

CFBR 2014

Une solution économique peut produire 500 GW d'Énergie Marémotrice

F. Lempérière

Le potentiel théorique mondial de l'Énergie des Marées et celui de l'Hydroélectricité traditionnelle sont voisins, au-dessus de 20.000 TWh/an.

L'hydroélectricité produit 3.500 TWh/an avec **1.000 GW**.

L'énergie des marées produit 1TWh/an avec **0,5 GW**.

Les solutions utilisées (usines marémotrices et hydroliennes) n'ont pas permis un coût compétitif d'une énergie très spécifique. L'analyse des raisons de cet échec conduit à une nouvelle solution qui pourrait produire 2.000 TWh/an avec **500 GW** à un coût compétitif, avec des impacts meilleurs que ceux de l'hydroélectricité.

Usines marémotrices

- Les réalisations et les études d'énergie marémotrice ont été surtout basées sur la solution efficace en Hydroélectricité traditionnelle : retenir l'eau par des barrages ou des digues et utiliser l'énergie ainsi disponible par des turbines placées dans des ouvrages en béton. La création de grandes retenues en mer est possible et leur cout par MWh ainsi utilisable peut être inférieur au coût correspondant des barrages pour l'hydroélectricité. La difficulté essentielle provient du fait que la production des turbines est faible sous des charges inférieures à 4 ou 5 m alors que la structure des usines reste couteuse. On s'est donc limité à des sites de marnage exceptionnel en les exploitant pour obtenir une charge de 4 ou 5 m, exploitation très discontinue et peu favorable à l'environnement.
- On a abandonné ainsi les sites de marnage inférieur à 5 m, c'est-à-dire la majeure partie du potentiel mondial.
- La production annuelle est limitée à 2.000 heures de la puissance installée et le cout au MWh est supérieur à 100 € en plus du cout des digues.

Mode d'exploitation

On peut utiliser un bassin dans un sens (fig.1) ou dans les 2 sens (fig.2).

L'exploitation dans les 2 sens peut produire plus de manière plus régulière, en maintenant dans le bassin et à la côte le régime naturel des marées mais la charge est d'environ 40% du marnage donc moins de 2 m pour un site moyen.

L'exploitation dans un sens a l'avantage de permettre un tiers du temps une charge proche de 2/3 du marnage, donc 4 à 5 m pour un site favorable.

L'utilisation majeure de la Rance, celle de Shiwah (Corée), l'étude de la Severn (U.K.) sont basées sur l'opération dans un sens.

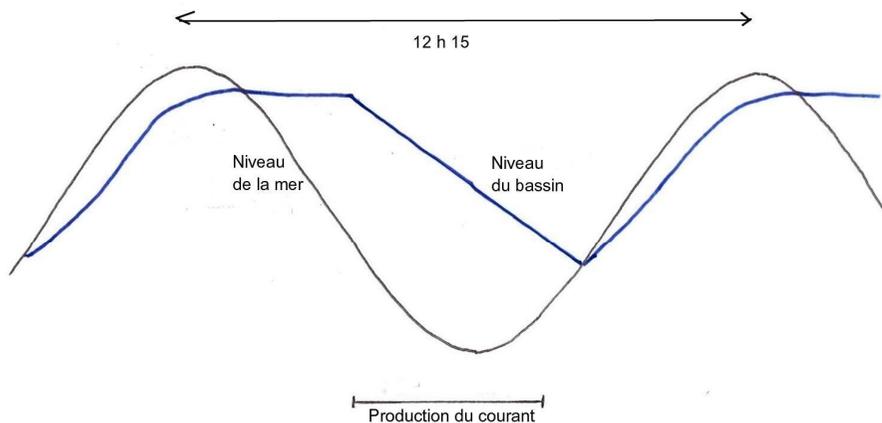


Fig.1 : opération dans un sens

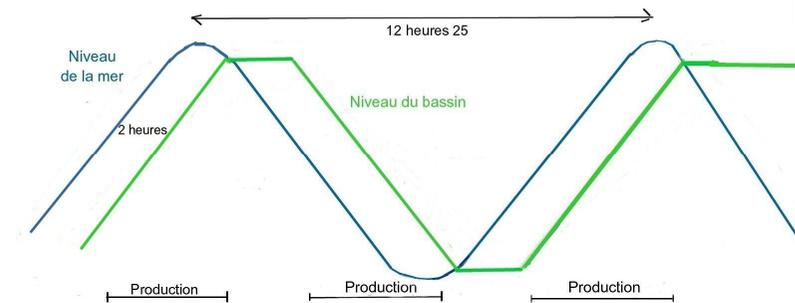


Fig.2 : opération dans les 2 sens

Les hydroliennes

On cherche depuis 10 ans à utiliser dans les courants des fleuves ou de la mer le principe des éoliennes.

La fabrication des hydroliennes peut être plus économique que celle des éoliennes ; leur production P , en KW, est voisine de $0,2 s V^3$, s étant la surface de l'hydrolienne (m^2) et V la vitesse du courant (m/s). Pour une surface raisonnable s de 200 à 300 m^2 , une puissance P de 1 MW nécessite une vitesse proche de 3m/s qu'on trouve en peu d'endroits pendant plus de 1.000 heures par an. Il est donc difficile d'utiliser des capacités rentables et le cout d'utilisation, d'entretien et de raccordement est élevé en pleine mer et on produit très peu une semaine sur deux.

Le potentiel mondial réaliste est faible. En France il ne dépasse pas 5 TWh/an et le coût au MWh restera élevé.

Les hydroliennes seraient très rentables si elles pouvaient opérer la majorité du temps à une vitesse de 3 ou 4 m/s.

Quelle solution ?

On peut créer de grands bassins adossés à la côte à un coût très acceptable mais les turbines utilisées sont mal adaptées aux charges réelles faibles.

On peut fabriquer économiquement des hydroliennes mais leur utilisation est coûteuse sur les sites naturels.

La solution peut être d'adapter de grands bassins à l'utilisation d'hydroliennes dans des conditions optimales (fig. 4 et 5).

Les bassins adossés à la côte sont ouverts sur la mer par des chenaux de 1 à 2 km de longueur et quelques centaines de m de largeur : ces chenaux sont équipés de 10 à 20 rangées d'hydroliennes. Une rangée d'hydroliennes utilise une charge d'environ 0,10 m ; 10 à 20 rangées utilisent 1 à 2 m de charge c'est-à-dire la charge usuelle d'une exploitation d'un bassin dans les 2 sens.

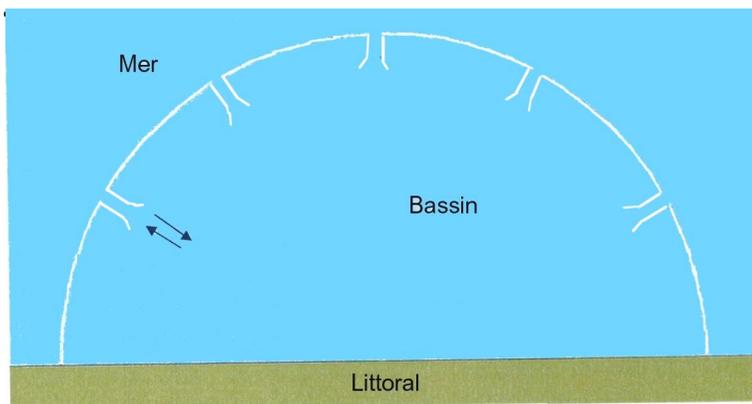


Fig. 4

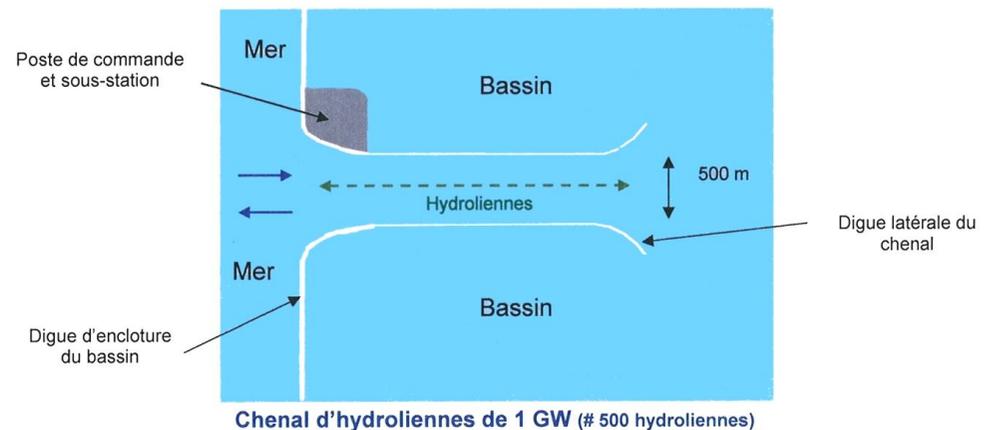


Fig. 5

Mode opératoire des « Maréliennes »

L'utilisation spécifique des hydroliennes à partir de grands bassins justifie un nom spécifique qui peut être celui de « Maréliennes ». Un chenal ouvert sur la mer est clos latéralement par des digues sous faible charge (fig. 6) et peut être fermé coté mer par des vannes semblables aux grandes vannes de barrages. Pendant une demi-marée de 6 heures, les vannes sont fermées environ 2 heures puis le chenal est ouvert 4 heures avec un débit constant, c'est-à-dire avec une vitesse optimale pour les Maréliennes fixée à priori à 3 ou 4m/s.

On peut maintenir cette vitesse constante en faisant varier le temps d'ouverture (plus long en vives eaux), le nombre de chenaux ouverts (plus faible en morte eau) le nombre d'éoliennes en service dans un chenal en fonction de la dénivelée entre mer et bassin et l'ouverture des vannes.

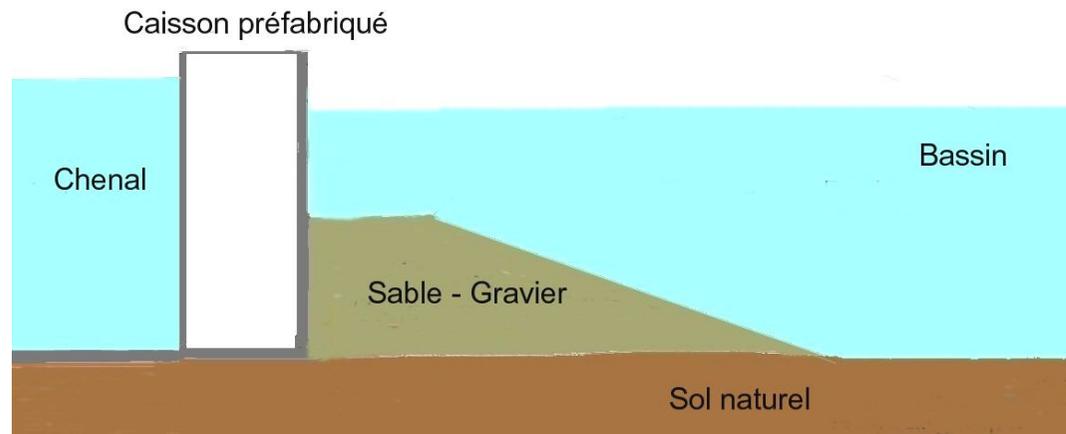


Fig. 6

Production

Elle peut être estimée graphiquement, par exemple pour une marée moyenne avec écoulement régulier pendant 4 heures du volume stocké proche de $0,9 \times S \text{ Hm}$, Hm étant le marnage (m) et S la surface du bassin en km^2 . La charge est en moyenne proche de $0,35\text{Hm}$; on a admis une perte d'énergie de un tiers dans le chenal et pour le rendement des turbines ; d'où une production en KWh par demi-marée de :

$$\frac{0,67 \times 10^6 \times S \times 0,9 \text{ Hm} \times 0,35 \text{ Hm} \times g}{3,600}$$

et pour 2×705 demi-marées par an, une production théorique en GWh/an un peu supérieure à $0,8 \text{ SHm}^2$. Les Maréliennes produisent l'équivalent de moitié du temps à pleine charge. Cependant, pour tenir compte d'une certaine flexibilité, on peut admettre une production en GWh/an limitée à $0,7 \text{ SHm}^2$ par une puissance installée en MW de $0,2 \text{ S Hm}^2$. La production admise équivaut à 3.500 Heures/an à pleine charge alors qu'elle est en théorie de plus de 4.000 heures.

La production en vives eaux est à peu près un tiers de plus qu'en marée moyenne, la production en morte eau un tiers de moins.

Coût des Maréliennes

Leur étude, comme celle des impacts, est détaillée :

- Dans un article de Hydropower and Dams publié fin janvier 2014.
- Dans un article à paraître bientôt dans « Techniques de l'Ingénieur ».

Le cout comporte essentiellement trois parties : les Maréliennes, les chenaux, la digue principale.

- Le coût au kW de fabrication en serie d'une Marélienne sera inférieur à celui d'une éolienne, les pales étant 5 fois plus courtes à puissance égale ; La mise en place et le raccordement sont du même ordre de cout. Mais une Marélienne opère 3 500 heures au lieu de 2 000 heures pour une éolienne dont le cout total est proche de 70 €/MWh. Un coût de 40 €/MWh paraît réaliste pour les Maréliennes elles-mêmes. Il peut se réduire avec une fabrication mondiale standard très importante.
- Le coût des chenaux (digues, bétonnage du fond, vannes) est de l'ordre de 500 €/kW moins de 15 €/MWh, beaucoup plus faible au MWh que celui du génie civil de Groupes Bulbes.
- La longueur et le cout de la digue principale sont naturellement très variables.

Pour de grands sites ou des topographies favorables, la longueur de digues est de 2 à 4 km par TWh annuel et le coût de 15 à 30 €/MWh.

- Le coût total semble généralement entre 60 et 100 €/MWh comparable à celui de l'hydroélectricité, moitié du coût d'utilisation des Groupes Bulbes.

Potentiel mondial

Un avantage capital des Maréliennes est que le cout par MWh lié aux Maréliennes et à leur chenal est pratiquement indépendant du marnage. On peut donc équiper des sites de marnage aussi faible que 3 m pourvu que le cout de la digue principale soit acceptable : c'est le cas de grands sites ou de topographies favorables.

Le potentiel mondial réaliste **et le nombre de pays concernés sont donc très supérieurs** à ce qui était admis dans le passé.

Le potentiel est surtout limité par la profondeur de la mer mais cette profondeur est inférieure à une vingtaine de m jusqu'à 30 km de la cote sur des dizaines de milliers de km avec des marées supérieures à 2 m : on peut produire 0,1 GWh par km de littoral avec une marée de 2,5 m!

Le potentiel mondial réalisable économiquement semble supérieur à 5.000 TWh/an : en réaliser 2.000 paraît réaliste.

Ce potentiel est en France supérieur à 200 TWh/an sur la Manche et l'Atlantique. L'équipement de 100 TWh/an avec 30 GW paraît réaliste avec une longueur totale de digues de 200 km.

Les impacts

Ils doivent être étudiés pour des projets modernes tenant compte de l'environnement, c'est-à-dire de grands bassins exploités dans les 2 sens.

Les impacts doivent être comparés à ceux des autres énergies renouvelables, à énergie égale.

Les impacts visuels sont ceux de digues de 10 m à 10 ou 20 km de la côte avec peu de raccords à terre (fig.6). Ils sont beaucoup plus faibles que ceux des autres énergies renouvelables.

Les projets maintiennent à la côte le régime des marées et y réduisent beaucoup les vagues et la sédimentation. Le passage des poissons dans les chenaux et les Maréliennes à 3 ou 4 m/s ne devrait pas entraîner de forte mortalité.

Il n'y a pas de déplacement de population et les retombées locales sur l'emploi et l'économie sont à l'échelle de très fortes productions électriques.

La navigation

- Les bateaux de faible tirant d'eau peuvent utiliser les chenaux deux tiers du temps et des écluses 2 heures sur six.
- Pour les sites à faible marnage, à fort trafic (Grande-Bretagne, Allemagne) on peut probablement éviter les écluses avec un chenal spécial en perdant un peu d'énergie.
- Les ports existants dans les bassins peuvent être améliorés pour un accès tout temps.
- Des ports peuvent être créés (fig. 7 et 8).



Fig.8 : exemple de port de plaisance et de pêche

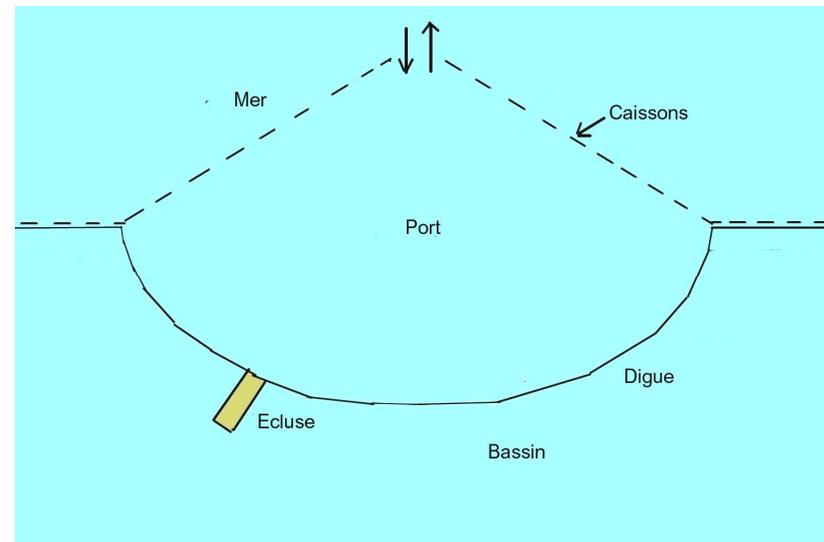


Fig.9 : port éventuel

Les impacts indirects

Les digues et les grands lacs payés par l'électricité produite permettent suivant les pays et les sites :

- Le développement du tourisme et de l'aquaculture.
- L'implantation très économique de grandes fermes éoliennes.
- La création de plateformes industrielles le long de la digue à 20 km en mer avec accès terrestre et ports économiques à grands tirant d'eau (fig. 9).
- **La protection du littoral.**
- **Le stockage d'énergie.**

Stockage d'énergie

- Il est souhaitable de stocker au moins deux heures de production et de préférence 6 ou 8 heures pour transférer la production de nuit.
- Il est possible de consacrer dans ce but environ cinq pour cent de la surface du bassin marémoteur à une STEP constituée par exemple d'un bassin haut opérant entre +10 et +20 et un bassin bas opérant entre -10 et -20. Cet ouvrage peut être réalisé en eau calme après mise en service de l'aménagement de production.
- **Le coût est inférieur à celui des STEPs traditionnelles et la vitesse de réaction beaucoup plus efficace, vu l'absence de tunnels entre bassins.**
- Cette STEP peut être utilisée et augmentée pour les autres énergies intermittentes

Mode de construction et programme

La solution usuelle pour les sites importants semble devoir être basée sur des méthodes navales.

- Caissons préfabriqués pour brise lames et piles supports de vannes (fig.7)
- Remblais en eau calme par grandes dragues marines.
- Pose en eau calme des Maréliennes.

En dehors de l'économie cette méthode de construction permet un délai global de 6 ou 7 ans pour la mise en service (dont 2 ans d'installations) même pour de très grands sites car on peut réaliser simultanément plusieurs grands chantiers indépendants.

Les travaux complémentaires de STEPs, fermes éoliennes, aménagements divers peuvent être réalisés ensuite en eau calme.

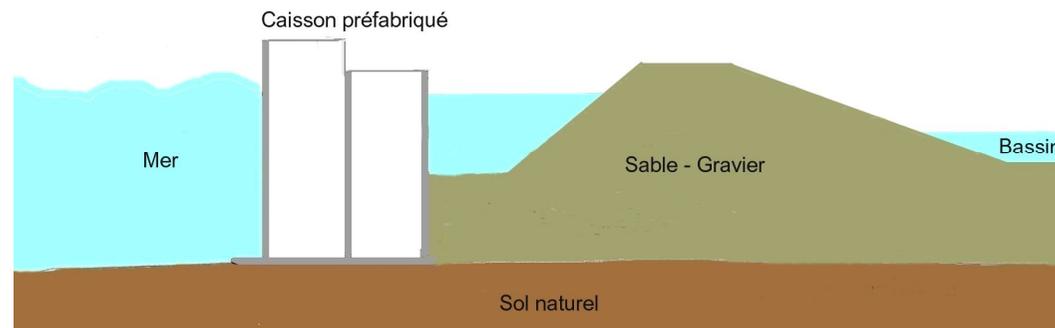


Fig.7

Quelques exemples

- Ils ont été choisis pour montrer la diversité des utilisations d'une solution standardisée.
- Le marnage peut varier de 2 m à 7 m.
- Les longueurs de digues sont très variables.
- Les avantages indirects peuvent être très différents suivant les pays et les sites.
- Ces exemples sont basés sur le marnage, la forme du littoral et les profondeurs de la mer près des côtes.
- Il est possible que, dans certains cas, la nature du sol ou des raisons politiques empêchent la réalisation.

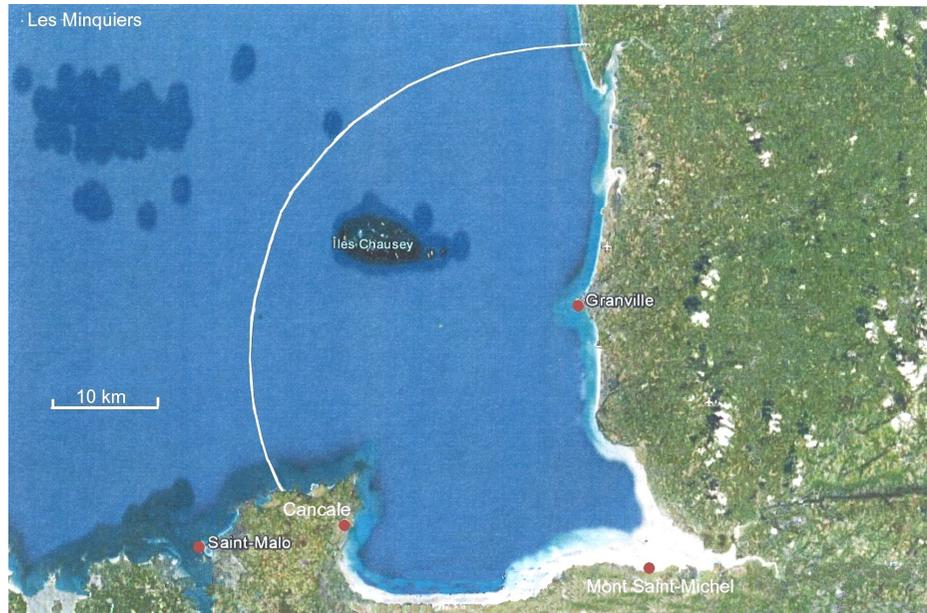
En France, l'exemple de la Baie de Somme

- L'aménagement, situé en face d'un sanctuaire écologique, le protège au lieu de l'agresser.
- Une digue de 70 km peut aller de l'Est de Dieppe au Nord de Berck créant un bassin de 1.000 km² opérant dans les 2 sens.
- L'usine (Maréliennes) est immergée. La digue, à 25 km de la Baie de Somme, est invisible depuis ce site à cause de la rotondité de la terre. Le régime des marées est maintenu à la côte, les vagues très réduites. L'impact sur la sédimentation naturelle de la Baie de Somme et sur sa gestion paraît favorable. Le recul de la falaise à l'Est de Dieppe est arrêté.
- La production est supérieure à 20 TWh/an à un coût de l'ordre de 60 €/MWh.
- On peut créer une STEP très importante pouvant dépasser 5GW.
- On peut créer un port de pêche et tourisme important près du Touquet et améliorer le port du Tréport (accès en tout temps).
- On peut y intégrer le site éolien du Tréport.



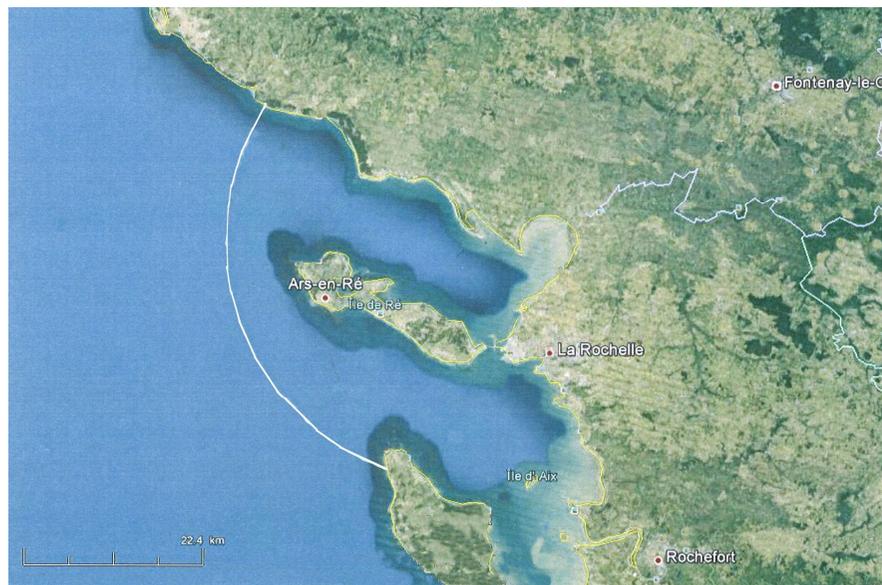
Le site de Chausey

- Les projets d'avant 1980 seraient peu acceptables actuellement car ils modifieraient le régime des marées à la côte.
- Dans le projet, la digue est reportée à 10 km à l'Ouest de Chausey, donc très peu visible de la côte et se trouve à 35 km du Mont St Michel.
- Avec une digue de 50 km peu visible et une surface de plus de 1 000 km² ce site produit 40TWh/an, autant que tous les barrages EDF, à un cout proche de 50 €/MWh.
- Le port de Granville, qui n'est plus exposé aux tempêtes peut être amélioré.
- Le littoral est protégé des tempêtes sur 100 km et peut faire l'objet d'aménagements touristiques importants.
- Le remblaiement de la baie du Mont St Michel sera très ralenti, sinon arrêté.
- La disparition des tempêtes sur les îles Chausey peut susciter des regrets.



Le site de Ré

- Ce site paraît très rentable bien que la marée moyenne soit de 3,50 m, à peine la moitié de la marée de Chausey. En effet une digue de 60 km passant 10 km à l'Ouest de l'île de Ré, protège celle-ci et abrite un bassin de près de 2 000 km².
- La production est proche de 15 TWh/an, autant que celle des 15 usines du Rhône sur 300 km.
- Le coût est de l'ordre de 75 €/MWh. La sédimentation à la côte devrait être réduite. La réduction des vagues devrait faciliter des aménagements touristiques à la côte ou le long de la digue.



Grande-Bretagne

L'utilisation des Maréliennes permet probablement :

- De porter la production du site de la Severn à près de 40 TWh/an en augmentant la surface avec une marée un peu plus faible.
- D'équiper 2 grands sites au Nord de Liverpool avec une marée de 5 m.

Il semble possible de produire 20% de l'électricité du pays à moins de 100 €/MWh. Les bassins peuvent inclure des STEPs économiques pour accompagner le développement éolien très important prévu dont une partie peut être dans les bassins.



Allemagne

La marée en face de Hambourg est proche de 3,50 m. Il semble possible de réaliser un bassin de 2.000 km² produisant 10 à 15 TWh/an à moins de 100 €/MWh.

Ce bassin peut inclure économiquement de grands parcs éoliens et 5 ou 10 GW de STEPs très utiles dans le Nord de l'Allemagne. La protection du littoral peut permettre son aménagement.

Il semble possible d'assurer en tout temps le passage de la navigation par 2 chenaux spéciaux sans écluses.



La Baie de Fundy (Canada)

La marée moyenne est proche de 8 m.

C'est un des meilleurs sites qui peut produire près de 50 TWh / an avec 50 km de digues !

Il est possible que la marée à l'extérieur des bassins soit réduite.



Vietnam (Mékong)

- La marée moyenne est de 3 m.
- Il semble cependant possible, avec 150 km de digues de produire 10 à 15 TWh/an.
- **Un intérêt majeur peut être de protéger le delta du Mékong de la montée des océans.** On peut en effet exploiter les bassins pour réduire de 1 à 2 m les niveaux hauts naturels.
- Cette même protection de deltas ou littoral bas peut s'envisager dans beaucoup d'autres pays, la protection étant payée en totalité ou en partie par la production électrique. Cependant, la nature du terrain peut empêcher certains aménagements.



Implantations mondiales

- La possibilité d'utiliser des sites de marnage entre 3 et 5 m augmente le potentiel de pays déjà étudiés comme la France ou la Grande Bretagne et ouvre à l'énergie marémotrice des pays à faible marnage comme la Chine et le Brésil.
- Le critère clef est la profondeur de la mer à 10 ou 20 km de la côte et il y a dans le monde plus de 100 000km² avec des profondeurs ne dépassant pas une vingtaine de m. C'est notamment le cas d'une grande partie de l'Asie où se trouve près de la moitié du potentiel mondial. Par contre l'Afrique a peu de possibilités ; les marnages étant assez faibles et la mer profonde près des côtes.
- La Russie, l'Australie, le Canada ont un potentiel de grands sites nettement supérieur à 100 TWh/an. France, Grande Bretagne, Chine, Brésil, Corée du sud, Etats Unis (Alaska), Inde, Argentine ont un potentiel proche de 100 TWh/an.
- D'autres pays ont un potentiel à l'échelle de 10 ou 20 TWh/an : Allemagne, Pays Bas, Chili, Panama, Pakistan, Myanmar, Bangladesh, Corée du Nord.
- De nombreux sites de taille réduite, de l'ordre de 0,5 à 1 GW, sont disponibles à un coût un peu plus élevé ; quelques uns peuvent être réalisés comme démonstrateurs avant 2025, les grands sites réalisés entre 2025 et 2060.
- Les avantages indirects peuvent varier beaucoup et payer une partie des digues.

Autres solutions

Deux solutions autres que les Maréliennes paraissent préférables à l'emploi usuel des Groupes Bulbes.

- Les turbines Orthogonales étudiées en Russie (fig.3) adaptées à l'exploitation des bassins à double sens sous faible charge. Elles sont prometteuses mais le coût au MWh du génie civil est assez élevé, surtout pour les marnages inférieurs à 5 ou 6 m. En effet le coût en pleine mer des usines est élevé alors que la production par m est assez faible.

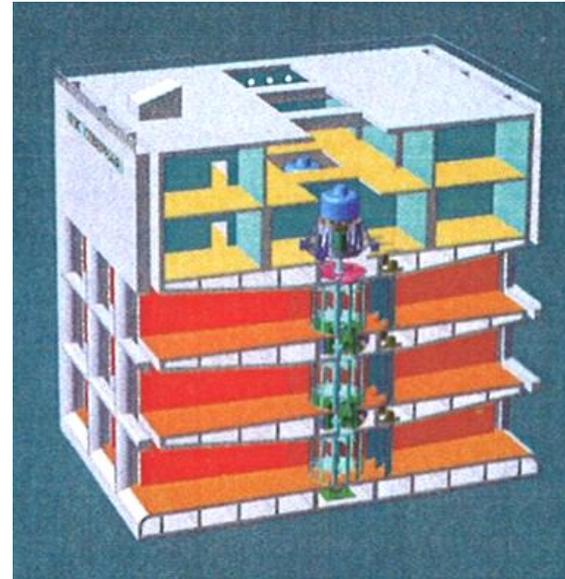


Fig.3

- La solution étudiée par E.D.F. et décrite dans Techniques de l'Ingénieur (BE 8573) utilise deux bassins associés électriquement. L'un a son niveau au dessus des marées hautes, se remplit par pompage à marée haute et turbine sous forte charge à marée basse. L'autre opère symétriquement en dessous des marées basses. Leur association garantit une fourniture continue. Cette solution peut être rentable pour de forts marnages mais modifiant beaucoup les niveaux naturels à la côte, peut avoir surtout de l'avenir dans les zones à fort marnage peu habitées (Australie, Sibérie, Nord Canada). Elle ne nécessite pas de STEPs complémentaires et utilise des groupes Bulbes dans de bonnes conditions.

Ces deux solutions sont intéressantes pour de forts marnages, mais restent probablement plus coûteuses que les Maréliennes pour les sites importants.

Avenir en France et dans le monde

Par son excellent potentiel, l'expérience incomparable de la Rance, une nouvelle solution prometteuse développable rapidement, sur des sites démonstrateurs disponibles, la France a tous les atouts pour un leadership mondial en Energie Marémotrice, et dans le stockage d'énergie économique très important qui peut lui être associé.

En mars 2013, le Rapport Gouvernemental sur les Energies Marines encourageait le développement des hydroliennes en pleine mer mais écrivait dans sa Synthèse « **L'énergie marémotrice, malgré un fort potentiel énergétique, se heurte à des difficultés d'intégration dans l'environnement (fermeture d'estuaires) ne permettant pas de projets réalistes** ». Cette phrase totalement infondée (puisque la fermeture d'estuaires ne représente que un pour cent du potentiel) conduira probablement à oublier l'Energie Marémotrice dans la loi prévue en 2014 pour la Transition Energétique.

Il est probable par contre que les pays motivés actuellement par l'Energie Marémotrice (Corée, Grande-Bretagne, Russie, Chine ...) adapteront rapidement la nouvelle solution des Maréliennes à leurs sites.

Et dans dix ans, la France copiera les réalisations chinoises ou coréennes.