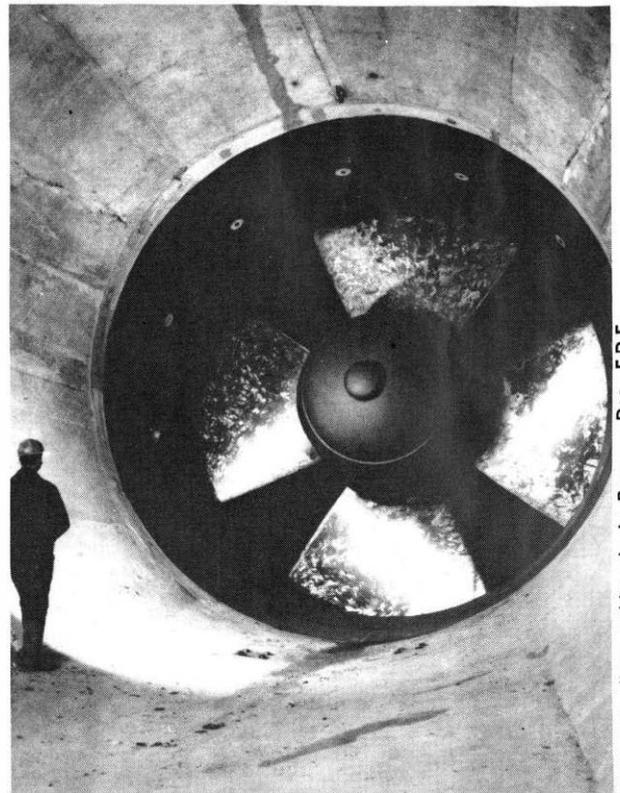


René BONNEFILLE

l'énergie marémotrice



Vue de face d'une turbine de la Rance - Doc. E.D.F.

TIDAL ENERGY AND HABITAT

France is the only country which has developed tidal energy on an industrial scale. It has been possible to gain from this experiment certain knowledge about this type of energy.

This form of energy can only be used in certain areas and is not limitless : the available tidal energy in the world is estimated at 400 000 million kWh.

It can be exploited by means of three methods :

- one-way system, where production is discontinuous
- two-way system, where it is continuous
- combined system : in this case, minimal production can be maintained.

The plant on the Rance — Brittany, France — uses the second system. It produces 500 million kWh a year. It proves that this form of energy production is competitive ; developed from this experiment, projects have been drawn up, for producing 25 000 million kWh a year. The building of a tidal energy plant is based on long and complex research. As to the main criteria used in choosing a site, one should mention the amount of available natural energy and the relation between available energy and the size of dams.

The technology developed in the experiments of tidal energy plants has made it possible to create low-power units used in rivers ; but in a country having a dense electricity network, they are not viable for the present.

Avec la réalisation de la Rance, la France est le seul pays ayant développé l'énergie marémotrice jusqu'au stade industriel.

Cette expérience permet de tirer des enseignements sur ce type d'énergie.

L'énergie marémotrice a contre elle deux désavantages ; d'une part elle est mal distribuée : ce n'est que dans les zones où le marnage est important, plus de 4 m pour fixer les idées (figure 1), que son utilisation peut être envisagée ; d'autre part, elle n'est pas illimitée, les ressources mondiales en énergie marémotrice utilisables annuellement sont estimées à 400 milliards de kWh.

Une usine marémotrice peut être exploitée suivant 3 méthodes différentes (figures 2 et 3) :

— Dans le cycle à simple effet, le bassin isolé de la mer est rempli par des vannes à marée montante ; il se vide à marée descendante à travers les turbines.

Ce type de fonctionnement, avec des turbines classiques, était le seul considéré jusqu'à l'avènement des groupes bulbes immergés ; il a comme inconvénient de ne permettre qu'une production d'énergie discontinue.

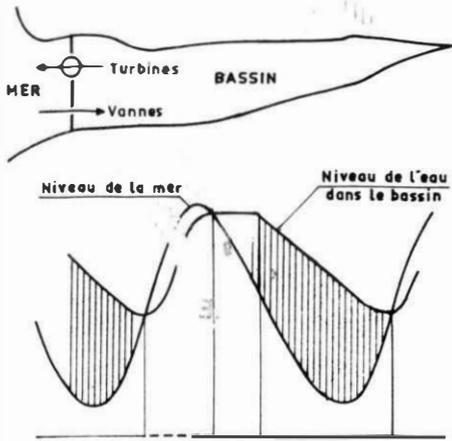
— Le cycle à double effet répartit mieux la production d'énergie journalière en turbinant aussi l'eau de remplissage du bassin, dans la mesure où les machines s'accoutument de la marche dans les deux sens de l'écoulement. Si de plus les groupes peuvent fonctionner en

pompe, un stockage de l'eau à pleine mer permet de valoriser l'énergie de pompage de l'eau à pleine mer.

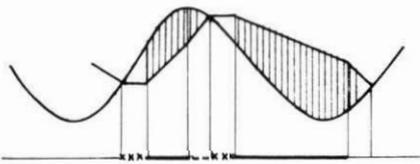
— Le cycle de Belidor et ses variantes (cycle mixte) situe l'usine entre 2 bassins dont les niveaux sont toujours différents, l'un étant alimenté à pleine mer, l'autre à basse mer. Dans ce cas une production minimale peut être garantie.

La Rance est une usine qui fonctionne suivant la méthode du cycle à double effet avec pompage. C'est un avantage du point de vue écologique car les niveaux dans le bassin — l'estuaire du petit fleuve La Rance — retrouvent leur variation naturelle seulement décalée dans le temps ; moyennant quelques contraintes dans le fonctionnement il est possible d'éviter d'atteindre les niveaux écologiquement nuisibles, c'est-à-dire les niveaux trop hauts ou trop bas. L'inconvénient est que les fortes productions d'énergie, qui ont lieu quelques heures après les pleines-mers de vive-eau, peuvent se situer en dehors des périodes de pointe ; c'est le cas pour la Rance dont la production est maximale aux débuts de la journée et de l'après-midi. L'usine a une puissance installée de 240 MW (24 groupes de 10 MW) ; elle produit en moyenne 500 millions de kWh par an qui est en fait concentrée sur 2 000 h.

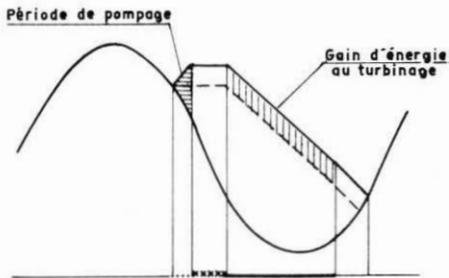
Après 8 ans de marche de l'usine il est possible d'en faire un bilan financier précis : les frais d'exploitation s'élèvent en moyenne à 1,6 c 1974 par kWh, et les



CYCLE A SIMPLE EFFET AU VIDAGE



CYCLE A DOUBLE EFFET



POMPAGE AVEC SUR-REPLISSAGE DU BASSIN

SCHEMA DE FONCTIONNEMENT D'UNE USINE MAREMOTRICE A UN BASSIN

(L'énergie produite est représentée par l'aire hachurée)
 turbinage ——— Attente x x x x
 Pompage Vannes ouvertes - - - -

Fig. 2

frais d'amortissement des installations (850 MF 1974) à 9 c par kWh, d'où un prix de revient de l'énergie 10 à 11 c/kWh.

La marche de l'usine est déterminée à partir de la méthode de Programmation Dynamique, outil classique en Recherche Opérationnelle, mise au point par Electricité de France, et qui maximise la recette de l'usine à partir de la connaissance de la marée, du prix des énergies, des disponibilités en énergie, des indisponibilités des matériels (groupes ou vannes) et des contraintes écologiques et de navigation dans l'estuaire. Le programme de marche est défini à l'avance de façon à pouvoir en avertir les usagers de l'estuaire ; en cas d'aléas sur la marée ou les matériels, il est corrigé

au moment de l'exécution par un ordinateur local.

L'usine de la Rance a donc prouvé la compétitivité de l'énergie marémotrice ; celle-ci peut actuellement être encore accrue compte tenu des progrès en travaux maritimes et sur les groupes bulbes depuis 1966 date d'inauguration de l'usine.

La construction de l'usine de la Rance a donné l'essor aux groupes bulbes, qui atteignent actuellement des puissances unitaires de 40 MW, à l'utilisation des bétons à la mer et surtout à la solution des problèmes de corrosion en eau de mer. Les résultats ont permis d'établir de nouveaux projets français : une usine de 12 GW (300 groupes de 40 MW) produisant 25 milliards de kWh par an et même en utilisant nuitamment de l'énergie nucléaire (30 milliards de kWh) la possibilité de fournir de jour 50 milliards de kWh par an.

Mais installer une usine marémotrice nécessite des études préliminaires, qui peuvent durer plus d'une dizaine d'années. Ce sont :

- des mesures océanographiques (houle et courants, marée) ;
- des mesures sédimentologiques pour estimer les évolutions des fonds qui peuvent résulter des modifications des courants ;
- des études sur modèles physiques ou mathématiques pour définir les modifications des conditions hydrauliques (marées et courants) dues à la présence et au fonctionnement de l'usine. Une usine marémotrice capte l'énergie de l'onde-marée, elle peut modifier fortement celle-ci et en particulier diminuer le marnage, ce qui signifie que dans un site donné, favorable du point de vue génie civil, il existe une valeur maximale de l'énergie à produire économiquement ;
- des études sur le choix des cycles de fonctionnement et le calcul de l'énergie produisible ;
- des études hydrauliques concernant les entraves à la navigation et les intumescences résultant des incidents de fonctionnement ;

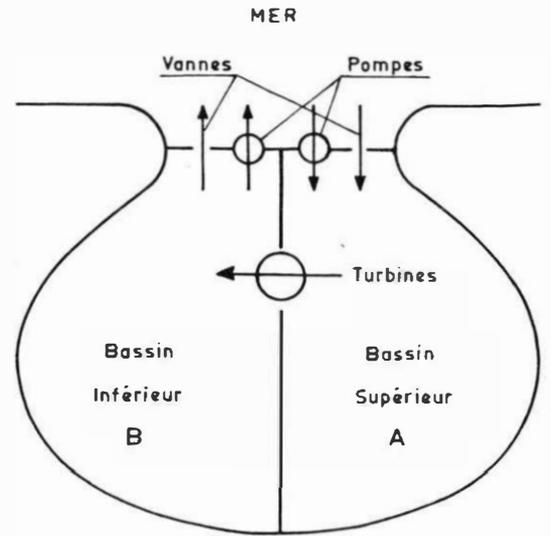


Fig. 3

— des études du comportement des groupes à la houle, etc...

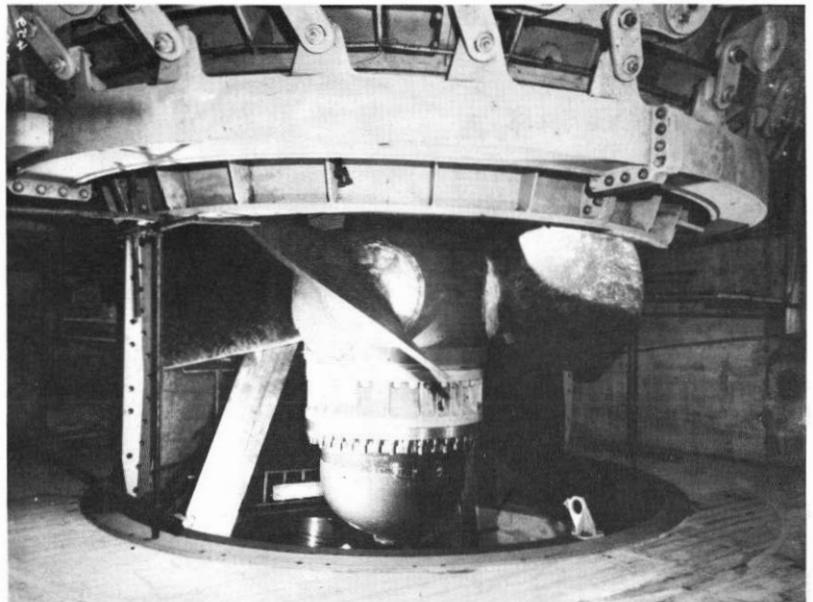
Il est à noter que dans le cas des usines de grande puissance, les dimensions de la zone marine intéressée par l'usine peuvent dépasser les 100 km et dans ce cas leurs études sur modèle réduit hydraulique nécessitent de tenir compte de la force de Coriolis due à la rotation de la terre ; à cet effet une plate-forme tournante de 14 m de diamètre a été construite à l'Université de Grenoble.

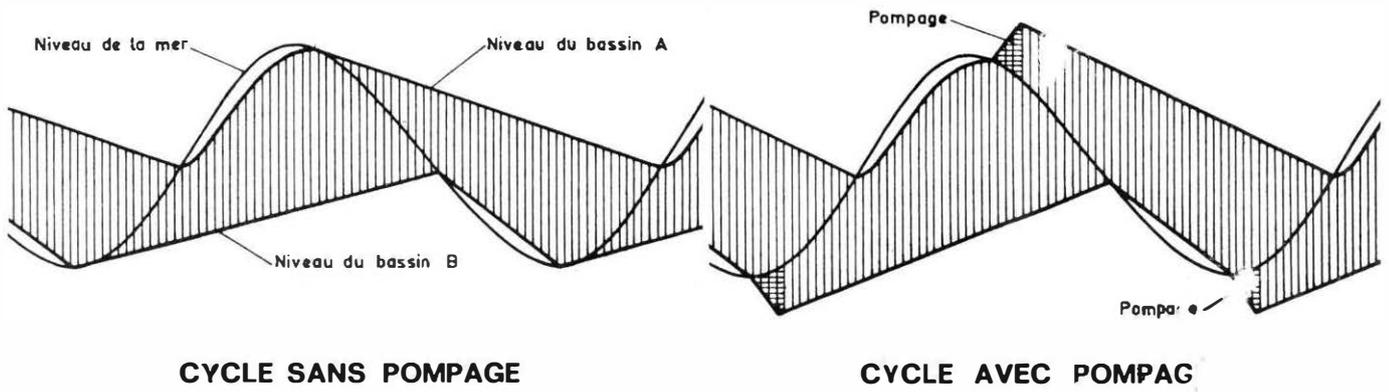
La conception d'une usine marémotrice nécessite donc la mise en œuvre de toute une doctrine de décision, qui peut se baser sur des comparaisons avec les projets et des réalisations françaises. Parmi les critères citons :

- l'énergie naturelle
- $$E(\text{kWh/an}) = 10^6 S(\text{km}^2) \cdot A(\text{m})$$

S étant la surface du bassin et A le marnage en vive-eau ; elle vaut 2 850 millions de kWh à la Rance pour 500 réelles produits sous forme électrique, soit un

Vue de dessus d'une turbine de groupe de l'usine marémotrice de la Rance - Doc E.D.F.





SCHEMA DE FONCTIONNEMENT D'UNE USINE MAREMOTRICE A 2 BASSINS

rapport de 5,7; dans le cas du grand projet des Iles Chausey le rapport vaudrait 4,7;

— le rapport E/L, L désignant les longueurs des digues (720 m à la Rance), ce rapport vaut 3,94 GWh/m . an à la Rance, 4 pour Chausey; il est assez caractéristique de la rentabilité de l'aménagement; il vaut 4,27 à Passamaquoddy (USA) et 7 à San José (Argentine).

Peut-on imaginer des usines marémotrices de petite puissance? Des projets de barrages de très petits estuaires ont été établis en France; ils ne seront pas exécutés car leur rentabilité se situe très au-dessus des critères de choix des investissements en usage dans un pays où existe un réseau de distribution électrique très dense. Il peut en être autrement pour l'alimentation de communautés ou d'industries isolées; il semble qu'alors il convienne de s'orienter vers un cycle du type Belidor. Il est bon de savoir que techniquement les groupes bulbes de petite puissance utilisés sur les micro-centrales installées sur les cours d'eau ne posent plus de problèmes. Dans le cas où l'usine servirait essentiellement au chauffage d'un village ou d'une petite ville maritime, le problème serait résolu en utilisant des accumulateurs de chaleur classiques à eau ou à briques réfractaires. Dans ce cas l'usine devrait être sous-équipée de façon à ce que le bassin constitue une réserve d'accumulation partielle d'eau pour compenser l'inégalité des marnages entre les périodes de vive-eau et de morte-eau.

Sur le plan pratique, l'expérience française en ce domaine, acquise par les ingénieurs d'Electricité de France et les constructeurs des groupes bulbes, est utilisable sur le plan des conseils en matière de conception des aménagements et de la conduite des études; rappelons que la plate-forme tournante de l'Université de Grenoble construite pour les études hydrauliques des usines marémotrices est unique au monde. En ce qui concerne la réalisation, construire une usine maré-

motrice relève de la technique des travaux à la mer universellement répandue.

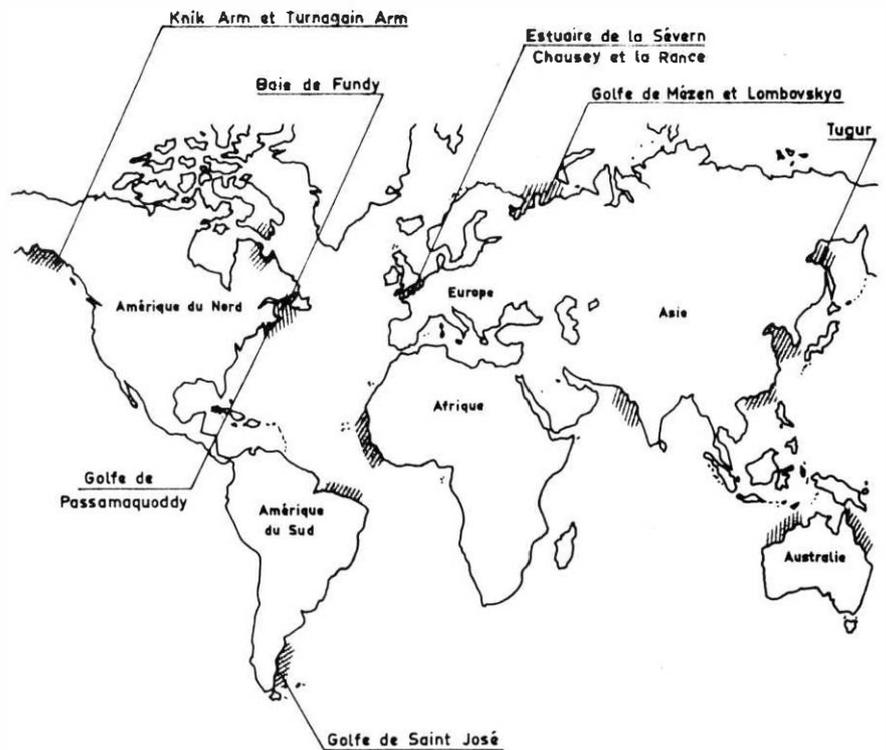
La partie fondamentale d'une usine marémotrice est le groupe bulbe. Or l'avantage essentiel du groupe bulbe, pour lequel il a été conçu à l'origine, est de permettre l'utilisation des chutes d'eau de très faibles dénivellées — quelques mètres. Le développement et l'utilisation de l'hydroélectricité à l'échelle des puissances de 10 à 100 kW passent donc par le groupe bulbe.

L'autonomie de l'énergie hydraulique sous forme électrique ou mécanique n'est plus à démontrer. L'énergie marémotrice à des fins d'utilisation industrielle locale à

l'échelle de 100 à 10 000 kW, a contre elle de ne pas avoir de puissance minimale garantie, sauf dans le cas des usines fonctionnant avec le cycle de Belidor lequel nécessite des ouvrages de génie civil plus importants que les autres. Le choix de l'utilisation de cette énergie pose donc un problème particulier à chaque site.

René BONNEFILLE

Docteur ès-Sciences
Direction des Etudes
et Recherches d'EDF



ZONES DE MAREE MOYENNE SUPERIEURE A 4m
EMPLACEMENT DES GRANDS SITES MAREMOTEURS

Fig. 1