

L'usine marémotrice de la Rance

Bernard GUILLEMOT

Des moulins à marées à l'usine marémotrice, une même idée et une réalisation de haute technologie précédée de projets parfois utopiques.



Le Moulin du Vor à Ploumanac'h.

I l n'est pas habituel dans Penn ar Bed d'étudier les sites industriels, mais pouvait-on faire un numéro spécial sur l'estuaire de la Rance sans parler de l'usine marémotrice qui reste, près de 30 ans après sa mise en service, l'unique usine de taille industrielle. Mais avant de la décrire, il convient de faire un bref panorama des grandes idées qui ont soutenu l'usage de l'énergie marémotrice.

Principe et contraintes

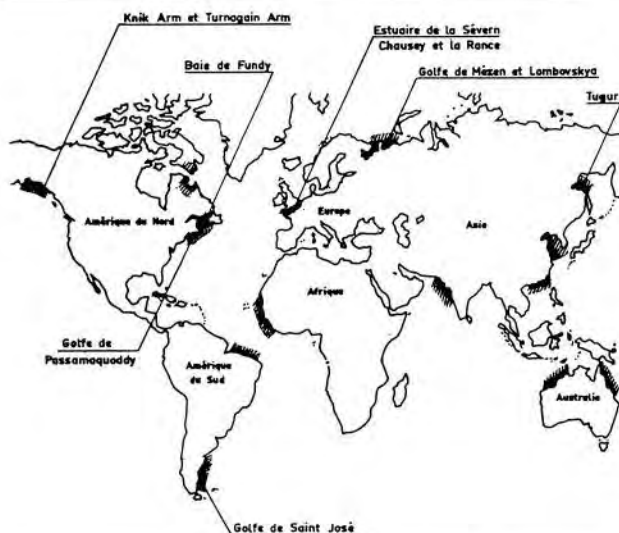
L'usine de la Rance utilise l'énergie potentielle des marées de la même façon que le firent ses ancêtres : les moulins à marée, l'estuaire de la Rance

a compté jusqu'à 15 moulins à marée. Le principe en est simple : en barrant un bras de mer et en contrôlant les échanges entre celui-ci et la mer, on a créé avec le jeu des marées une différence de niveau qu'on utilise pour être transformée en énergie mécanique dans les moulins ou, par l'intermédiaire d'un alternateur, en énergie électrique.

"L'énergie naturelle" d'un site marémoteur peut être estimée à partir de la formule suivante empruntée à R. Gibrat :

$$E = 1,97 S \times A^2$$

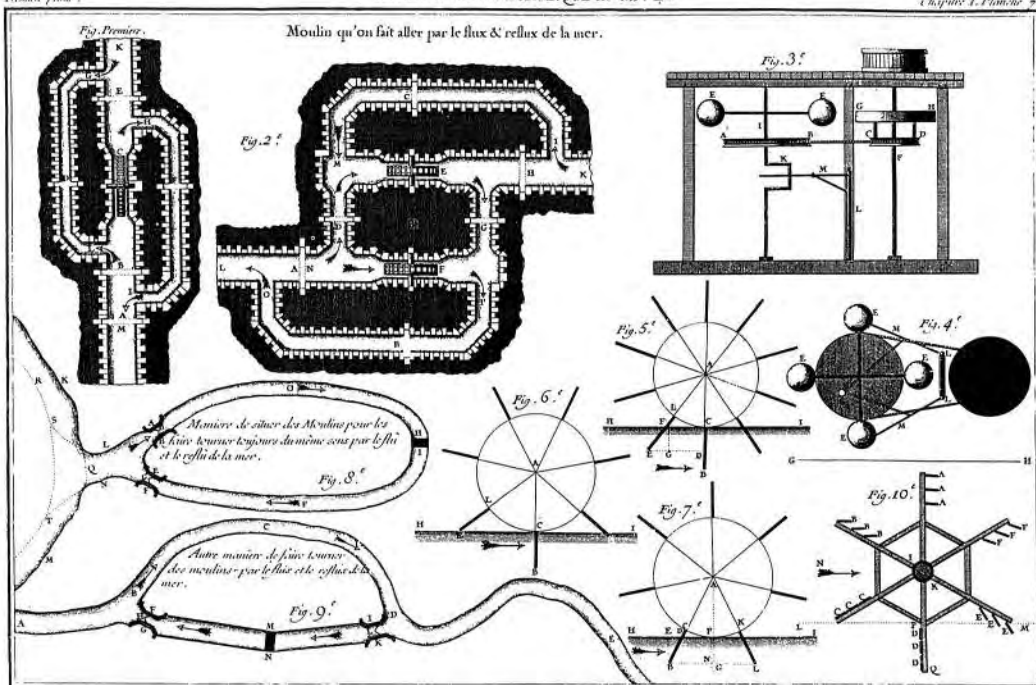
avec : E : en million de kWh par an ;
S : surface de l'estuaire à la cote de marnée en km² ; A : amplitude moyenne des marées en m.



Répartition des sites favorables à l'exploitation de l'énergie marémotrice dans le monde.

Mais cette "énergie naturelle" est loin d'être entièrement exploitable : elle ne tient pas compte du "remous", c'est à dire de la perturbation apportée par l'usine marémotrice à l'onde de marée. Ainsi pour la Rance "l'énergie naturelle" est de 2850 MWh/an, mais la production moyenne annuelle est de l'ordre du $1/5^{\text{ème}}$

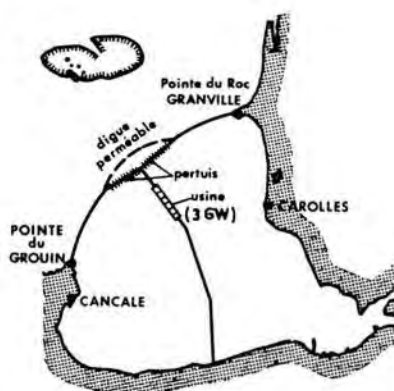
de ce chiffre. Toutefois le rapport "énergie naturelle" sur la longueur de digue nécessaire est un bon indicateur de l'intérêt d'un site. Ainsi un classement des sites réalisé en 1976 montre l'intérêt de celui de la Rance sur les autres sites dans le monde. Il n'est surpassé que par deux sites en Alaska, un en Argentine et



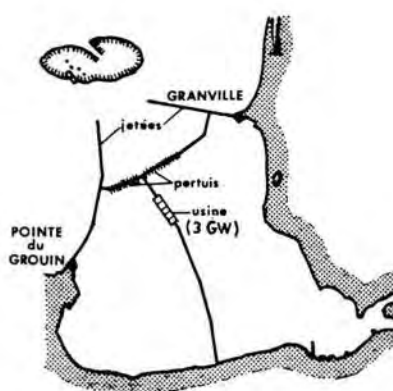
Les moulins à marée, d'après Belidor 1737 : Architecture hydraulique.

Sites	Marnage (m) $A_{100}(\text{France})$ A_{ailleurs}	Surface du bassin S (km ²)	Energie naturelle E (GWh/an)	Longueur des digues L (km)	E/L (GWh/m)	Puissance installée P (GW)	Production annuelle W (GW/an)
France :							
Lorient	4,5	16	325	0,75	0,43		
Brest	6,4	92	3 750	3,64	1,03		
Aber-Benoît	7,4	2,9	160	0,20	0,80		
Aber-vrac'h	7,4	1,1	60	0,19	0,32		
Arguenon et Lancieux	11,4	28	3 650	6,28	0,65		
La Fresnaye	11,4	12	1 530	2,76	0,55		
La Rance	11,4	22	2 850	0,72	3,94	0,24	540
Rotheneuf	12,0	1,1	160	0,33	0,48		
Chausey (EDF 1958)	12,4	610	94 000	23,50	4,00	10	20 000
Chausey (A. Caquot)	12,4	780	120 000	100	1,2	6	34 000
Somme	9,3	49	4 300	5,1	0,85		
Grande Bretagne :							
Severn	9,8	70	13 400	3,5	3,82	0,84	2 300
URSS :							
Kislaya Guba	2,4	2	2	0,032	0,69	0,0004	
Baie de Lumbovskaya	4,2	70	2 500	5	0,50	0,38	915
Golfe de Mezen	5,6	2 000	12 600	110	1,14	14	36 000
Estuaire de Mezen	6,6	140	16 800	10	1,6	1,3	2 500
Baie de Tugur (Mer d'Okhosth)	4,3	1 100	41 000	17	2,4	10	25 000
Etats-Unis :							
Passamaquoddy	5,5	120	7 000	4,27	1,64	1	
Alaska :							
Turnagain Arm	7,3	650	69 000	11	6,3		12 500
Knik Arm	7,3	220	23 000	3	7,6	2,8	6 000
Argentine							
San José	5,9	750	52 000	7,0	7,4	7	75 000
Canada (Baie de Fundy)							
Shepody Bay	9,8	100	19 000	8	2,4	2,9	5 400
Cumberland Basin	9,7	90	17 000	5	3,4	2,4	3 900
Cobequid Bay	11,3	240	61 000	10	6,1	3,5	7 500

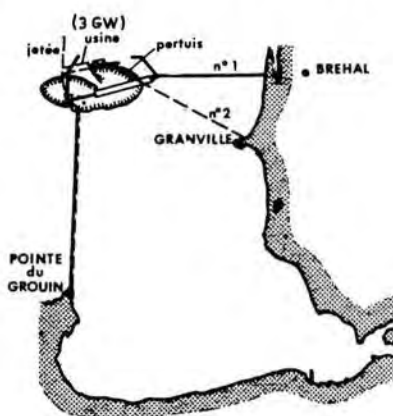
Comparaison des projets d'usines marémotrices.



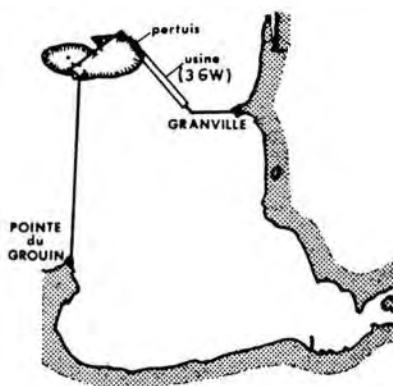
PROJET DE L'ÉNERGIE DES MAREES 1942



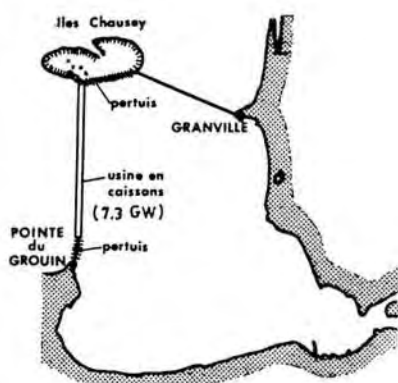
PROJET FLEURY 1947



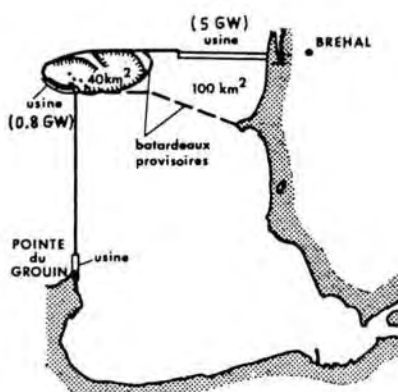
PROJETS J. VELUT 1951 (n°1 et 2)



PROJET J. VELUT 1952



PROJET BOUVIER 1953



PROJET J. VELUT 1953

Echelle :
1/1 000 000

Les différents projets de Chausey de 1942 à 1953.

étang de 1,3 ha de la mer, la force motrice sert à produire de la glace grâce à une machine Pictet. En fonctionnant deux fois 8 heures, la production est de 450 kg de glace par jour qui sert à l'expédition des poissons de l'étang utilisé en réserve de pêche. Outre la production de la glace, l'énergie captée entraîne une dynamo qui sert à l'éclairage de l'usine.

Il faut aussi citer le projet de l'Aber-Vrac'h qui a fait l'objet d'un décret de concession le 22 août 1924 et même d'un début de réalisation.

Son originalité était d'être constituée de deux usines permettant de régulariser la production : une usine marémotrice à Beg-en-Toul et une usine gravitaire au pied d'un barrage de 35 m au Diouris en fond d'estuaire. Cette usine gravitaire était même équipée de deux pompes qui devaient permettre d'utiliser la surproduction de l'usine marémotrice aux heures de fonctionnement pour remonter l'eau dans le réservoir supérieur.

L'énergie produite devait être acheminée jusqu'à l'arsenal de Brest, la consommation locale étant inférieure à la production.

Les projets de la baie du Mont Saint Michel

Très rapidement, outre les deux projets ci-dessus, l'attention des projeteurs s'est cristallisée sur la baie du Mont Saint Michel.

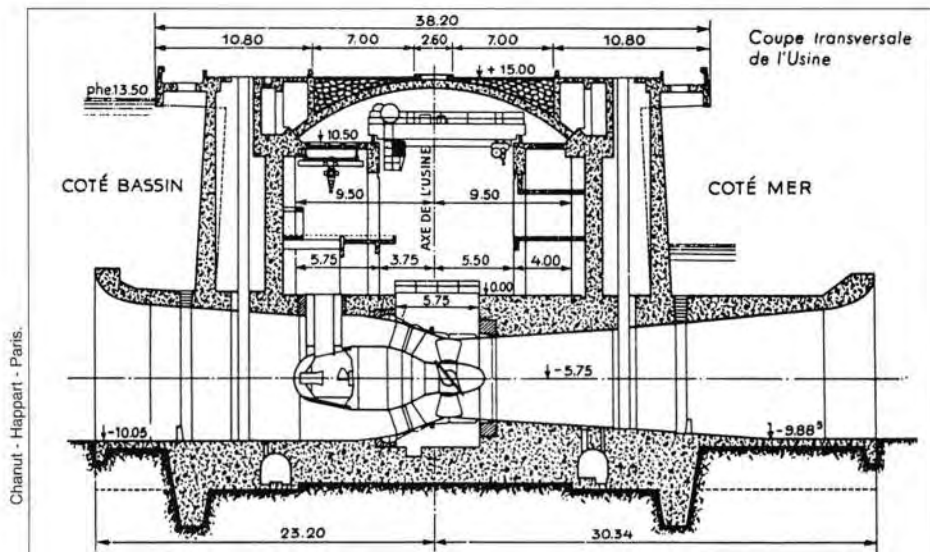
On dénombre entre 1942 et 1953 au moins six projets avec une digue principale reliant la pointe du Grouin à Granville et pour deux d'entre eux une digue intermédiaire permettant de créer deux bassins.

Alors qu'avec un seul bassin, comme la Rance, la production est concentrée sur quelques heures par jour et tributaire des marées, deux bassins mis en communication avec la mer par des vannes permettent une production continue : on maintient une dénivellation permanente entre les deux en remplissant le bassin supérieur à marée haute et en vidant le bassin inférieur à marée basse. Les machines sont installées dans la digue séparant les deux bassins et turbinent le débit quasi constant entre ceux-ci.



EDF/ H. Baranger

*Groupe-bulbe ;
turbine horizontale
à quatre pales
vue de la mer.*



Coupe par une travée de groupe-bulbe.

Les projets précédants étaient prévus avec des turbines à hélice, à pas variable et axe vertical qui ne peuvent turbiner l'eau que dans un sens et des puissances installées de 3000 à 7000 MW (le site nucléaire de Flamanville dans le Cotentin fait 2600 MW avec deux tranches).

Dans les années 50, l'avènement des groupes - bulbes, (l'alternateur étant logé dans un bulbe immergé dans la veine fluide derrière l'hélice), permet d'envisager des cycles à double effet (turbinage dans les deux sens) et incite des entreprises - SGE Fougérolles et EDF - à reprendre les projets. Les puissances envisagées sont de l'ordre de 12000 MW et les digues principales ferment la baie du Mont Saint Michel selon une ligne brisée : Pointe du Grouin-Chausey-Bréhal.

Ces deux projets étaient prévus avec un seul bassin, la digue intermédiaire étant une digue morte dont la fonction principale était de permettre une réalisation en deux phases et ainsi de débiter la production au plus vite, donc de diminuer la durée d'immobilisation des capitaux.

En 1971, Albert Caquot propose d'installer une usine de 6000 MW entre les Minquiers et les îles Chausey, avec une puissance garantie (puissance minimale du cycle) de 3900 MW grâce à deux bassins de 1100 km² fermés par une

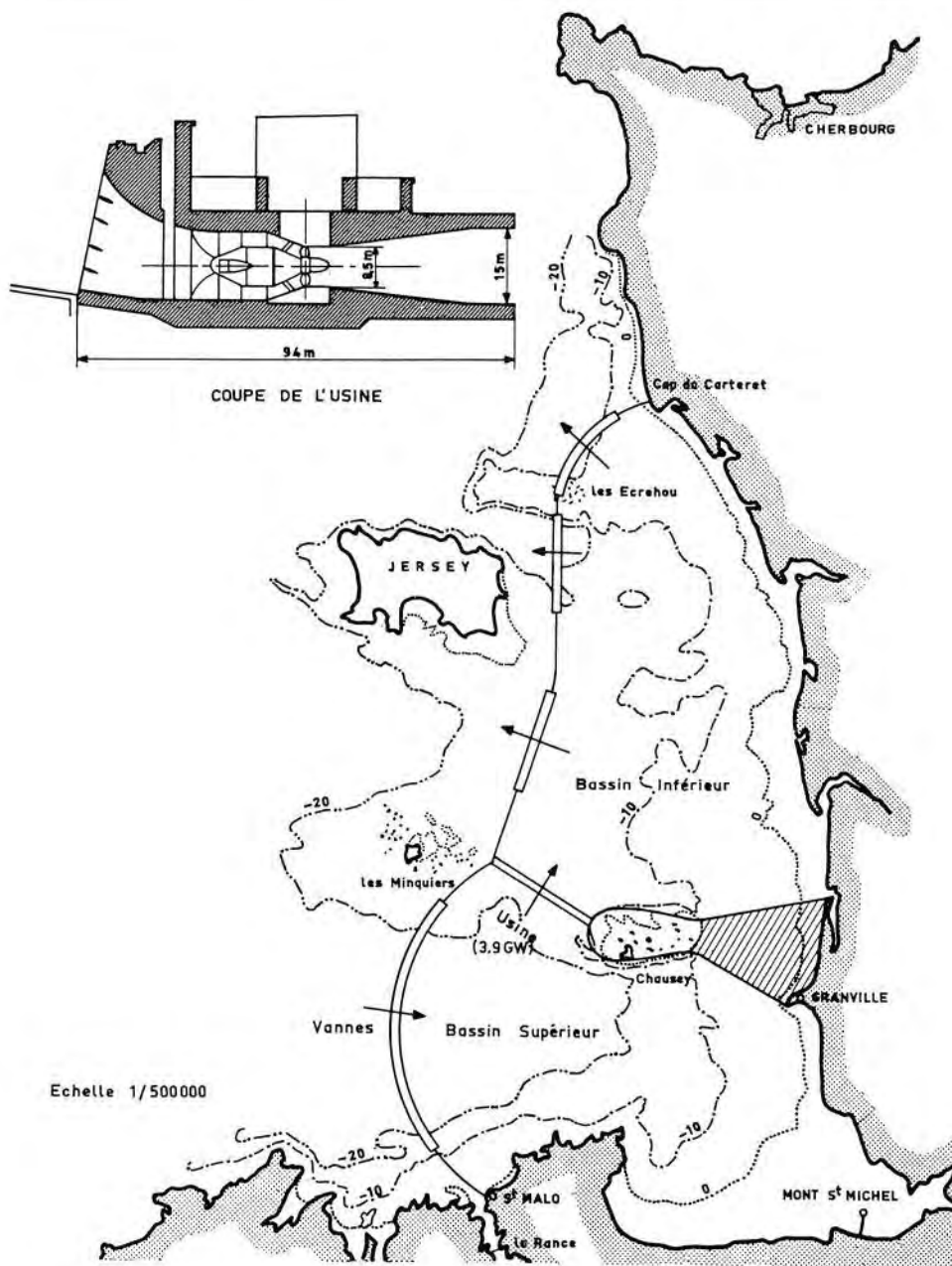
digue reliant Saint Malo, les Minquiers et le Cap Carteret. Ce projet grandiose se heurte à des difficultés pour réunir les moyens de réalisation en particulier financiers, et il n'aurait pas été sans poser des problèmes écologiques importants.

La reprise des études par EDF au début des années 80 l'amène pour des raisons écologiques à rebâtir un projet entièrement en atoll au nord des îles Chausey. Comportant deux bassins de 100 km² chacun, une puissance installée de 1440 MW et une production nette de 5300 MWh/an, sa production serait équivalente à celle d'une tranche nucléaire de Flamanville.

Les conditions économiques, et en particulier les taux d'actualisation élevés de l'argent qui rendent négligeable, dans les calculs économiques, la valorisation de la production au-delà des 10 à 15 premières années, alors que la durée de vie d'un tel ouvrage est plutôt de l'ordre du siècle, n'ont pas permis sa réalisation, ni d'autres réalisations dans le monde.

Les modèles réduits

Tous ces projets eurent pour résultat d'entraîner de nombreuses études sur la formation et le déplacement de l'onde de marée dans la Manche, sur les courants,



Projet d'Albert Caquot.

la houle, la géologie. Deux tours mobiles : le ludion, 40 m de haut et le micro-ludion, 25 m, furent construites pour réaliser des sondages. Ceci fait de la Manche une des zones maritimes les mieux connues dans ces domaines.

La validité des hypothèses retenues dans les projets ne pouvait être confirmée que par des essais sur modèles réduits. Plusieurs ont été réalisés. Il s'agissait non seulement de vérifier les meilleures conditions de construction et

de prévoir les niveaux de production, mais aussi de s'assurer que la réalisation du ou des projets n'entraînerait pas une atténuation de l'onde de marée, son amplitude étant due à des phénomènes de résonances. Dès 1944, un premier modèle de la Rance, conçu pour s'étendre jusqu'à l'île de Cézembre est réalisé au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique à Grenoble. (échelle 1/500 en plan, 1/80 en profondeur). Il a rendu des services pendant 10 ans.

Mais la plus importante de ces maquettes fut la maquette dite "Coriolis", réalisée à Grenoble sur une plate-forme tournante de 14 m de diamètre permettant de reproduire les forces résultant de la rotation de la Terre (force de Coriolis) elle représente la Manche à une échelle de 1/50000^{ème} en plan et 1/500^{ème} en profondeur. L'échelle des profondeurs plus importante que celle en plan permet d'éliminer les effets de la tension superficielle de l'eau qui perturberait les résultats en faible profondeur.

Cette réalisation remarquable permit une représentation fidèle des marées en Manche et a constitué de ce fait un outil de recherche fondamental.

D'autres modèles fixes furent construits, avant le modèle Coriolis pour définir les conditions de réalisation, ou après, pour examiner des points particuliers de construction, mais ils ne présentèrent pas le même intérêt fondamental.

Une réalisation : l'usine marémotrice de la Rance

Malgré tous ces projets et d'autres dans le monde, la Rance reste la seule réalisation de taille industrielle ce qui lui vaut régulièrement la visite d'équipes travaillant de par le monde sur les projets marémoteurs : Grande-Bretagne, Canada, Russie, Inde....

Principales caractéristiques :

Les ouvrages sont implantés entre la pointe de la Brebis en rive gauche de l'estuaire et la pointe de la Briantais en

Force de Coriolis

On attribue souvent à cette force le sens de rotation du "Vortex" (tourbillon) qui se forme dans nos lavabos ou baignoires lorsqu'on les vide, expliquant que celui-ci serait de sens opposé selon que l'on se trouve dans l'hémisphère nord ou l'hémisphère sud. En réalité à l'échelle de nos salles de bain, ou de celles de nos condisciples vivant aux antipodes, la force de Coriolis est négligeable devant les autres forces régissant le mouvement de l'eau et en particulier les dissymétries d'écoulement et les rotations induites par les changements de direction à l'aval immédiat du récipient.



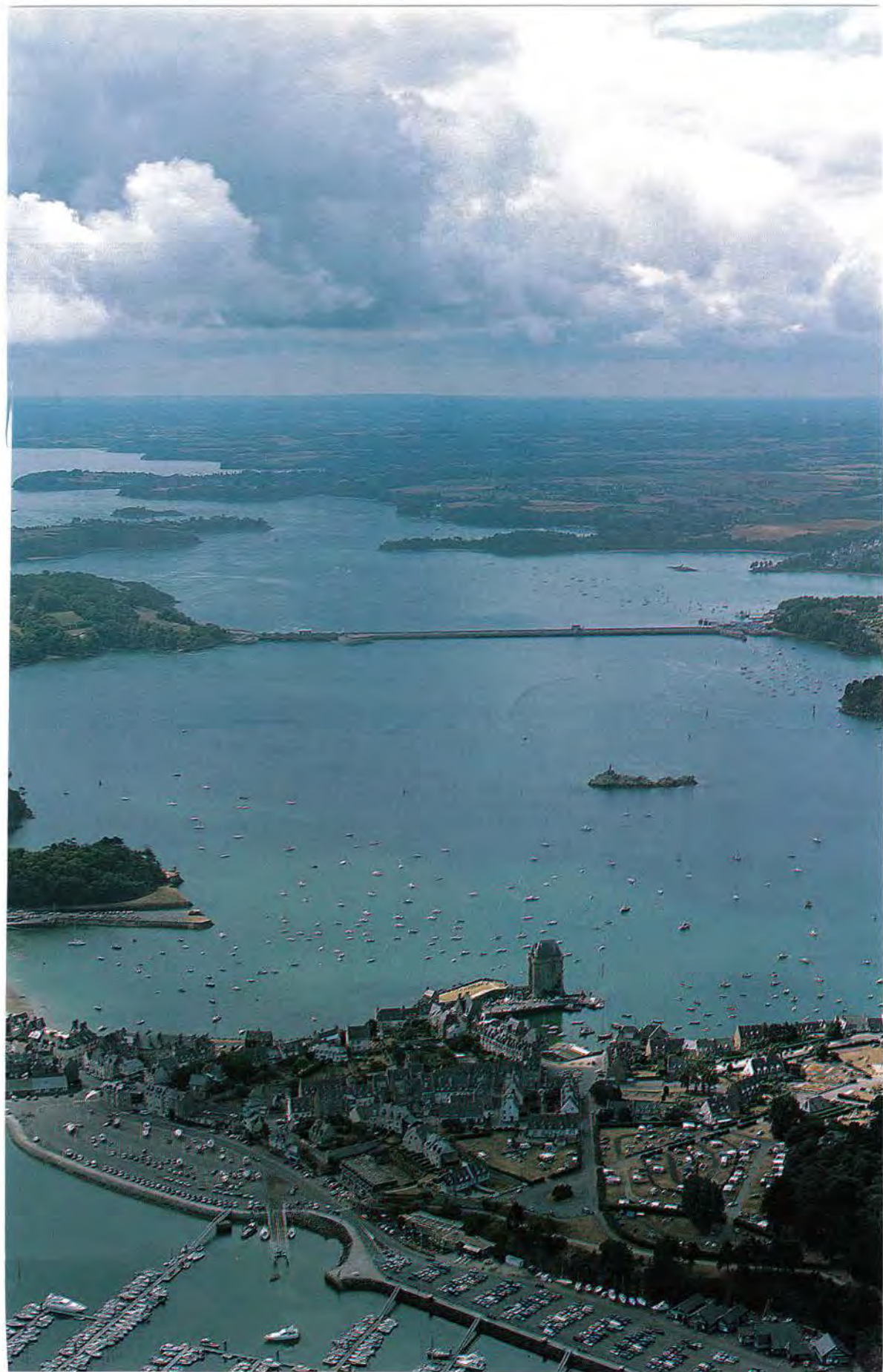
rive droite et s'appuient, entre la digue morte et le barrage mobile, sur l'îlot de Chalibert.

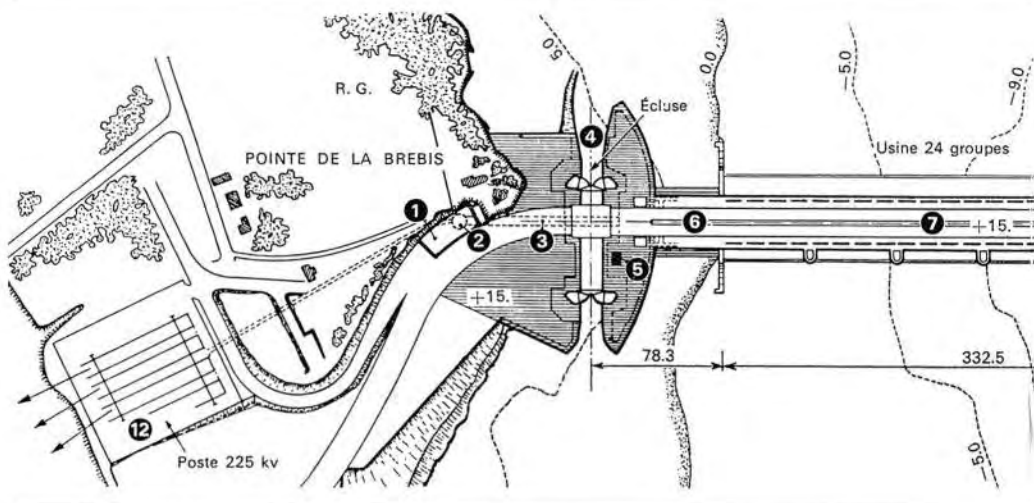
Ils délimitent ainsi un bassin (estuaire) de 22 km² à la cote + 13,50 m C.M. et un volume utile (entre 0 et 13,50 C.M.) de 184 000 000 m³. Ils comportent, de la rive gauche à la rive droite :

- *l'écluse de largeur 13 m et longueur 65 m.* La route, décidée dans une phase tardive du projet, la franchit par un pont mobile, qui obère une partie de sa longueur. Le radier étant fixé à la cote + 2 m C.M. elle n'est utilisable que pour un niveau de la mer supérieur à + 4,00 C.M., c'est-à-dire en dehors des basses mers de vives eaux.

- *l'usine :* C'est une digue creuse en béton dans laquelle sont installés les 24 groupes bulbes de puissance unitaire 10 MW. De longueur 386 m et de largeur 53 m, les fondations se trouvent environ à la cote - 13,00 m C.M, soit une hauteur totale de l'ordre

Le barrage et l'usine marémotrice de la Rance, au premier plan Dinard.





Plan d'ensemble de l'usine marémotrice de la Rance (d'après document EDF).

1 : Bâtiment d'accès des grosses pièces, sol à la cote +15,00 (C.M.) ; 2 : Puits pour descente des pièces à la cote -7,00, diamètre 12 m ; 3 : Galerie d'accès à -7,00, passant sous l'écluse, longueur 80 m environ ; 4 : Écluse de navigation, sas : 65 x 13 m, radier à +2,00 ; 5 : Bâtiment administratif (accès principal à l'usine et local de l'éclusier) ; 6 : Travées de montage du matériel et ateliers d'entretien ; 7 : 24 travées de groupe, distantes de 13,30 m (chaque travée : 1 groupe de 10 000 kW) ; 8 : Travée de commande ; 9 : Mur d'extrémité de l'usine, constituant le soutènement de la digue morte ; 10 : Digue en enrochements ; 11 : Six pertuis munis de vannes de 15 x 10 m ; 12 : Poste de départ. 3 lignes 225 000 V sur Aube et Paris, Rennes, Landerneau et Brest.

de 26 m. L'énergie produite est évacuée par des câbles à huile jusqu'au poste de départ de 225 kV situé au dessus de la pointe de la Brebis.

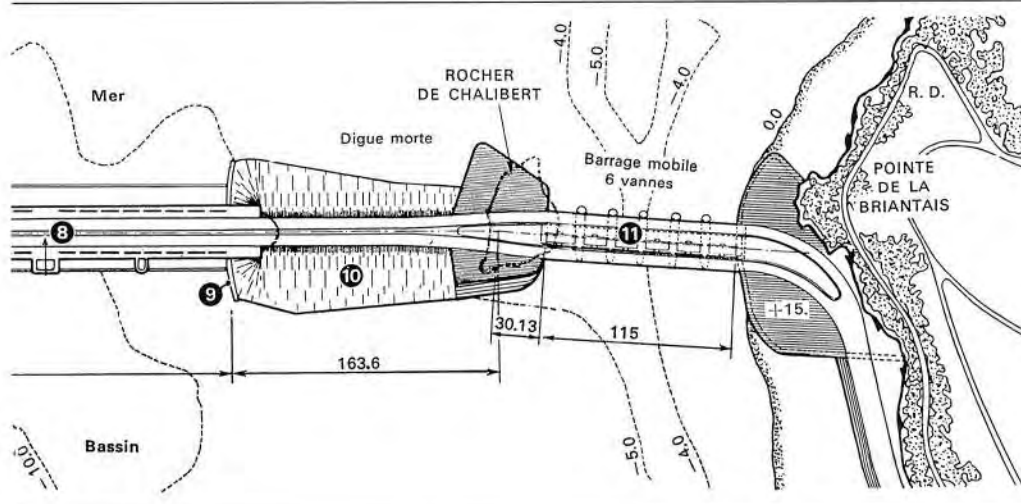
- **la digue morte** : Réalisée en enrochement, elle ferme le barrage usine jusqu'au rocher du Chalibert (îlot rocheux préexistant à l'usine et ayant permis en rive droite un point d'appui

intermédiaire pour l'ouvrage). Un projet à 32 groupes sans digue morte, présentait le même niveau de rentabilité économique. Le choix s'est porté sur le projet à 24 groupes du fait d'un coût d'investissement plus réduit.

- **le barrage mobile** : Situé en rive droite entre le rocher de Chalibert et la pointe de la Briantais, il est composé de 6



Vue aval du barrage marémoteur.



pertuis munis de vannes de 15 x 10 m. Les vannes sont principalement utilisées pour assurer le remplissage de l'estuaire pendant le flux.

Fonctionnement

Les groupes peuvent fonctionner :

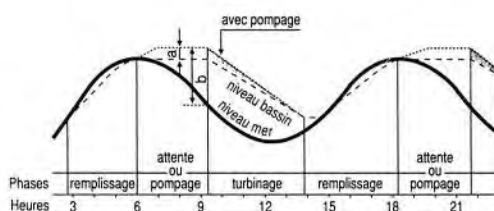
- en turbinage direct de l'estuaire vers la mer,
- en turbinage inverse de la mer vers l'estuaire,
- en pompage direct de la mer vers l'estuaire,
- en pompage inverse de l'estuaire vers la mer.

De plus, ils peuvent aussi être mis en "orifice", ce qui permet à l'eau de s'écouler sans production ou consommation d'énergie.

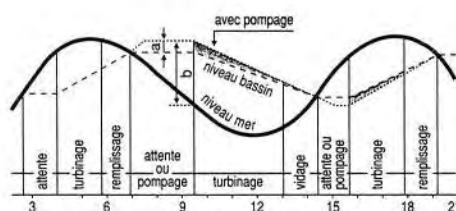
Le pompage permet d'améliorer, voir de surremplir l'estuaire en fin de marée

montante et donc d'accroître la production au cycle de turbinage suivant : l'eau pompée sur une hauteur maximale de 3,5 m est turbinée ensuite avec une chute pouvant atteindre 8,5 m, d'où un intérêt énergétique évident.

L'organisation des conditions de production en utilisant ces différentes possibilités de fonctionnement dépend, d'une part, du cycle des marées, d'autre part, des contraintes du réseau électrique. Ce sont d'abord les conditions de fonctionnement donnant la production maximale pour le cycle de marée qui sont déterminées. Ce programme est ensuite validé ou modifié par le service chargé de l'exploitation du réseau et des prévisions de consommation à Nantes : une heure de turbinage peut être déplacée ou un pompage annulé, quel que soit leur intérêt énergétique, afin d'adapter le cycle aux conditions de consommation régionale.



SIMPLE EFFET AU VIDAGE



DOUBLE EFFET

Description schématique des deux types de cycles utilisés (d'après documents EDF).



P. Le Mao

Barrage marémoteur vu de l'amont, du côté des écluses.

Deux types de cycles sont utilisés : un cycle à simple effet au vidage en tous points comparable à celui des moulins à marées (l'eau est turbinée au moment du reflux uniquement), un cycle à double effet, grâce au "groupe-bulbe" qui permet de turbiner dans les deux sens d'écoulement de l'eau. Celle-ci est turbinée au moment du flux (turbinage inverse) et du reflux (turbinage direct). Le turbinage inverse freine le remplissage de l'estuaire, entraînant une diminution de la production réalisable en turbinage direct du demi-cycle suivant : il n'est énergétiquement intéressant que pour les fortes marées et n'est utilisé qu'en marée de "vives-eaux".

A noter que le rythme des marées conditionne aussi les programmes d'entretien, ceux-ci étant réalisés en période de mortes-eaux, les 24 groupes étant surabondants pour la production réalisable à ces moments.

Bilan et perspectives

Quel avenir pour la Rance et l'énergie marémotrice ?

Les moulins à marée, limités en taille, n'ont pas pu résister au gain de productivité qu'apporteraient les effets

d'échelle des moyens de production concurrents (machine à vapeur).

Dans cette course à la productivité la réalisation de la Rance correspondait à une lucarne étroite dans laquelle la taille de l'aménagement liée au site et aux technologies disponibles pouvait avantageusement être comparée à celle des autres modes de production. La perspective de réaliser ultérieurement un aménagement plus important (Chausey) n'était pas non plus absente de la décision. L'évolution des conditions économiques (augmentation du taux d'actualisation) a enlevé tout intérêt à ces projets en regard des autres modes de production, de durée d'exploitation beaucoup plus courte mais nécessitant des investissements moins lourds. Même s'il est très peu probable que cette tendance s'infléchisse dans un avenir proche, si cette éventualité se produisait l'expérience acquise à la Rance serait précieuse pour une réalisation plus importante.

En attendant l'usine marémotrice de la Rance inaugurée en 1966 reste un outil industriel performant et moderne. Les technologies mises en place pour répondre aux contraintes de la présence d'un milieu fortement corrosif et des conditions d'exploitation extrêmes restent des technologies de pointe.

Sa production moyenne annuelle est de 600 millions de kWh, soit l'équivalent de la consommation d'une ville comme Rennes. Cette énergie est fournie à un prix compétitif par rapport aux autres moyens de production (0,20 F/kWh contre 0,30 F pour le prix de revient moyen à EDF en 1993) et cet état ne peut que s'améliorer puisque pour plus de la moitié ce coût est dû aux charges d'amortissement qui ne peuvent que décroître.

Quant aux impacts sur le milieu naturel ils sont traités dans d'autres articles. Ce qu'on peut simplement en dire ici, sans vouloir les minimiser, c'est qu'ils sont mesurables et qu'ils ne présentent pas de caractère d'irréversibilité. L'usine de la Rance fait incontestablement partie des "énergies renouvelables". ■

Documents consultés

GIBRAT R. 1958 - L'énergie des marées. Bulletin de la société française des électriciens - 7^{ème} série - T 3 n°29, p 283-332.

CONGRES DE LA HOUILLE BLANCHE 1925 - Rapport sur la Houille Bleue.

REVUE GÉNÉRALE D'ÉLECTRICITÉ 1918 - T IV n°18 à 26 ; 1923 - T XI I n°12

ANNALES DES PONTS ET CHAUSSÉES 1931 - novembre/décembre, n°30.

LA HOUILLE BLANCHE (revue internationale de l'eau, revue de société hydrotechnique de France) 1973 - n°2-3 ; 1976 - n°2 ; 1984 - n°8.

Bernard GUILLEMOT est ingénieur hydraulicien à EDF.



P. Le Mao

Le barrage marémoteur, trait d'union routier entre Dinard et Saint-Malo.

Les moulins à marée de Rance : Un patrimoine industriel en danger.

Dans la ria de la Rance débouchent de nombreuses petites anses perpendiculaires, étroites (50 à 200 m) et allongées (200 m à 2 km), drainées par un cours d'eau : simple filet (la Couaille) ou véritable rivière (rivière de Coetquen). En marchant de l'amont vers l'aval, on rencontre un schorre coupé de chenaux, puis une digue qui barre la vallée. Accoté à cette digue se dresse un moulin à marée (ou ce qui en reste...). Nous avons recensé pas moins de 13 édifices certains et quelques deux sites de moulins disparus en Rance Maritime.

Ces ancêtres de l'usine marémotrice, oubliés ou restaurés en vulgaires bâtiments utilitaires, ont créé des milieux que la nature a recolonisés : des hectares de schorre, des éboulis de pierres sèches ou colmatées à la chaux, des cailloutis... On y trouve une végétation adaptée souvent fort intéressante.

Les bords de Rance sont classés ainsi que ces édifices (moulins, chaussées, annexes). Mais on constate une lente dégradation, parfois irréversible comme à la Herviais / le Minihic-sur-Rance, ou leur destruction précipitée comme à Fosse-Mort / le Minihic-sur-Rance (qui a été abattu en 1984). Certains survivent comme le Quinard, dont un contrefort se

disloque face aux vagues, mais d'autres sont abandonnés, comme la Tourniole, depuis bientôt un siècle.

Certaines digues seront restaurées dans le cadre du contrat de baie de la Rance. Mais qu'en sera-t-il de ces moulins qui sont des propriétés privées et que les propriétaires délaissent ? La réhabilitation, en l'état ou avec respect, de ce qui reste des moulins à marée de Rance est à considérer par les personnes concernées comme une urgence, ainsi que leur promotion touristique. Il faut préserver ces témoins de l'ethnologie industrielle et les mettre en valeur par des circuits de visite fléchés, l'édition de guides appropriés, et la mise en place de panneaux explicatifs.

Plus spécialement, les moulins du Beauchet et du Quinard, qui ne sont ni en ruine ni détournés de leur utilisation originelle, sont à mettre en valeur. Les ruines de la Tourniole, de Fosse-Mort et de la Herviais devraient être consolidées et conservées en l'état. Le site du Prat a été racheté fin 1994 par la commune de la Vicomté-sur-Rance et une rénovation des bâtiments est envisagée. C'est un exemple à suivre !

Annie Blanquaert.



Le moulin à marée du Quinard.