Énergie marémotrice

Les conceptions françaises actuelles

Tidal power *Present French designs*

F. Boucly et S. Fuster

Électricité de France
Région d'Équipement Clamart

Les mutations qui ont marqué, dans la dernière décade, le domaine de la production d'énergie ont entraîné à l'échelon international une volonté de promotion des énergies renouvelables.

L'objet du dossier présenté ici est de faire le point des réflexions effectuées sur l'énergie marémotrice par E.D.F. et les constructeurs français.

La méthode choisie a été d'établir la faisabilité technique d'un projet aussi complet que possible, mais n'utilisant que les seules données actuellement disponibles, les travaux de reconnaissance étant volontairement exclus de l'étude. De grosses incertitudes subsistent donc notamment au niveau de la qualité des matériaux éventuellement disponibles sur le site. Le choix de ce dernier et des caractéristiques de l'aménagement ont bien sûr tenu

compte des données techniques mais ont fait, en outre, une large place à l'impact sur l'environnement.

Choix du site

L'énergie productible par une usine marémotrice est proportionnelle au carré de l'amplitude moyenne de la marée. Cette remarque est importante puisqu'elle élimine pratiquement les sites qui pour d'autres raisons se présenteraient favorablement sur l'Atlantique au Sud de Brest.

La *figure 1* rassemble les amplitudes des marnages en marées moyennes le long des côtes de la Manche.

Figure 1 — Amplitude du marnage (marée de coefficient 72).

Figure 2 — Aménagement côtier : 200 km².

Trois types de sites se trouvent équipables.

Les sites d'estuaires

Les sites possibles sont pratiquement tous situés en Bretagne (A, B, C, D, E). Ils ne permettent pas individuellement d'installer des puissances notablement supérieures à celles de la Rance.

Les sites de baie

La baie de Saint-Brieuc (1), du Mont-Saint-Michel (2) et de la Somme (3) présentent, à des titres divers, des dispositions favorables qui permettraient la construction d'usines plus puissantes.

Cependant, la bathymétrie et les activités littorales intenses de la baie de Saint-Brieuc constituent des obstacles gênants.

La zone des marnages importants de la baie de la Somme est très localisée et pourrait être perturbée par la

construction de l'usine. Elle constitue, par ailleurs, une réserve écologique.

Le meilleur site serait celui de la baie du Mont-Saint-Michel étudié depuis longtemps et de façon suivie par E.D.F. Les problèmes techniques rencontrés sont relatifs à l'épaisseur et à la mobilité de la couche sédimentaire. Ce ne sont pas les plus importants. Le Mont-Saint-Michel est un des monuments français les plus visités (1 700 000 visiteurs/an). Toute modification des conditions naturelles, même a priori favorable, dans cet environnement qui est écologiquement fragile pourrait être interprétée comme une altération.

Sites marins

La zone Cotentin Centre délimitée par Granville au sud, Gouville et la Chaussée des Bœufs au nord, s'est alors imposée à l'attention. L'amplitude des marées y est importante et la bathymétrie très favorable y permet l'installation de bassins de 200 à 400 km².

La figure 2 en fournit une illustration. La côte n'y constitue plus qu'une partie, minoritaire, des limites de la surface endiguée.

Les études ont rapidement montré qu'elle constituait cependant une source de difficultés et d'incertitudes techniques considérables.

Une modification du niveau marin y pose des problèmes difficiles à résoudre du point de vue de la protection du littoral (digues), du réseau de communication (routes inondées) de l'assainissement (stations d'épuration), de la préservation des biotopes estuariens, de l'hydrogéologie des terres basses, enfin et surtout elle engendrerait des pertes inadmissibles pour la conchyliculture qui constitue une activité en expansion sur cette zone du littoral.

Les études se sont donc orientées vers un projet essentiellement marin, figure 5. L'exploitation d'une aire étendue de hauts fonds devient l'élément déterminant du choix. Cette solution nouvelle dans le domaine de l'énergie marémotrice permet de réduire au maximum les problèmes d'environnement qui y sont devenus déterminants.

Choix du cycle

Une des difficultés de l'énergie marémotrice est de parvenir à découpler le mieux possible la production, par nature adaptée aux besoins, des mouvements naturels de la marée.

A la Rance cette souplesse est obtenue en utilisant un cycle à double effet.

L'emploi de deux bassins permet une production pratiquement ininterrompue avec des turbines à simple effet.

Les dispositions possibles des vannes et turbines sont très diverses. Les figures 3 et 4 présentent deux d'entre elles.

Le cycle Bédior a l'avantage de la simplicité. Par contre, les vannes des bassins doivent être dimensionnées de

Figure 3 — Cycle Bélidor.

Figure 4 — Cycle Caquot.

façon à assurer à la fois des débits de remplissage ou de vidange et le débit de l'usine.

La turbine fonctionne uniquement en turbinage direct. Le pompage n'a pas d'intérêt économique.

Le cycle *Caquot* ne présente pas ces inconvénients, mais le système des vannes y est plus compliqué. Il assure le maximum de souplesse d'exploitation.

La comparaison objective des divers cycles du point de vue de leur productibilité suppose que l'on a choisi à

chaque instant la stratégie optimale d'utilisation de l'usine. Celle-ci doit tenir compte des heures et amplitudes des marées, des variations journalières des valorisations de l'énergie et des limites technologiques imposées par le matériel.

Une étude économique comparative de divers cycles possibles a été effectuée par le service des Etudes économiques générales d'E.D.F. en 1982. Elle a comporté pour chaque cycle l'optimisation des surfaces de vannage et des

puissances installées, ainsi que celle du fonctionnement des usines. Un cycle intermédiaire entre le Caquot et le Bélidor, le GDEM 7, a été également étudié.

Le cycle Caquot y a montré une légère supériorité économique, qui apparaîtrait plus nettement si les différences journalières des valorisations de l'énergie venaient à s'accroître, ce qui favoriserait le pompage entre les bassins et la mer.

Il a finalement été retenu pour sa souplesse. Les turbines et les dispositifs de vannage peuvent, par ailleurs, être regroupés en deux usines qui s'intègrent bien dans le projet.

Données de site

Hydrologie marine

Marées : La marée dans le golfe Normano-breton est un phénomène quasi périodique, de période voisine de 12 h 24 mn. Dans la zone étudiée, pour un coefficient moyen de 72, les amplitudes mesurées à Granville, Régnéville, Chausey et Blainville sont en moyenne un peu supérieures à 8 m. En tout point du golfe Normano-breton le montant est plus court que le perdant.

La connaissance détaillée des variations temporelles et spatiales des niveaux dans l'ensemble du golfe Normano-breton résulte en grande partie de mesures effectuées par E.D.F. dans le cadre du projet marémoteur de la Baie du Mont-Saint-Michel.

Courantologie : La remarque précédente s'étend au domaine de la courantologie. Les phénomènes dominants qui déterminent les courants principaux sont le remplissage et la vidange de la Baie du Mont-Saint-Michel prise dans un sens géographiquement large.

Bathymétrie : Les cartes marines montrent que l'isobathe — 10 m s'éloigne dans la zone choisie très fortement du littoral et permet d'y inscrire pratiquement totalement deux bassins de 100 km².

Houle : Les mesures actuellement disponibles ne sont pas représentatives des conditions rencontrées sur la partie exposée de l'endiguement. Seule une estimation utilisant les données de vent a été possible. Elle a conduit à une houle de dimensionnement ayant les caractéristiques suivantes :

$$H_{1/10} = 8 \text{ m} \quad T = 17 \text{ s.}$$

$H_{1/10}$: Hauteur moyenne de 10 % des plus grandes vagues.

Il est certain que des mesures sont nécessaires pour affiner cette valeur qui recoupe néanmoins des mesures effectuées à Flamanville et au Sud des Iles Chausey.

Modèles : De nombreux modèles physiques et mathématiques de la Manche ont successivement été construits. Ils ont souvent servi à des études à caractère fondamental destinées à comprendre les phénomènes de propagation de la marée et la courantologie de la Manche. Deux d'entre eux ont été utilisés récemment pour les études marémotrices.

Le premier, le modèle tournant de la Manche construit à l'Institut de Mécanique de Grenoble, a permis l'évaluation de la variation de marnage lié à la construction d'un aménagement côtier de 200 km² : les perturbations apportées sont faibles (baisse de 2 %).

Par ailleurs, le Laboratoire national d'Hydraulique exploite actuellement un modèle aux différences finies, bidimensionnel qui couvre l'ensemble de la Manche, mais peut être régionalisé. Le maillage dans ce dernier cas peut alors descendre à des valeurs permettant de simuler la présence d'une usine avec une bonne précision. Son utilisation avec la géométrie actuelle du projet est en cours.

Géologie et sédimentologie

E.D.F. avait fait effectuer dans les années 1950 d'importants travaux de reconnaissance en mer au Sud des Iles Chausey. Dans la zone plus au Nord étudiée ici, seuls des documents généraux existent.

Substrat géologique : La carte géologique générale de la Manche au 1/1 000 000 effectue la synthèse des résultats connus à une échelle qui ne permet pas l'appréciation des détails dont la connaissance implique des recherches complémentaires. À côté du massif granitique des Iles Chausey se trouvent des schistes briovériens (antécambrien) qui existent également à terre. En mer, leur altération superficielle est mal connue. Des formations sédimentaires lutétiennes exclusivement sous-marines sont signalées. Leur connaissance précise impliquerait des forages de reconnaissance.

Nature et répartition des sédiments : Les données disponibles ont été rassemblées par le Laboratoire de géologie marine de l'Université de Caen pour établir la carte des sédiments superficiels de la Manche au 1/500 000.

Les fonds rencontrés ont une granulométrie variée allant des graviers aux vases. La présence de « maërl » y est attestée mais non exploitée. Le maërl est un sédiment calcaire constitué en Manche par des algues Corallinacées. Elles sont draguées au large de la Bretagne et utilisées comme amendement agricole.

La campagne d'études écologiques du golfe Normano-breton effectuée par le C.N.E.X.O. a confirmé localement ce résultat à l'aide de reconnaissance photographiques et télévisées.

Les données analysées ci-dessus ne fournissent pas de renseignements sur l'épaisseur de la couverture de dépôts meubles et sur la morphologie du toit du substrat rocheux. Pour combler cette lacune, le Laboratoire de géologie marine et le C.N.E.X.O. ont effectué en septembre 1981 une campagne de sismique réflexion légère. Les résultats obtenus, dans de mauvaises conditions de mer, montrent que l'épaisseur de sédiments est de l'ordre de 3 m dans la zone étudiée. Il est nécessaire de les confirmer et de les affiner.

Présentation du projet

Emprise de l'aménagement

Le tracé du contour des digues a été réalisé par approximations successives et a donné lieu à l'étude de très nombreuses variantes.

La figure 5 illustre la disposition choisie. La surface endiguée est de 200 km² et dépasse légèrement la limite des eaux nationales.

La disposition des usines permet en principe un écoulement facile des débits. Une vérification sur modèle est en cours. Elle pourrait entraîner des modifications de tracé si des difficultés apparaissaient.

Caractéristiques principales du projet

Surface endiguée	200 km ²
Surface bassin haut	100 km ²
Surface bassin bas	100 km ²
Longueur totale des digues définitives	69 km
Puissance installée	1440 MW
Energie nette produite annuellement	5,3 Twh

Vannes de remplissage et vidange des bassins

	Bassin haut (Ouest)	Bassin bas (Est)	Usines
Surface des vannes :	5692 m ²	5392 m ²	20371 m ²
Nombre de pertuis :	2 × 19	2 × 18	8 × 17

Caractéristiques d'un pertuis

Largeur au col l = 12 m
Hauteur au col h = 12,5 m
Surface au col S = 149,79 m²

Structures d'une usine (voir figure 6)

Nombre de pertuis :		
Vidange bassin bas	18	
Remplissage bassin haut	19	
Usine 4 × 17	68	
		105
Nombre de groupes :	18	
Puissance d'un groupe :	40 MW	

Conception des ouvrages

Digues

Les digues implantées par des fonds variant de - 1 à - 12 (C.M.) sont arasées à + 17. Outre leur exposition à la houle, elles doivent pouvoir supporter une charge égale au marnage maximum, c'est-à-dire 13 m, et être suffisamment étanches pour éviter toute détérioration par renard.

Figure 5 — Implantation générale.

Figure 6 — Schéma d'une usine.

Pour minimiser le volume des matériaux à mettre en œuvre et respecter les délais, deux types de digue sont envisagés : digue à talus et digue-caisson.

Pour des fonds compris entre - 7 et - 12, le soubassement des digues est constitué d'un tout-venant clappé emprisonnant un noyau en matériau imperméable.

Figure 7 — Profil digue souple.

Figure 8 — Coupe digue caissons.

COUPE C-C

COUPE A-A

COUPE B-B

Figure 9 — Caisson alvéolé.

Figure 11 — Coupe d'un pertuis.

Figure 12

Travaux et mode d'exécution

Provenance des matériaux

De façon à réduire l'impact sur l'environnement par l'ouverture de nombreuses carrières à terre et à minimiser les transports routiers, la majorité des matériaux utilisés proviendra de la mer. Toutefois, essentiellement pour la première phase des travaux, une quantité non négligeable de matériaux devra être d'origine terrestre.

Le sable et le tout-venant sablo-graveleux seront dragués dans les zones usines et dans des lieux d'emprunts à préciser après reconnaissance.

Les enrochements et les agrégats béton pourront être obtenus dans les excavations des usines et dans une carrière marine prévue à proximité du port de service.

Principe d'exécution

Les usines sont construites à sec à l'abri d'une enceinte étanche.

Une première étude envisageait de réaliser cette enceinte étanche avec les pertuis eux-mêmes. Ceux-ci construits dans une souille étaient amenés par flottaison et ballastés. Ce projet a été abandonné pour les raisons suivantes :

- tirant d'eau des caissons trop important,
- nécessité de dérocter un gros volume de matériaux sous l'eau.

L'enceinte est donc réalisée à l'aide de caissons digues beaucoup plus légers qui seront réutilisés plus tard en digue définitive.

Phasage des travaux

Port de service : La première phase des travaux consiste à construire un port de service en eau suffisamment profonde pour la mise à l'eau des caissons digues. Cette phase comprend :

- un terre-plein en bord de mer de 10 ha environ permettant le stockage du matériel et des matériaux;
- une digue d'accès de 4 km;
- un port de service avec un terre-plein de 5 ha pour la construction des caissons.

L'ensemble de ces ouvrages est réalisé en matériaux provenant de carrières terrestres.

Carrière marine et enceinte usine sud : Une fois le port suffisamment avancé, la construction des caissons digues

est lancée pour atteindre la cadence prévue de 1 caisson par jour. Ces caissons servent dans un premier temps à réaliser une enceinte étanche pour la carrière marine et pour les usines. La mise à sec de la zone usine sud est prévue 3 ans après le début des travaux.

Digue ouest et usine sud : Les digues sont attaquées sur plusieurs fronts : la digue ouest avec des caissons béton, la digue sud en matériaux de terrassements provenant de la carrière et de l'usine sud qui est en phase déroctage. Après déroctage, le génie civil des pertuis et des groupes peut être lancé avec des cadences respectives de 6 pertuis et 1 groupe par mois. Dès que les pertuis sont terminés, la construction de l'usine se poursuit derrière ces pertuis et les caissons de l'enceinte sont récupérés pour être mis en digue définitive.

Digue nord et usine nord : En parallèle avec la digue ouest, l'enceinte de l'usine nord est construite. Son assèchement est prévu 5 ans après le début des travaux. L'usine est alors réalisée avec les mêmes cadences que l'usine sud.

Fin des digues et mise en service : Les digues à talus du bassin bas sont terminées avec le déroctage de l'usine nord. Les premiers caissons digues de l'enceinte usine nord et de la carrière marine sont récupérés pour terminer la fermeture des bassins. Environ 7 à 8 ans après le début des travaux, l'usine sud est mise en service en bassin unique. La digue intermédiaire est terminée avec les derniers caissons et un an plus tard l'usine nord est mise en service.

Évaluation économique préliminaire du projet

Les données économiques actuellement disponibles sont provisoires et l'amélioration de leur précision un des buts de l'étude en cours.

Dans son état actuel, la mieux connue d'entre elle est l'énergie annuelle produite : 5,3 TWh. Les sources d'incertitude concernant l'actif résultent de l'évolution de la consommation.

L'évaluation du passif est encore beaucoup plus difficile et ne pourra réellement être précisée qu'à travers d'importants travaux de reconnaissance qui ne sont pas actuellement programmés.

Discussion

Président : M.R. VULSER

• *M. Le Président* remercie l'orateur et souhaite, après le « rêve » que cet exposé a pu provoquer, revenir à la discussion.

M. KERISEL remercie Le Président d'avoir évoqué le souvenir d'Albert CAQUOT; sa joie aurait été grande de constater que l'on n'a pas renoncé à examiner les grands projets marémoteurs même si leur contexte économique actuel est modifié. Il pose ensuite trois questions :

1) *Implantation* : L'emplacement prévu pour le bassin bas est très exposé aux tempêtes. N'aurait-il pas été judicieux de permuter les bassins ? c'est-à-dire mettre le bassin bas au sud-est. MM. BOUCLY et MARTIN répondent que ce fait n'a pas échappé aux projecteurs, mais que les problèmes posés par le renouvellement d'eau et l'environnement poussent à la solution retenue.

2) *Digues* : Les digues en talus inclinés, si elles sont plus vulnérables que les digues en caisson pendant la construction, sont aussi les plus résistantes face aux contraintes en service. M. PONSY indique que la solution retenue ne nécessite que 40.10^6 m³ de remblais, alors que la généralisation des digues en talus conduirait à 100.10^6 m³. Par ailleurs, continue M. KERISEL, les caissons posent problèmes : a) faible trajet de percolation — E.D.F. y apporte solution intelligente par un noyau sableux bitumineux; b) joints entre caissons. En effet, il faut craindre des tassements différentiels (dûs au tassement inégal des schistes décomposés), qui exigeront des joints à la fois souples et résistants entre structures rigides et étendues.

3) *Sécurité* : Les calculs des efforts sur les digues à parements verticaux s'étendant sur des kilomètres nécessiteront des études complémentaires.

M. MARTIN confirme que cette étude, comme beaucoup d'autres, reste à engager.

P. PONSY rappelle alors que le projet qui vient d'être présenté avait simplement pour but de confirmer la faisabilité d'un projet et d'en approcher le coût sans entrer dans le détail des études.

M. RÉTIÈRE et d'autres intervenants discutent alors de la durée des situations temporaires avant d'atteindre un nouvel état d'équilibre écologique. On peut s'attendre à un laps d'une durée d'une quinzaine d'années après achèvement des travaux; mais l'amplitude des perturbations sera atténuée par la dispersion et le

fait que le projet est « en atoll ». Enfin, la sédimentologie des fonds sera un élément capital.

A une intervention de *M. BOURDON* citant en exemple les nouvelles méthodes mises en œuvre pour les travaux du Grand Delta Hollandais, *M. AUBERT* répond que si ce projet est effectivement un modèle pour l'exécution, il estime que les méthodes utilisées sont trop onéreuses. *M. VULSER* précise alors que, bien entendu, il sera tenu compte des méthodes expérimentées ailleurs.

M. AUBERT se demande si l'utilisation de structures métalliques légères — du type de celles utilisées pour les « coupures » fluviales ! — ne serait pas de nature à faciliter la construction des digues à talus. Il pense aussi que l'exploitation d'alluvions trouvées dans l'emprise de l'ouvrage constituerait une atteinte à l'environnement moins sévère que toutes les autres. Il abordera ces deux sujets directement avec les responsables compétents d'E.D.F.

M. GERLIER qui connaît bien le site pour y naviguer, souligne les perturbations considérables et les troubles de tous ordres — qui ont été évoqués — et que ne peut manquer de créer un tel ouvrage sur les côtes voisines, il déclare que l'on doit, en outre, prendre en compte la profonde altération des sites et notamment, ceux de Chausey, Granville et même Jersey, ce qui pose aussi des problèmes.

M. GERLIER poursuit, en demandant quel serait, par rapport à une centrale nucléaire comme Flamanville, l'intérêt d'un tel aménagement qui bouleverserait le littoral et par suite, la conchyliculture et la pêche.

M. VULSER répond que la puissance de l'usine marémotrice qui a été décrite pourrait être de l'ordre de 1 400 MW soit la moitié de celle de la centrale de Flamanville lorsque les deux tranches en construction seront en service. Il rappelle que ce qui a été présenté est seulement un schéma d'aménagement et qu'avant d'aller plus loin dans l'établissement d'un projet, il faudrait peser soigneusement les inconvénients qu'il peut présenter pour l'environnement par rapport aux autres moyens de production d'énergie.

M. VULSER clôt la réunion à 17 h 45.