 (figure 1). La fusion des activités de Sabella avec celles de GE Renewable Energy dans le domaine de l'hydrolienne posée a permis de rassembler de nombreux brevets (actuellement 81 brevets actifs) et de concevoir des turbines robustes et performantes, en prenant le meilleur des idées des deux équipes d'ingénieurs.

Caractéristiques des hydroliennes Sabella

De par son immersion en eau profonde, une hydrolienne doit être résiliente et

fiable pour résister à un environnement hostile et réduire les besoins de maintenance. Sabella a conçu des hydroliennes dont la simplicité technologique et la rusticité permettent de consolider la fiabilité et de réduire considérablement les interventions de maintenance.

Les caractéristiques principales de la technologie utilisée sont les suivantes (figure 2) :

- un rotor à axe horizontal avec des pales fixes, sans cinématique complexe (la turbine a un axe fixe orienté dans la direction des courants de marée les plus importants du site d'installation, qui sont très peu variables dans les deux sens de marée) ;
- une génératrice synchrone à aimants permanents et à attaque directe pour s'affranchir de pièces d'usure ;
- un système de conversion/transformation embarqué qui autorise la mutualisation de l'export de production de plusieurs machines sur le même câble via une sous-station sous-marine, permettant à terme le déploiement de fermes hydroliennes ;

• une télémaintenance est assurée en temps réel par plusieurs centaines de capteurs et de caméras embarquées à bord de la turbine. Les informations sont remontées à terre via des fibres optiques intégrées au câble reliant la turbine à la terre (« câble export ») ;

• une architecture qui permet de relever uniquement la turbine pour les opérations de maintenance, l'embase gravitaire restant sur site.

La simplicité technologique et la robustesse de la solution répondent à un triple objectif :

- une minimisation des coûts d'investissement ;
- une optimisation de la fiabilité et une réduction des risques de défaillance permettant de limiter les temps entre deux interventions de maintenance préventive à 5 à 7 ans en moyenne (le MTBF ⁶ annoncé est de 5 ans) ;



⁵ Il existe plusieurs familles d'hydroliennes : des hydroliennes suspendues à des flotteurs et donc proches de la surface, des hydroliennes « kites » se comportant à la manière de cerfs-volants, mais le type le plus courant, celui proposé par Sabella, est posé sur le fond de la mer.

⁶ MTBF : *Mean Time Before Failure* - Temps moyen avant défaillance

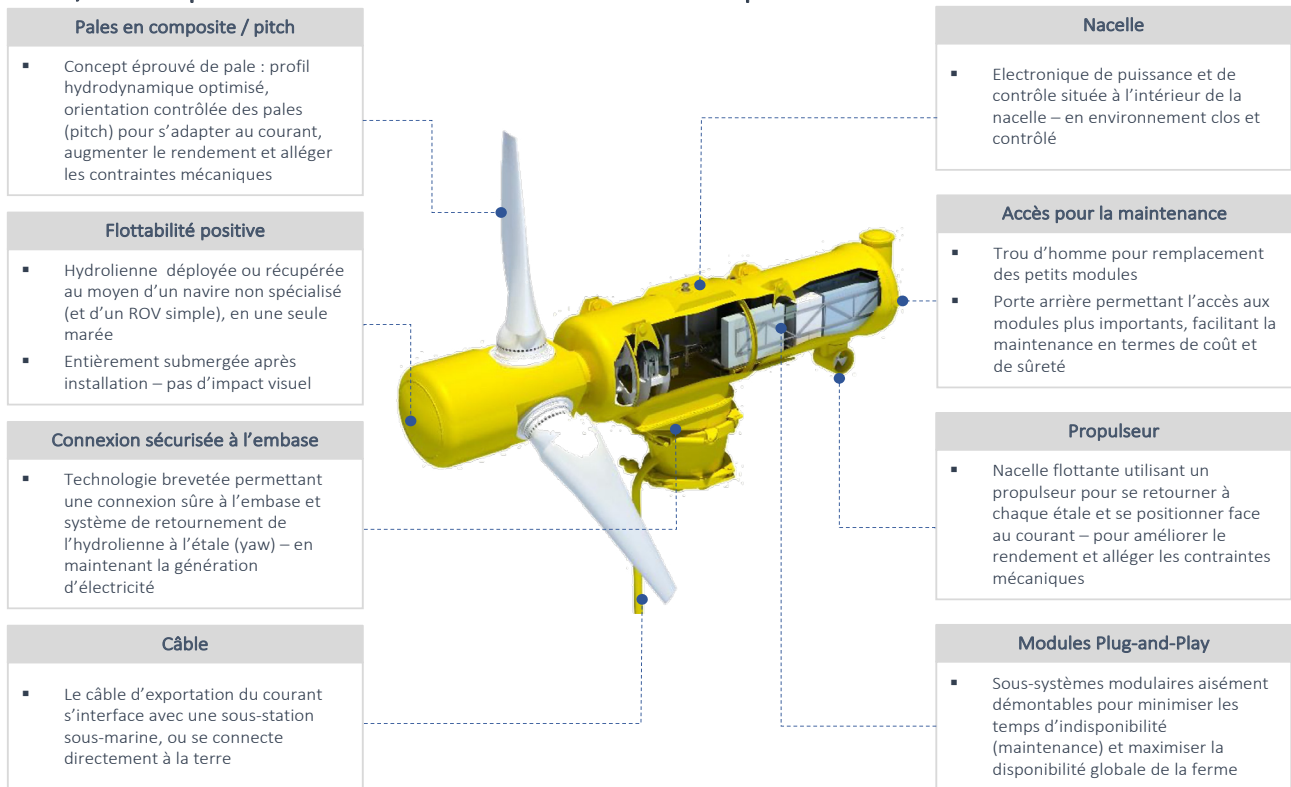


Figure 3 : Concept GE Renewable Energy (turbine Oceade/ Source Sabella).

- une maximisation de la disponibilité de production.

La question cruciale de la maintenance

La solution a été conçue pour faciliter l'installation en mer des turbines et leur maintenance.

L'installation de l'embase, comme celle de la turbine, requiert néanmoins une intervention spécifique, coûteuse et tributaire des conditions climatiques. Elle nécessite l'intervention d'un navire spécialisé équipé d'un positionnement géodynamique. Ces navires sont en général affectés aux opérations de l'offshore pétrolier et gazier : leur prix est très élevé et leur disponibilité n'est pas toujours assurée. Pour résoudre ce problème posé aux installateurs d'hydroliennes, Sabella a tiré parti de la technologie héritée de GE Renewable Energy. Face à la question posée : comment faire fonctionner une chaîne électrique complexe à plusieurs dizaines de mètres de profondeur, dans un milieu marin hostile et des courants violents ?

Les équipes de Sabella et d'Alstom⁷ ont apporté des solutions différentes :

- Sabella a cherché la robustesse et la fiabilité – quitte à céder quelques points de rendement – afin de limiter la maintenance et relever ses turbines le plus rarement possible ;
- Alstom a recherché le rendement et, sachant que le prix à payer serait une maintenance plus fréquente – a calculé ses turbines pour qu'elles disposent d'une flottabilité légèrement positive.

Sabella réalise en ce moment la synthèse de ces deux conceptions en conservant son idée de base de robustesse, mais en isolant la partie la plus fragile de la chaîne électrique (l'électronique de puissance) et en l'enfermant dans un caisson à flottabilité

⁷ La technologie de GE était en fait celle de la partie d'Alstom reprise par GE en 2015 et comprenait aussi la technologie de Rolls Royce et de TGL, une société britannique : il s'agit donc d'une technologie d'origine européenne.

positive – rendant ainsi plus aisée sa maintenance (figure 3).

Une gamme de solutions

La gamme de produits est composée d'hydroliennes de moyenne et grande puissance pouvant s'adapter aux caractéristiques de chaque site et aux besoins du client, en modulant :

- le diamètre du rotor de la turbine : déterminé en fonction de la bathymétrie du site et des vitesses de courant au regard du besoin de puissance à capter ;
- la puissance de la chaîne électrique : définie en fonction du besoin électrique recherché par le client en relation avec les conditions de courant rencontrées et la stratégie de pilotage ;
- le choix de la fondation de la machine sur le fond marin, en fonction des conditions et des caractéristiques du fond spécifiques à chaque site (embase gravitaire ou pile forée).

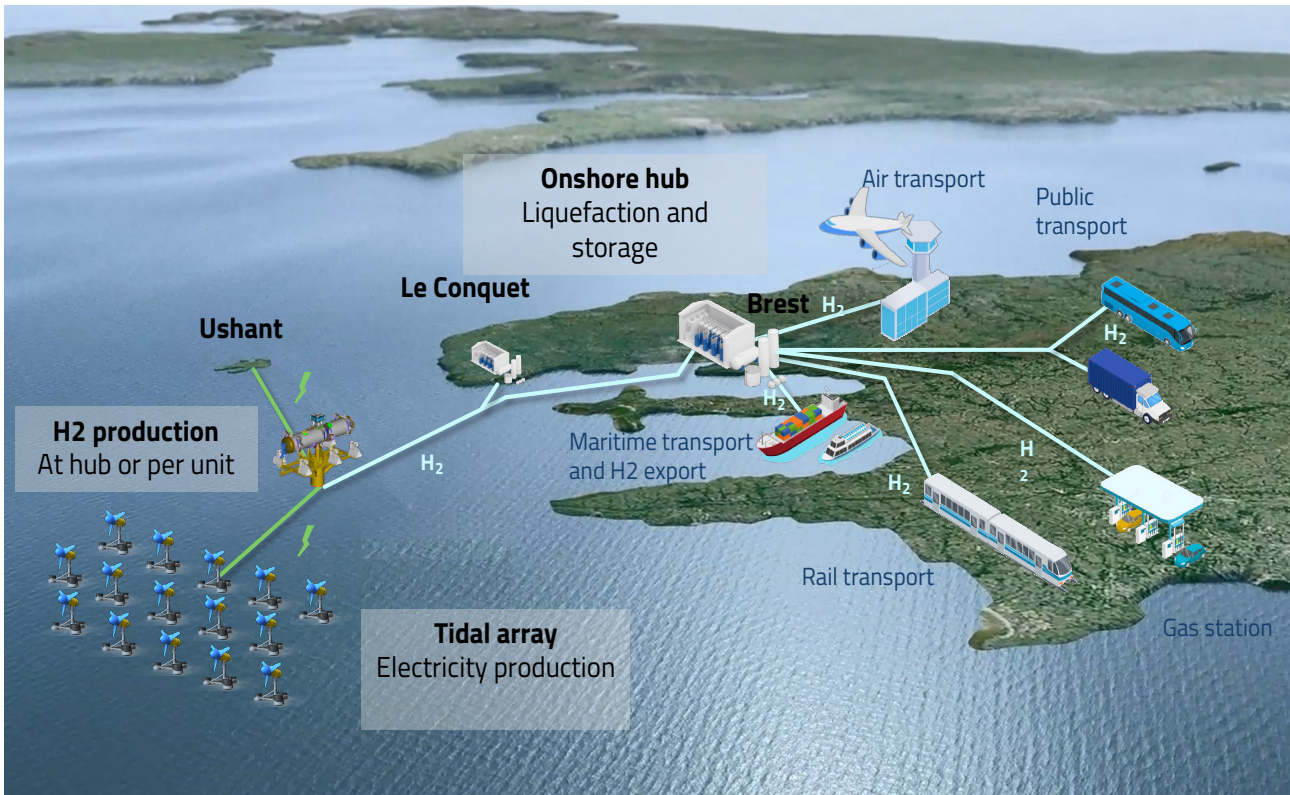


Figure 4 : Couplage des solutions pour la production d'hydrogène (Source Sabella).

Une solution adaptée à la production d'hydrogène vert

L'intermittence d'une énergie renouvelable implique son incapacité à assurer une production constante d'électricité. Il en va ainsi de l'éolien et du solaire, dont les productions cessent respectivement en l'absence de vent et la nuit. Cette intermittence est un problème majeur pour les distributeurs d'électricité qui ont besoin de sources constantes et à tout moment de quantités prévisibles d'électricité disponible. L'augmentation du parc éolien et photovoltaïque va accroître la variabilité des systèmes électriques. L'hydrogène vert constitue donc un élément incontournable du mix énergétique car il permet de stocker l'énergie et de la restituer quand les énergies renouvelables ne produisent pas.

La production d'hydrogène offshore couplée à la production d'énergie hydrolienne en mer permet ainsi de constituer une solution de stockage de l'énergie pour assurer l'équilibre électrique du réseau.

“ La production d'hydrogène offshore couplée à la production d'énergie hydrolienne en mer permet ainsi de constituer une solution de stockage de l'énergie pour assurer l'équilibre électrique du réseau. ”

Avec ses partenaires et actionnaires, Sabella est en train de finaliser des solutions combinées et compétitives pour la production et le stockage d'hydrogène vert (figure 4).

Le marché des hydroliennes posées

Les besoins

Le marché de l'hydrolien adresse plusieurs types de besoins (figure 5).

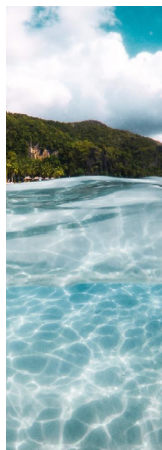
- Les zones insulaires non interconnectées pour remplacer l'électricité d'origine fossile par des énergies renouvelables et diminuer l'émission de gaz carbonique et de gaz à effet de serre ;

- Les fermes hydroliennes pour raccorder au réseau électrique les zones côtières ;

- La production d'hydrogène vert, puisqu'il est produit à partir d'électricité d'origine renouvelable.

La ressource au niveau mondial et européen

Le marché mondial de l'hydrolien peut être une source de croissance et de diversification des marchés traditionnels de l'économie maritime. La capacité potentielle de l'hydrolien dans le monde (figure 6) est estimée à plus de 100 GW/an, ce qui équivaut à la capaci-



Une stratégie qui repose sur trois piliers



Être compétitif sur le marché de la production d'électricité pour élargir le marché adressable vers la production d'hydrogène vert

Figure 5 : Les applications des hydroliennes (Source Sabella).

Carte de la ressource hydrolienne mondiale

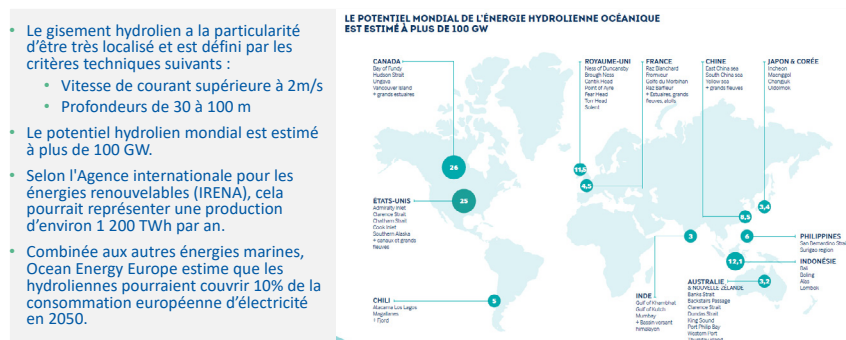


Figure 6 : Géographie des sites potentiels d'hydroliennes (Source Sabella).

●●● té de 100 centrales nucléaires de taille moyenne⁸.

Les ressources se définissent par rapport à la vitesse des courants exploitables, qui doivent, dans l'état actuel de la technologie, être supérieurs à 2 m/s. L'exploration de tous les sites potentiels n'est pas achevée et l'on estime à au moins 10 GW supplémentaires les ressources qui doivent encore être démontrées.

L'Europe dispose de ressources importantes dans l'hydrolien, essentiellement au Royaume-Uni (11,5 GW) et en France (4,5 GW).

8 Les centrales nucléaires françaises (la France est le 2^{ème} pays dans le monde par la puissance nucléaire installée) ont des puissances comprises entre 900 et 1300 MW ; l'EPR, lui, est d'une puissance installée de 1600 MW environ.

La France pour sa part dispose actuellement de trois sites importants en termes de ressources pour l'hydrolien :

- Le Raz Blanchard, au large du Cotentin (3,5 GW) ;
- Le passage du Fromveur, entre l'île d'Ouessant et le continent (1GW) ;
- Le golfe du Morbihan, aux ressources moins abondantes.

Le leadership européen

Les énergies renouvelables et l'hydrogène vert sont au cœur des ambitions européennes avec un objectif de neutralité carbone en 2050, et une étape de réduction des émissions carbone de 55 % en 2030 (dit le package « fit for 55 »). L'Europe a pris le leadership dans ce domaine, tant

L'auteur

Benoît Bazire, ingénieur du Génie Maritime, a débuté sa carrière à la DCAN de Brest, devenue Naval Group, puis a rejoint les services



centraux du ministère de la défense à la direction des affaires internationales. Après un passage au cabinet du Ministre, il a été nommé directeur de cabinet du Délégué général pour l'armement. Benoît Bazire a ensuite été Directeur général des services de la Région Picardie avant de rejoindre l'industrie où il a passé vingt ans, d'abord chez Thomson-CSF (devenu Thales), dans l'armement terrestre, les radars aéroportés, puis dans le domaine de l'optronique. PDG d'Areva TA (aujourd'hui Technicatome), de 2010 à 2014, il crée à l'issue de son mandat une société de conseil et participe à ce titre à la direction de sociétés industrielles ou d'ingénierie. En 2019, Benoît Bazire est élu Président de Sabella, Société d'ingénierie basée à Quimper, qui conçoit et développe des hydroliennes depuis une dizaine d'années.

dans le développement des différentes technologies qu'en termes de capacités installées.

L'Union européenne s'est fixée des objectifs ambitieux pour les énergies marines renouvelables⁹ (EMR) :

- 100 MW de puissance installée en 2025 ;
- 1 GW en 2030 ;
- 40 GW en 2050.

9 L'éolien offshore, qui est considéré comme une technologie complètement mature, a des objectifs séparés et ne figure pas dans cette définition des EMR.

L'hydrolien, qui est la technologie la plus mature des EMR, devrait prendre une part importante dans l'atteinte de ces objectifs.

Les projets en cours chez Sabella

Ré-immersion de la turbine D10

La turbine D10 – 1000, d'une puissance d'un mégawatt, vient d'être reposée à son poste dans le passage du Fromveur, pour une nouvelle campagne de longue durée. Sabella a affrété pour cette occasion le navire Normand Superior, battant pavillon norvégien, et a réalisé avec succès cette opération dans des conditions météorologiques particulièrement exigeantes. Cette ré-immersion réussie va permettre de valider une nouvelle connectique, un nouveau système de lissage de la production électrique à terre en coordination avec Enedis.

Cette solution permettra d'alimenter Ouessant en électricité verte en attendant la mise en place du projet Phares pour la fourniture à l'île d'un bouquet d'énergies renouvelables.

Projet Phares

Le projet Phares concerne le déploiement de deux hydroliennes posées de 500 kW associées à une station photovoltaïque et à une éolienne terrestre pour assurer la transi-

tion énergétique de l'île d'Ouessant : grâce à ce « bouquet » d'énergie verte, au terme de ce programme, 65 % de l'électricité produite dans l'île sera d'origine renouvelable. Il s'agit d'un programme emblématique de ce que l'on peut faire pour une « Zone non interconnectée » (ZNI) : il sera répliquable à d'autres sites dans le monde qui se trouvent dans la même situation.

Projet Tiger

Le projet Tiger est une expérimentation au cours de laquelle deux turbines de 250 kW seront posées dans le golfe du Morbihan. Le projet est subventionné par le programme Interreg de l'Union européenne.

Consortium SeaH2

Le consortium SeaH2 a pour objectif de finaliser les briques technologiques pour produire et stocker l'hydrogène en onshore et offshore à destination du Finistère. L'électricité utilisée sera produite par des hydroliennes posées dans le site du Fromveur.

Conclusion

L'hydrolien est désormais arrivé à un stade de maturité technologique qui lui permet de passer du stade des démonstrateurs et prototypes à celui des « fermes pilotes » et des « fermes commerciales ». Il dépend à ce stade du support des Etats qui s'organisent

progressivement pour lancer des appels d'offres et établir des tarifs correspondant à l'état de maturité de la technologie.

L'hydrolien pourra alors bénéficier des trois facteurs qui ont permis aux technologies comparables comme l'éolien offshore d'atteindre un LCOE ¹⁰ permettant de les intégrer aux énergies acceptées sur le réseau électrique :

- l'effet de série qui, par le nombre des turbines commandées, permet d'en faire baisser le coût ;
- l'effet d'échelle, qui par la croissance de la puissance unitaire des turbines, permet de faire décroître le coût du MW installé ;
- les améliorations technologiques permises par l'accumulation du savoir-faire.

La nouvelle PPE ¹¹ que prépare le gouvernement français sera à cet égard un tournant important. ■

Remerciements

Un grand merci à Suzanne Debaille pour son aide dans l'élaboration de l'article.

¹⁰ Levelized Cost Of Energy

¹¹ Programmation Pluriannuelle de l'Energie

Résumé

Les énergies marines renouvelables sont appelées à jouer un rôle majeur dans le mix énergétique de demain. Elles sont au cœur des ambitions européennes avec un objectif de 1 Gigawatt de puissance installée en 2030. L'Europe a pris le leadership dans ce domaine, tant dans le développement des différentes technologies qu'en termes de capacités.

Dans le domaine des hydroliennes posées, l'entreprise Sabella a conçu des hydroliennes dont les principes référents de simplicité technologique et de rusticité apportent une grande fiabilité et permettent de réduire considérablement les interventions de maintenance. Fort de ses solutions hydroliennes, Sabella avec ses partenaires pourra dans un proche avenir proposer des solutions combinées pour la production et le stockage d'hydrogène vert afin de contribuer à l'équilibre électrique du réseau. ■

Abstract

Renewable marine energies are foreseen to play a major role in tomorrow's energy mix. They are at the heart of European ambitions with a target of 1GW of installed power by 2030. Europe has taken the lead in this area, both in the development of the various technologies and in terms of installed capacities.

As far as tidal turbines are concerned, Sabella has designed tidal turbines whose resilient and proven architecture provide enhanced reliability and drastically reduce maintenance interventions.

On the strength of its tidal turbine solutions, Sabella with its partners will in the near future provide combined solutions for the production and storage of green hydrogen in order to ensure the electrical balance of the network. ■