

# L'énergie des marées <sup>(1)</sup>

par

R. GIBRAT (2)

---

## AVANT-PROPOS

1737. Le traité d'architecture hydraulique de Bélidor traite des moulins à marée de Dunkerque et cherche à en assurer la continuité du fonctionnement.

1952. Le Président de la République, lors de l'inauguration de l'usine de Donzère-Mondragon, le 25 octobre, annonce l'aménagement prochain de l'estuaire de la Rance, apportant ainsi la consécration suprême à tous ceux qui ont cru à l'utilisation industrielle de l'énergie des marées.

La route des études ainsi ouverte par Bélidor fut jalonnée par les plus grands noms. Nous n'en citerons qu'un : celui de M. Caquot, donnant son nom à un cycle très ingénieux à plusieurs bassins. Mais les réalisations, mêmes petites, ne purent voir le jour. Bien qu'une loi dès 1925 apportât l'appui financier de l'Etat au projet d'installation d'une usine marémotrice dans l'estuaire de l'Aber Wrac'h, les moulins à marée restèrent seuls témoins de l'effort humain dans ce domaine. Le problème était alors loin de sa maturité.

En 1943, un groupe d'industriels français reprenait le problème et créait la « Société d'Etudes pour l'Utilisation des Marées »

---

(1) Communication présentée à la 44<sup>ème</sup> séance d'études du C.E.R.E.S., le 25 avril 1955.

(2) Professeur d'Electricité Industrielle à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Ingénieur-Conseil.

(S. E. U. M.). Cette Société reprise par l'Electricité de France, lors de la nationalisation, fut reconstituée sous les mêmes initiales en service d'études à l'intérieur de sa Direction des Etudes et Recherches.

Un très important travail a ainsi peu à peu dégagé les lignes principales des problèmes de toutes sortes posés par la réalisation industrielle d'une usine marémotrice et il apparut vers mai 1954 à l'Electricité de France que les résultats obtenus justifiaient l'étude de détail des problèmes de génie civil et de machines en vue de la réalisation de l'usine de la Rance. Toutes les questions d'études ou de réalisations des usines marémotrices passèrent alors, toujours à l'intérieur d'Electricité de France, sous l'autorité conjointe du Directeur des Etudes et Recherches et du Directeur de l'Equipement, et une Région d'Equipement Hydraulique (Région N° 8) fut désignée pour la réalisation des travaux.

Les résultats des études de détail furent tels que la Commission Interministérielle des Investissements donna fin juin 1955 un avis de principe favorable à la mise en route des travaux de la Rance, et l'appel d'offres aux entreprises pour la remise des propositions d'exécution des travaux définitifs (génie civil) fut envoyé le 29 juillet 1955.

Chargé actuellement d'animer et de coordonner au nom des deux Directeurs toutes études et tous travaux relatifs aux marémotrices, on nous permettra d'insister sur le fait que tout ceci fut l'œuvre d'une équipe. Il nous est impossible de citer tous ceux dont l'activité, l'intelligence et le dévouement ont permis de construire, en partant entièrement de zéro, d'abord un corps de doctrine, ensuite un projet bien défini, et ont ainsi créé une nouvelle technique entièrement française. On nous permettra ici de les remercier collectivement.

## 1. — THEORIE DES MAREES

En apparence une des plus puissantes manifestations de la nature, la marée est produite par des forces infimes. Déroutant phénomène, car si sur nos côtes (fig. 1) une double pulsation chaque jour amène et remmène le flot, la renverse simultanée du courant et de la montée des eaux a lieu dans l'Atlantique mais n'est pas observée dans la Manche.

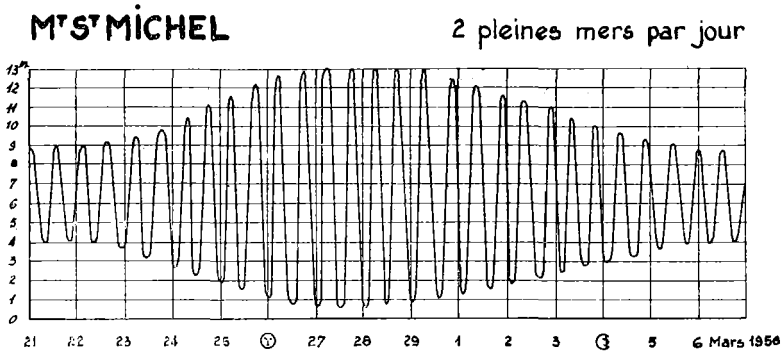


FIG. 1

Déroutant encore, car si à Do-Son, au Tonkin (fig. 2) il y a une seule pleine mer toutes les 24 heures, par ailleurs à Tahiti les pleines et basses mers ont lieu chaque jour aux mêmes heures, dédaigneuses des ordres de la lune ; déroutant enfin, car au Mont-Saint-Michel l'amplitude dépasse treize mètres et en Méditerranée elle n'atteint normalement que quelques décimètres.

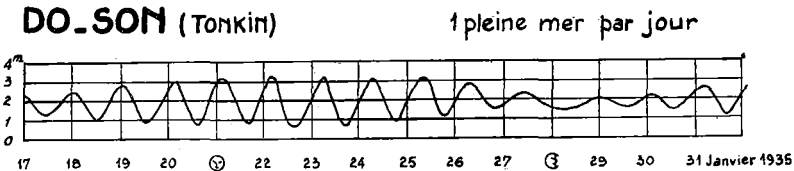


FIG. 2

On comprend que la légende attribue le suicide d'Aristote noyé dans l'Europe à son désespoir de n'avoir pu en expliquer

les quatorze renverses de courant par jour et qu'Apollinaire dans un vers découragé de son poème « Alcools » ait conclu :

« La vie est variable aussi bien que l'Europe ».

La vérité n'est apparue que très lentement, car notre civilisation est née et a grandi dans la Méditerranée aux marées inexistantes, aussi l'Antiquité et la Renaissance ne produisirent que des enfantillages à propos des marées. Les contemporains de Platon avaient par l'observation des amplitudes et des heures, une certaine intuition portant sur des combinaisons plus ou moins complexes des périodicités et pressentaient que courants et hauteur d'eau étaient deux aspects différents d'un même phénomène. Mais ils assimilaient la Terre à un véritable être humain et les marées en étaient la respiration. Platon lui-même pense à des oscillations dans des cavernes souterraines, hypothèse que, ô horreur, reprendra beaucoup plus tard Kepler.

Avec les voyages au-delà de Gibraltar vers Thulé au IV<sup>me</sup> siècle avant J.-C., Pythéas, puis au I<sup>er</sup> siècle Posidonius, le professeur de Cicéron, l'influence de la lune sera suspectée, puis bientôt entièrement oubliée. Seul, au Moyen-Age, un curieux passage de Dante dans « Le Paradis » pourra être interprété comme une survivance. Même Galilée, le créateur de la Mécanique moderne, refuse de donner à la lune un rôle dans la production des marées et accumule les fautes de raisonnement sur l'effet sur les molécules d'eau de la rotation de la Terre et de son mouvement de translation.

Nous voici en 1657, Pascal commence à écrire les Pensées et celle n° 319 (Pléïade) qui commence par cette banalité « L'éloquence continue ennueie » finit par cette phrase « La nature agit par progrès, itus et redivus. Elle passe et revient, puis va plus loin, puis deux fois moins, puis plus que jamais, etc... Le flux de la mer se fait ainsi, le soleil semble marcher ainsi... » et un dessin suit, le seul croyons-nous dans les Pensées. Pas la moindre trace d'une explication même sommaire.

Après Newton, trente années après Pascal, tout un pan d'ignorance s'écroule et la lumière devient si vive qu'on a un sursaut

d'indignation devant le jugement méprisant de Poincaré : « la marée de Newton, marée du baccalauréat ! »

Dans la théorie de Newton, la cause est dans la variation le long des heures et des jours de l'attraction exercée par la Lune et le Soleil sur les molécules des océans, on explique immédiatement le décalage des heures de pleine mer suivant la Lune, les modifications d'amplitude le long d'une demi-lunaison, les marées de vives eaux lors des conjonctions heureuses de la Lune et du Soleil. Tout devient si clair que cela suffit pour prédire les marées en un point, de nombreuses années d'avance, d'après les observations du passé au même point avec toute la précision nécessaire pour les besoins de la navigation et des travaux publics.

Mais Newton ainsi n'explique pas les variations d'un point à l'autre. Or quand on évalue les forces en jeu, on est confondu de leur petitesse. La variation la plus grande apportée par la Lune à l'attraction terrestre sur une molécule d'eau est six millions de fois plus petite que l'intensité de la pesanteur, elle est égale à celle que nous provoquons nous-mêmes sur le poids de notre montre-bracelet quand nous élevons notre poignet de 55 centimètres. Le soleil, parent pauvre, est sept fois moins agissant que la lune. La surface libre des mers, *si elle restait en équilibre* et c'est là l'hypothèse essentielle de Newton, aurait ainsi sous l'effet de la variation de la composante horizontale de la pesanteur une marée de 55 centimètres, et sous celui de la variation de la composante verticale une marée de  $9/10^{\text{me}}$  de millimètre. Il resterait ainsi au Mont-Saint-Michel plus de treize mètres de marée sans explication. Newton ne suffit donc pas pour comprendre. Aucune théorie comme la sienne n'a donné plus aisément l'illusion de pénétrer la nature profonde d'un phénomène et ainsi contribué à répandre plus d'idées fausses.

Car la surface des mers ne peut rester en équilibre, les eaux jouent à se poursuivre et ne trouvent jamais leur repos. Laplace le premier, en 1774, introduit l'Hydrodynamique dans la théorie des marées, met l'accent sur la résonance entre les périodes

célestes et celles d'oscillation des divers bassins comme la Manche, donne les équations exactes des marées, trouve les premiers théorèmes. Mais l'intégration des équations n'est apparue possible tout au long du XIX<sup>me</sup> siècle que dans quelques cas très particuliers et la grande contribution de Henri Poincaré en 1909 a précisément été de montrer comment le problème pouvait être complètement résolu dans tous les cas, même les plus généraux. Il a utilisé les théories de Fredholm sur les équations intégrales et au moyen de calculs bien définis, quoique encore très longs, montré qu'il est possible de traiter numériquement le problème des marées. Poincaré nous a ainsi permis d'entrevoir le moment où on pourra calculer une marée en un point sans utiliser l'observation préalable.

Mais en 1909 l'extraordinaire effort que représente cet apport de Poincaré relève du divertissement pascalien, au sens de la pensée 205 (Pléïade) :

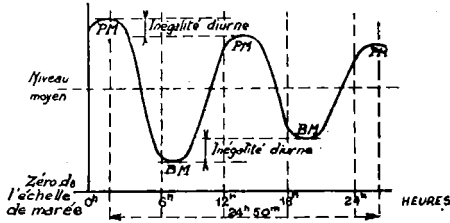
« Et un autre suera dans son cabinet pour montrer aux  
» savants une question de chiffres, impénétrable à tout  
» autre, qu'il aura résolue ».

Personne n'a encore eu l'audace de vouloir par l'œuvre de l'homme modifier le régime des marées, tous les problèmes peuvent se résoudre par l'observation et Newton suffit. Mais aujourd'hui, l'ingénieur veut exploiter cet extraordinaire gisement d'énergie qu'est la Manche, et particulièrement la baie du Mont-Saint-Michel avec ses dix millions de kW reste un espoir dans l'incertitude atomique. Le rapport des énergies à prendre et des énergies actuellement mises en jeu par la mer n'est plus négligeable : la marée sera sûrement modifiée ; il nous faut savoir de combien et comment. Poincaré retrouve ainsi en 1955 toute son importance et c'est seulement à travers lui que les calculs pourront être menés à leur terme.

Dans l'histoire de la théorie des marées, Newton nous aura donné la joie de connaître, Laplace celle de comprendre, Poincaré nous donnera celle d'agir.

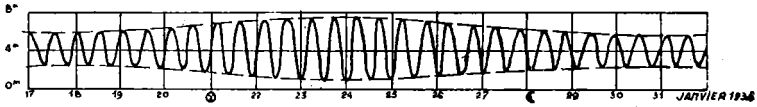
## MARÉES SEMI-DIURNES

( Douze heures environ )



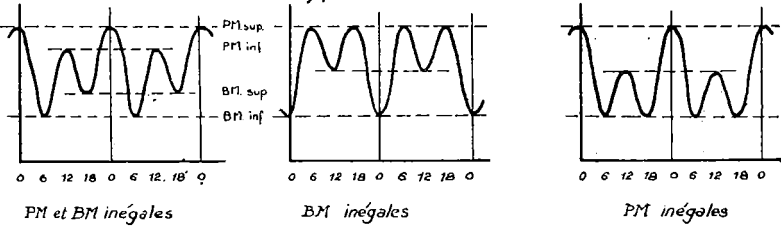
semi-diurne à inégalité diurne faible

— BREST —



semi-diurne à inégalité diurne importante

3 types différents



— CAP S<sup>t</sup> JACQUES (Cochinchine) —

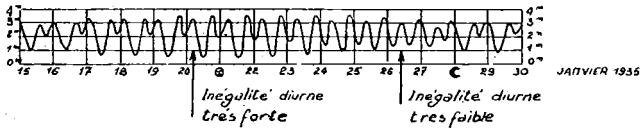
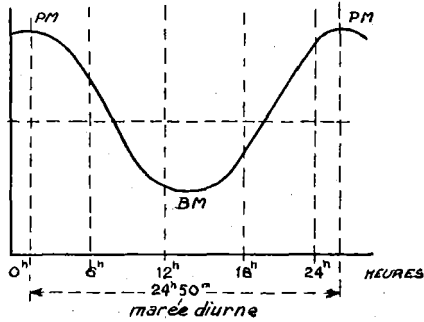


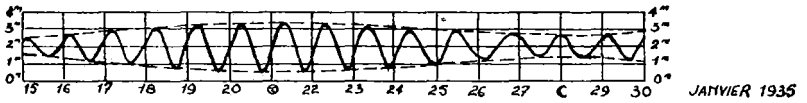
FIG. 3

## MAREE DIURNE

(Vingt quatre heures environ)



### DO-SON (Tonkin) Port à marées diurnes



## MAREE MIXTE

### QUINHONE (Annam) Port à marées mixtes

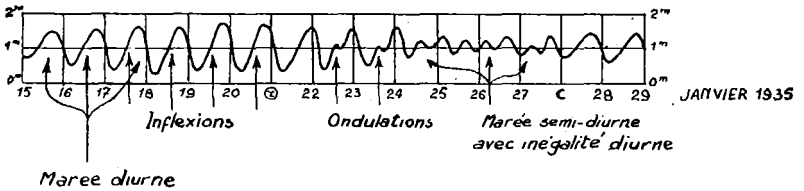


FIG. 4

## 2. — CARACTERISTIQUES DES MAREES

Il convient d'évoquer l'extrême diversité des marées aux divers points du monde. Les diverses planches des figures 3 et 4 montrent que le type habituel sur les côtes de France (deux marées par jour, d'amplitudes presque égales) n'est pas général et que

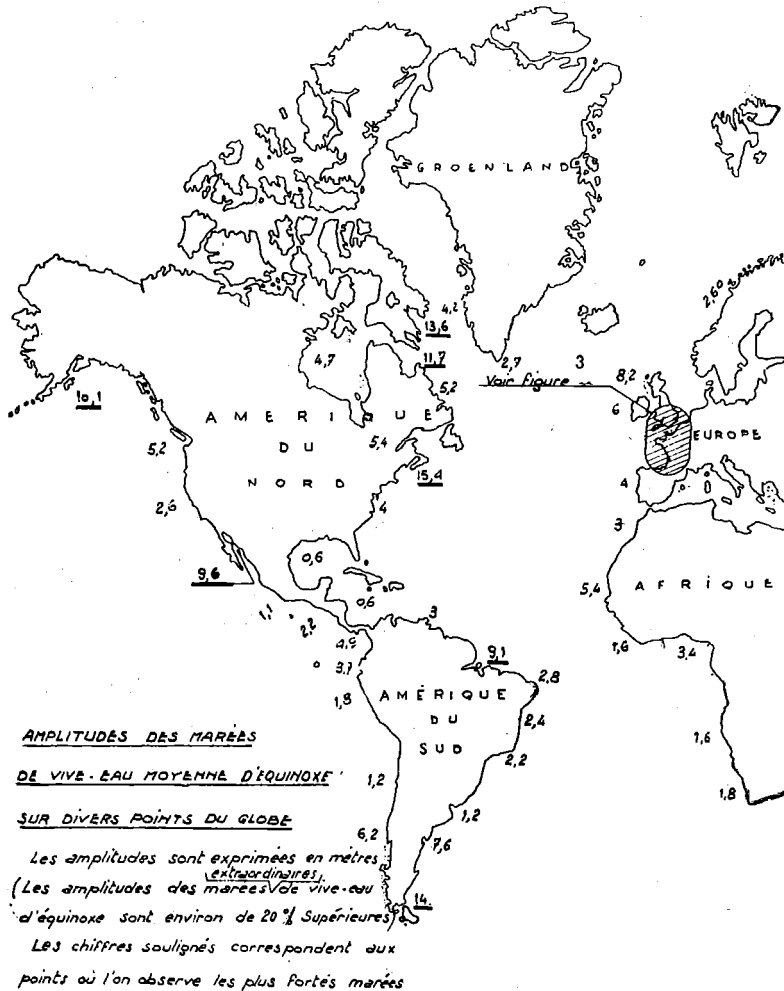


FIG. 5

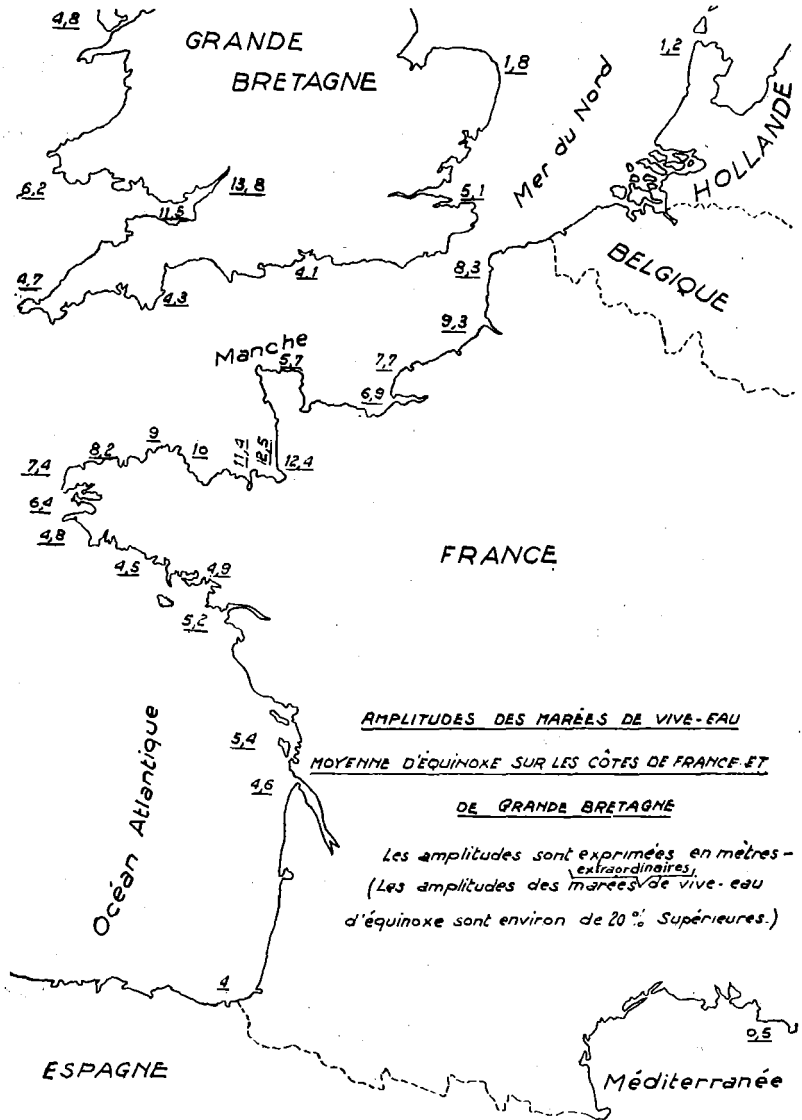


FIG. 6

l'Indochine, par exemple, connaît des marées de tous les autres types et en particulier des marées d'une période voisine de 24 heures. Ce point est souvent oublié dans les études d'énergie marémotrice, sans doute parce que les projets étudiés jusqu'ici (Angleterre, Etats-Unis, France) se trouvent sur les côtes de l'Atlantique où prédomine le type à deux marées par jour.

Si nous nous bornons maintenant à l'examen des marées du monde civilisé (fig. 5 et 6), nous en retiendrons pour l'Europe d'abord que la marée est négligeable en Méditerranée (quelques décimètres d'amplitude), importante sur l'Atlantique ou les côtes anglaises de la Manche, maximum sur les côtes françaises de la Manche. Très rares sont les points du monde civilisé où l'amplitude dépasse huit ou dix mètres : on peut citer, en Angleterre, l'estuaire de la Severn et au Canada le bassin des Mines dans le fond de la baie de Fundy où les amplitudes sont un peu supérieures à celles des marées de la baie du Mont-Saint-Michel. La France est certainement le pays le plus favorisé du monde en énergie des marées et elle peut légitimement espérer tirer des marées une énergie annuelle de l'ordre de celle que fournit sous forme de charbon le bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais, soit plusieurs dizaines de milliards de kWh. Car les côtes très découpées de la Bretagne présentent de nombreux estuaires favorables à la constitution de bassins et le fond peu profond de la Manche au voisinage des côtes permet la construction économique de digues.

Un exemple nous paraît utile à citer : le cycle le plus simple (simple effet au vidage) permet de produire au voisinage de Saint-Malo sur les côtes françaises de la Manche une énergie utilisable de 35 millions de kWh par km<sup>2</sup> de bassin. Or le projet en cours d'étude de Chausey dans la baie du Mont-Saint-Michel prévoit à lui seul plus de 600 kilomètres carrés de bassin, d'où une production d'une vingtaine de milliards de kWh, soit vingt fois environ celle de la plus grande usine fluviale française actuelle, et tout fait penser que les grandes difficultés de ce projet grandiose pourront un jour, être surmontées.

CYCLE à SIMPLE EFFET à la VIDANGE

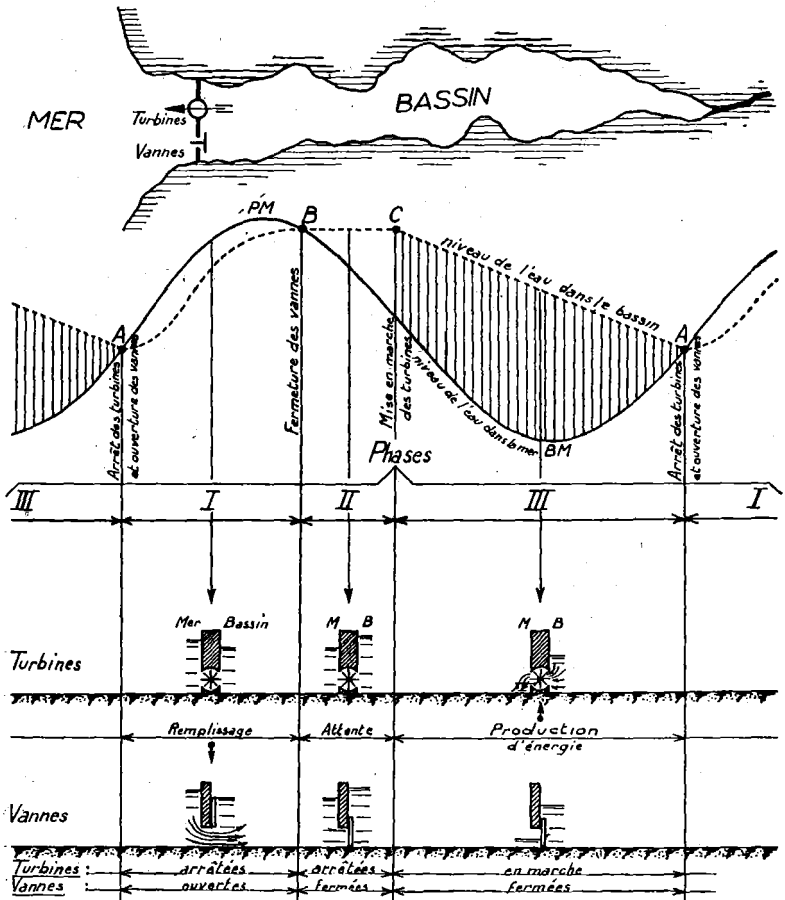


FIG. 7

### 3. — CYLES D'UTILISATION

#### *Historique*

Les régimes de remplissage et de vidage des bassins au travers des turbines ont fait l'objet de très nombreuses recherches et propositions avant les études actuelles faites sous l'égide d'Electricité de France. Beaucoup d'entre elles sont sans intérêt et nous allons nous borner à examiner les cycles les plus intéressants, reportant à plus loin l'exposition de nos idées actuelles.

*Simple effet.* — Le plus simple utilise un seul bassin créé par un barrage fermant l'estuaire ou la baie. L'énergie potentielle de l'eau est utilisée lorsque le bassin se vide, c'est le cycle à *simple effet au vidage* (fig. 7).

Trois phases dans le fonctionnement :

- a) une phase de *remplissage*, turbines arrêtées et vannes ouvertes : à marée montante l'eau s'introduit dans le bassin à travers les vannes ;
- b) une phase *d'attente*, turbines arrêtées et vannes fermées, la mer baisse, le niveau du bassin ne bouge pas, on attend le moment le plus favorable pour commencer à produire l'énergie, ce sera par exemple celui qui donne la production maximum si tous les kWh ont la même valeur ;
- c) une phase de *production*, turbines en marche et vannes fermées : les turbines produisent de l'énergie sous la hauteur de chute créée par la différence de niveau entre le bassin et la mer.

Au moment du fonctionnement des turbines, la chute est toujours de même sens, du bassin vers la mer, et, pour un équipement normal, les mouvements d'eau ne sont jamais plus rapides qu'avant la construction de l'usine à peu près de même vitesse à la montée, plus lents à la descente.

Nous trouvons un fonctionnement analogue si les turbines marchent lorsque le bassin se remplit, (cycle à *simple effet au remplissage*). Mais les rives des estuaires ne sont ni surplom-bantes, ni verticales ; les volumes d'eau pour une même diffé-

CYCLE à DOUBLE EFFET

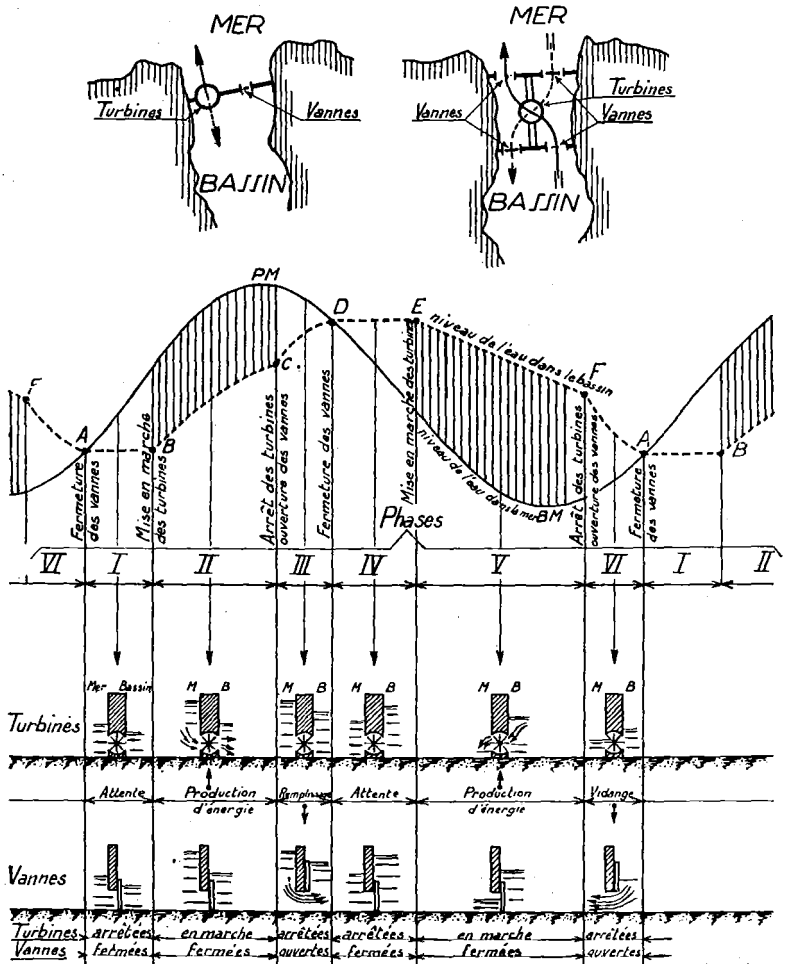


FIG. 8

rence de niveaux, sont plus importants pour la tranche supérieure de la retenue que pour la tranche inférieure, le cycle au remplissage donnera donc moins d'énergie que le cycle au vidage. Par exemple pour la Rance, le rapport est d'environ deux tiers.

*Double effet.* — On a naturellement songé à combiner les deux effets dans un cycle à *double effet* (fig. 8). La production d'énergie a lieu pendant le remplissage et pendant le vidage. Avec un seul barrage (dessin de gauche de la figure 8) la chute pendant la phase de production d'énergie est tantôt de la mer vers le bassin et tantôt du bassin vers la mer. Il pourrait donc paraître nécessaire dans ce cas d'étudier une distribution spéciale des canaux d'amenée et d'évacuation d'eau à l'intérieur du barrage de façon à conserver le même sens d'écoulement de l'eau à travers la turbine.

Une autre disposition en double effet aurait pu consister dans un dessin d'usine dite « en H » (dessin de droite de la figure 8). Le bassin est barré par deux lignes de vannes entre lesquelles, parallèlement aux rives, est construite l'usine. Des manœuvres convenables de vannes permettent comme on s'en rend aisément compte, de faire passer l'eau dans la turbine toujours dans le même sens.

Naturellement l'une et l'autre solutions entraîneraient des dépenses supplémentaires très importantes par rapport au simple effet, et il est heureux que les turbines modernes permettent d'éviter toutes ces complications et d'adopter des schémas très simples. Nous y reviendrons et nous verrons qu'il n'y a pas, comme l'avaient cru nos devanciers, à faire à priori un choix entre ces deux cycles et les innombrables nouveaux cycles que nous avons mis en évidence, et que chacun, au long de l'année, convient à son tour.

*Bassins associés.* — On associe deux bassins A et B à simple effet du type précédent. L'un, dit bassin inférieur A fonctionne au remplissage, l'autre, dit bassin supérieur B, au vidage. Cha-

BASSINS ASSOCIÉS

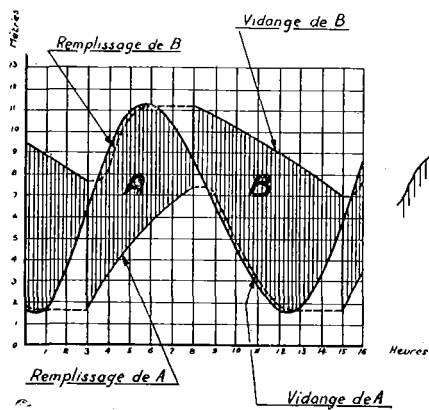


FIG. 9

BASSINS CONJUGUÉS

AVEC POMPAGE

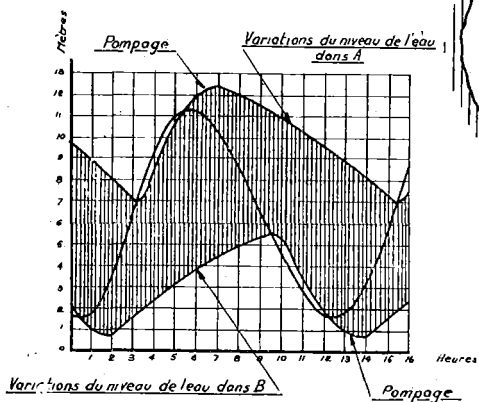


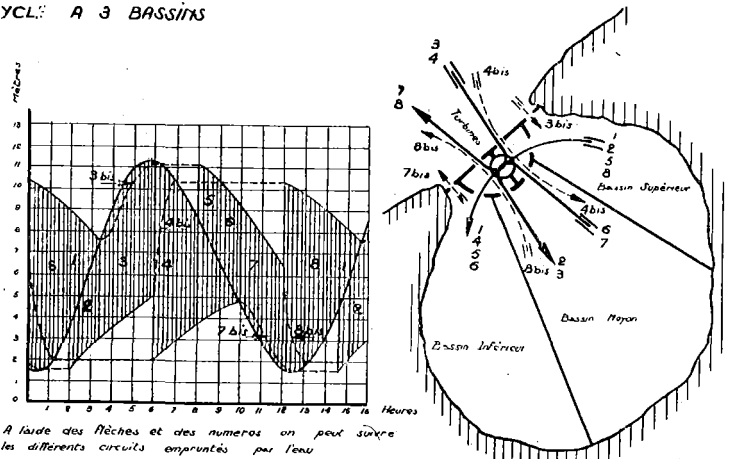
FIG. 10

cun comporte une usine, les deux pouvant être reliées électriquement, en sorte que la production peut être continue (fig. 9).

*Bassins conjugués.* — Ce dispositif peut être considéré comme une solution particulière du cycle précédent (fig. 10). Il permet de ne construire qu'une seule usine, de fonctionner en régime continu sans arrêts, mais n'est applicable que lorsque les dispositions locales s'y prêtent, dans une baie ou un golfe par exemple, rarement dans un estuaire.

### BASSINS MULTIPLES

CYCLE A 3 BASSINS



A l'aide des flèches et des numeros on peut suivre les différents circuits empruntés par l'eau

FIG. 11

Ce cycle imaginé par Bélidor en 1737 a été proposé à diverses reprises pour l'équipement de certaines baies (notamment par MM. DECOEUR, MAIRE, DEFOUR, CAQUOT).

*Autres cycles.* — Beaucoup d'autres cycles ont été imaginés à deux, trois (fig. 11) et plusieurs bassins ingénieusement disposés, le plus souvent en vue d'assurer avec autant de souplesse que possible, la continuité de la production, condition à laquelle on attachait autrefois un très grand intérêt en l'absence d'interconnexion.

# CYCLE à 3 Bassins

(CHEVREL 1941)

Les hachures montrent la  
constance de la chute

La figure représente le fonctionnement des  
bassins pendant une semaine environ (12 Marées)

A l'aide des flèches et des  
numéros on peut suivre  
les différents circuits  
empruntés par l'eau

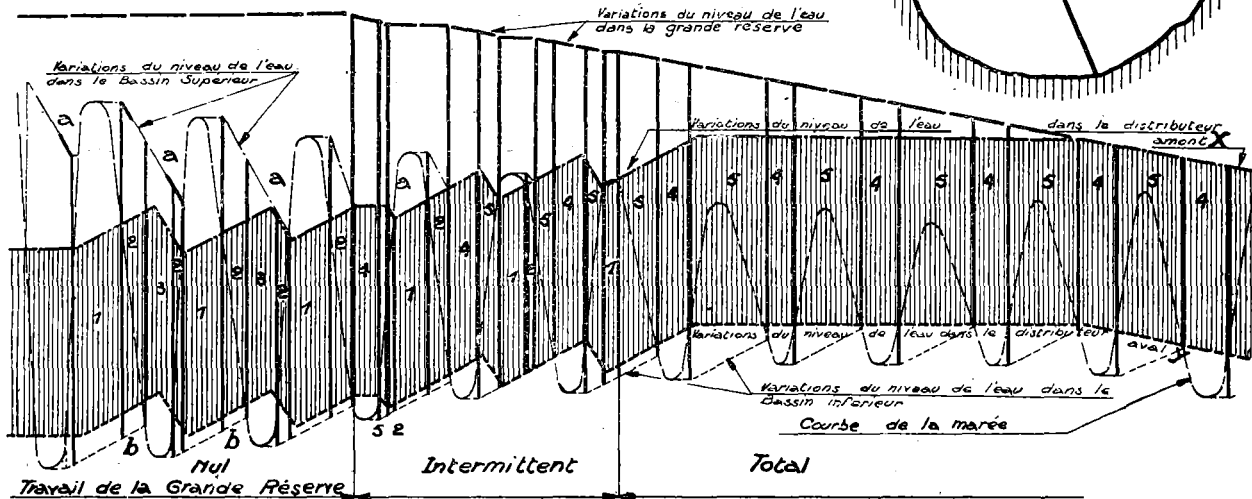
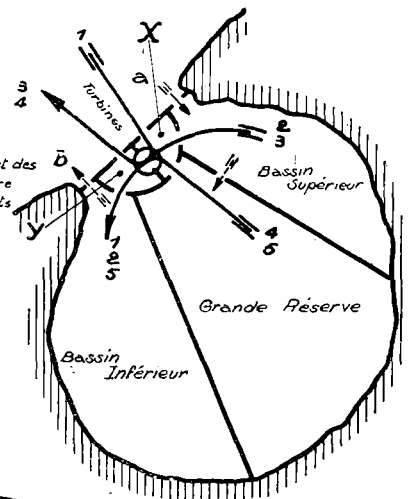


FIG. 12

Le procédé Chevrel-Laboureur à trois bassins, bassin d'amont, grande réserve, bassin d'évacuation, et deux distributeurs amont et aval (X et Y) proposé par les auteurs pour l'aménagement de la baie du Croisic, permet d'obtenir une chute constante entre X et Y pendant toute la durée de la lunaison et réglable à volonté par le choix judicieux des combinaisons possibles entre la mer et les différents bassins ; l'un d'eux, de très grande capacité, dit de grande réserve, se remplit deux fois par lunaison au moment des plus fortes marées et supplée pendant les périodes de morte eau aux insuffisances du bassin d'amont (fig. 12).

Malheureusement, tous ces cycles conduisent à des dispositifs très compliqués et onéreux en raison principalement des travaux de génie civil ou de l'importance des vannes et sont, en fait, inutiles en raison de l'interconnexion pratiquement parfaite des divers réseaux électriques français.

*Pompage.* — Un procédé intéressant d'amélioration du rendement de ces cycles consiste à faire fonctionner les turbines en pompe au moment des étales supérieures et inférieures. Le volume d'eau utilisable est ainsi augmenté, de même que la chute. Le gain net, défalcation faite des kWh consommés par le pompage, est très appréciable.

#### 4. — AVANT-PROJETS D'USINES MAREMOTRICES

*(Historique)*

Les différentes propositions et études faites sont très nombreuses (fig. 13) mais la plupart des projets datent des années 1919 à 1923. Rares sont en effet les projets récents en dehors de ceux étudiés par E.D.F. dont nous traiterons plus loin.

Voici ceux dont le principe avait paru digne d'être retenu dans un premier examen fait par la Société d'Etudes des Usines Marémotrices (S.E.U.M.) en 1944 :

baie d'Arcachon,  
baie de la Rochelle,

embouchure de la Loire,  
baie du Croisic,

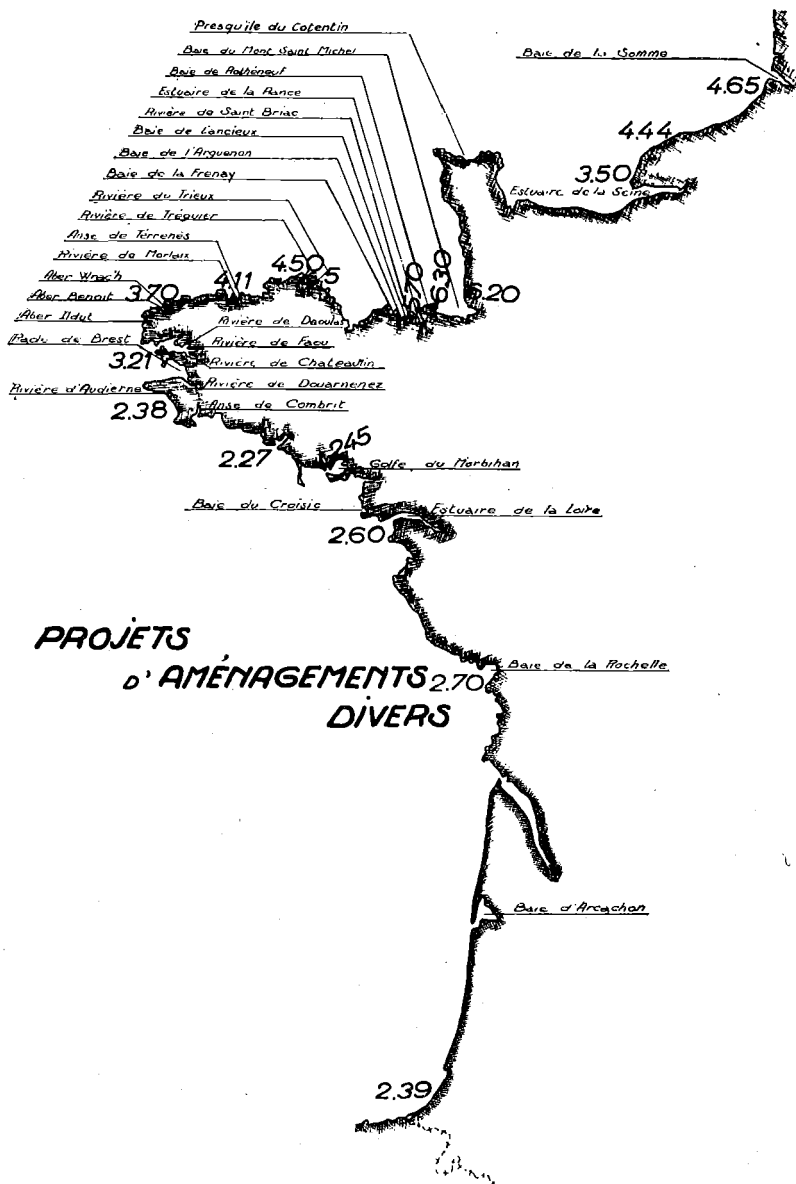


FIG. 13

golfe du Morbihan,  
Aber Ildut,  
Aber Benoît,  
Aber Wrac'h,  
estuaires de Morlaix,  
anse de Terrenès,  
anse de Tréguier,

anse du Trieux,  
baie de la Frenaye,  
baie de Saint-Briac,  
baie de Lancieux,  
baie de l'Arguenon,  
havre de Rothéneuf.

*Estuaire de la Rance.* — En raison de la grande étendue de son bassin et de l'importance de son marnage, la Rance a toujours paru particulièrement favorable à l'installation d'une usine marémotrice.

De très nombreuses études ont été faites à son sujet depuis cinquante ans, par divers auteurs, dont les plus connues sont celles de M. MEYNARD (1) et de M. BOISNIER, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées en 1921. Diverses demandes de concession ont été déposées.

D'importants dossiers ont été présentés au Ministère par MM. PARISOT et de TREGOMAIN ; les derniers datant de 1932 furent déposés par la Société Marémotrice de la Rance (SOMARA), pour l'aménagement de l'estuaire complet à réaliser en plusieurs étapes.

Enfin, en 1942, apparaît un projet nouveau barrant la Rance à Port Saint-Jean. Tous ces projets ont été abandonnés en faveur de celui adopté par E.D.F., sur lequel nous reviendrons.

*Baie du Mont-Saint-Michel.* — En raison du marnage très élevé atteint dans cette baie, de la constitution relativement favorable des fonds sur une grande étendue, de nombreuses propositions ont été faites. Les plus nettes furent celles du baron CORIOLIS, il y a plus d'un siècle, et de M. MAIRE en 1921 ; dans cette dernière, la baie était barrée par une digue entre la pointe du Grouin près de Cancale et Granville ; la production annuelle était estimée à 12 milliards et demi de kWh,

---

(1) Revue Générale de l'Electricité - Décembre 1918.

le cycle utilisé était le cycle Béliador. Le projet a été repris en 1942 par « l'Énergie des Marées » avec le concours de M. CAQUOT.

Nous verrons plus loin que les idées actuelles d'E. D. F. sur l'utilisation d'une telle énergie conduisent à un projet tout différent.

Presqu'île du Cotentin,  
embouchure de la Seine,  
embouchure de la Somme.

Divers projets ont enfin fait l'objet d'études plus ou moins récentes à l'étranger. Parmi celles-ci, l'une des premières fut consacrée à la côte de Patagonie (estuaire de Santa Cruz, de Gallegos, de Deseado, baie de San Julian et surtout baie de San José) et donna lieu à un rapport dès 1928. Trois autres projets furent plus poussés, nous nous contenterons de les citer : Severn en Angleterre, Petit Codiac et Memramcock au Canada, Passamaquoddy aux U.S.A. Aucun n'a donné lieu ni à commencement d'exécution, ni même à projet détaillé.

## 5. — CHOIX DES AVANT-PROJETS A RETENIR

L'examen, en 1946, de tous les avant-projets français ou étrangers connus à ce moment par un Comité Technique Interministériel avait conduit ce Comité à écarter tous les projets de petites usines offrant des superficies de l'ordre de 200 hectares et des énergies de 25 à 50 millions de kWh annuels, ces projets n'étant pas rentables et ne pouvant fournir qu'un appoint d'électricité négligeable sur le plan national. Il avait retenu, parmi les projets dont la réalisation lui a paru techniquement possible, deux projets types :

- a) usine de très grande production d'électricité située dans la baie du Mont-Saint-Michel,
- b) usine d'importance moyenne installée dans la Rance.

En principe, un tel choix ne peut être fait de façon définitive qu'après comparaison de projets complets, mais les considérations suivantes, bien que très élémentaires et en théorie très discutables, permettent de comprendre pourquoi les sites de la Rance et du Mont-Saint-Michel sont particulièrement intéressants.

Il semble évident d'abord que, sous réserve d'un débouché bien ouvert sur la mer, les emplacements les plus favorables se trouvent dans les régions où l'amplitude de la marée est la plus forte, c'est-à-dire au voisinage de Saint-Malo. Des études plus détaillées le confirment : en supposant deux bassins identiques, placés à hauteur, l'un de Saint-Malo, l'autre du Morbihan (unités de hauteur respectives : 5,70 et 2,45 m) la dépense pour une même production augmente de 90 % quand on passe du premier au second.

D'autre part, toutes choses étant égales par ailleurs, le prix de revient diminue quand la dimension du bassin grandit, car si la longueur du barrage double, la surface du bassin quadruple et, par suite aussi, l'énergie. Un raisonnement plus complet quoique encore très simpliste montre que, si on pouvait multiplier l'énergie de la Rance par dix en conservant la similitude des dimensions horizontales, le prix de revient du kWh tomberait à 55 % de sa valeur ; si au contraire on divisait cette énergie par 10, le prix de revient du kWh serait multiplié par le coefficient 5,5. Il est donc avantageux, à égalité de forme, que le bassin soit très grand et situé sur une côte à fortes marées.

Il faut maintenant définir l'influence de la forme du bassin. D'une part, l'énergie utilisable dépendra de la façon dont les fonds découvrent plus ou moins à basse mer. D'autre part, le bassin se prêtera plus ou moins bien à l'établissement d'une usine à son embouchure ; un facteur sera particulièrement significatif, à savoir la longueur du barrage qui le constituera.

Pour aller plus loin nous introduirons la notion « d'énergie naturelle annuelle » ou énergie que produiraient en une année des machines de rendement unité fonctionnant en double effet, s'il était possible de concentrer chaque phase de turbinage au

moment de la chute maximum, c'est-à-dire pour chaque marée, de turbiner au vidage vers la mer à son niveau le plus bas, et de turbiner au remplissage à partir de la mer à son niveau le plus haut.

Nous ferons notre comparaison en utilisant cette notion bien que certains emplacements puissent être plus appropriés à certains cycles que d'autres. On peut, si on accepte des écarts de l'ordre de 10 %, utiliser une formule très simple faisant intervenir deux éléments toujours connus pour chaque projet : à savoir la surface  $S$  du bassin pour les plus hautes eaux telle qu'elle est donnée par les cartes marines et l'amplitude  $A$  des marées de coefficient 100 qui est égale au double de l'unité de hauteur :

$$E = 0,7 SA^2$$

$S$  en  $\text{km}^2$ ,  $A$  en mètres et  $E$  en millions de kWh.

Le tableau II donne dans ses quatre premières colonnes pour les principaux emplacements, les valeurs de  $A$ ,  $S$ ,  $E$  et  $L$ . Un des projets de la baie du Mont-Saint-Michel conduit ainsi à une énergie naturelle annuelle de 66 milliards de kWh.

Reste maintenant à caractériser la facilité d'établissement d'un barrage, le premier critère, et d'ailleurs le plus simple est évidemment la longueur de ce barrage car les profondeurs d'eau à basse mer pour les emplacements de barrages étudiés diffèrent assez peu les unes des autres, au moins pour les estuaires.

Deux quotients vont aider à définir l'influence de la forme :

1°) Le rapport  $\frac{L}{S}$  caractérisera l'aptitude géographique d'un

cycle à enfermer une grande surface d'eau, l'aptitude étant d'autant plus grande que le rapport est plus petit. La Rance, la baie du Mont-Saint-Michel, la rade de Brest, le site américain de Passamaquoddy, celui de Lorient se présentent de façon semblable, l'estuaire de la Severn est un peu moins favorable ; par contre, un petit havre comme Rothéneuf paraît peu favorisé.

TABLEAU II

RESUMANT LES ELEMENTS DU CHOIX D'UN SITE

(L'énergie produisible pratiquement est avec un équipement suffisant un peu inférieure à 50 % de l'énergie naturelle E)

Sites	A	S	E en	L	$\frac{L}{S}$	$\frac{L}{E}$
	en m	en km <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup> kWh	en m	m/km <sup>2</sup>	m/10 <sup>6</sup> kWh
Lorient	4,54	16	240	750	46	3,2
Brest	6,42	92	2.640	3.640	40	1,4
Aber-Benoît	7,40	2,9	110	200	69	1,8
Aber-Wrac'h	7,40	1,1	42	190	175	4,6
Arguenon						
et Lancieux	11,40	28	2.520	6.275	227	2,49
La Fresnaye	11,40	12	1.085	2.760	231	2,55
Rance	11,40	22	2.010	725	33	0,36
Rothéneuf	12	1,1	116	330	287	2,8
Mont-St-Michel	12,40	610	66.000	23.500	38	0,36
Somme	9,30	49	2.940	5.100	105	1,7
Severn	11,50	44	4.020	3.500	80	0,87
Passamaquoddy	7,50	120	4.630	4.270	43	0,92

L

2°) Le rapport  $\frac{L}{E}$  — caractérise l'aptitude à la production d'énergie

et fournit ainsi un classement sommaire des emplacements d'après leur intérêt économique, le plus grand intérêt correspondant au plus petit rapport. Or, parmi les stations françaises, l'estuaire de la Rance et la baie du Mont-Saint-Michel se placent très nettement en tête, puis les projets de la rade de Brest, de la baie de la Somme, de l'estuaire de l'Aber Benoît viennent loin derrière, avec un coefficient près de quatre fois supérieur, les autres projets français tels que celui des baies de l'Arguenon et de Lancieux, ceux de la baie de la Fresnaye, de Rothéneuf, de Lorient, de l'Aber Wrac'h, conduisent à des longueurs de barrage par kWh de 7 à 10 fois supérieures à la longueur correspondante pour la Rance. Il est bien certain qu'un tel rapport

L

— n'a qu'une valeur d'indication et qu'un spécialiste ne saurait E

accepter sans appel un pareil jugement, mais les différences entre les divers emplacements sont si importantes qu'elles permettent de comprendre comment la question a été tranchée et pourquoi. Par exemple, on saisit tout de suite pourquoi les peti-

## GROUPE A AXE VERTICAL "ALTERNATEUR EN PARAPLUIE"

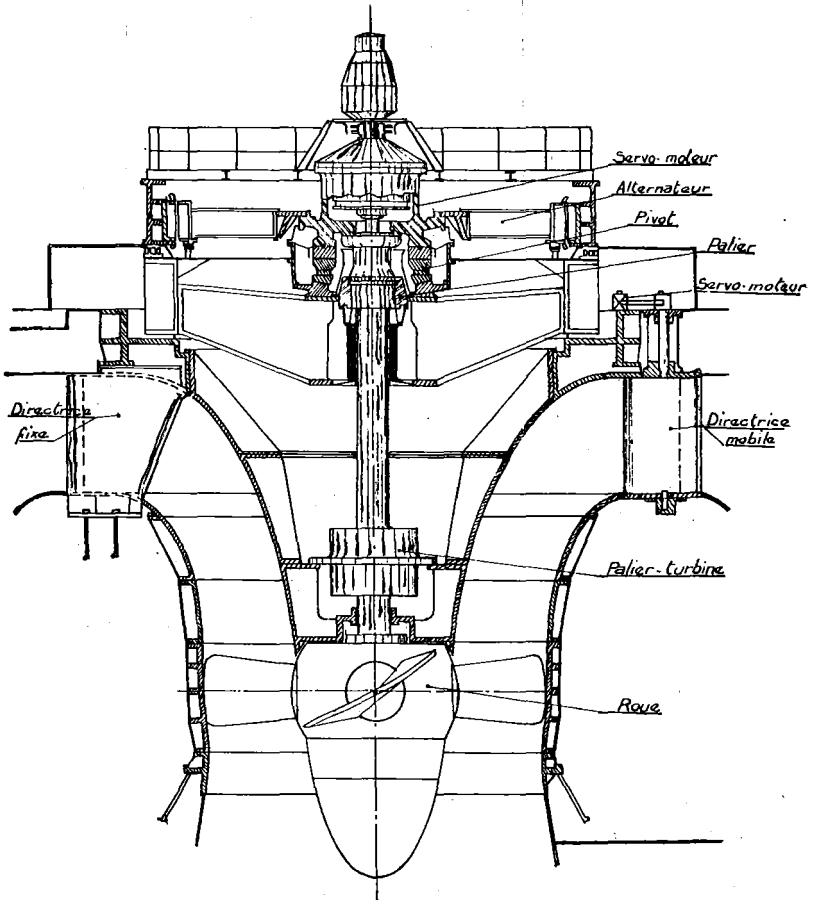


FIG. 14

tes usines, type Aver Wrac'h ou Rothéneuf, sont très défavorisées par l'exiguïté de leurs dimensions.

Les projets étrangers de la Severn (Grande-Bretagne) ou de Passamaquoddy (U.S.A.) paraissent nettement moins intéressants que les deux premiers projets français, la longueur de barrage par kWh étant deux fois et demie supérieure à celle des projets français.

## 6. — DISPOSITION DES MACHINES

Des efforts considérables ont dû être faits avant de trouver les dispositions réellement adaptées à une usine marémotrice.

Avec une roue hélice classique à axe vertical, l'alternateur se place normalement en bout d'arbre, au-dessus de la roue, selon un schéma aujourd'hui classique (Donzère-Mondragon, Kembs, etc...). Cependant, pour abaisser le plus possible les superstructures de l'usine, le projet 1951 de l'usine Rance devant comporter la hauteur la plus réduite possible dans le sens vertical

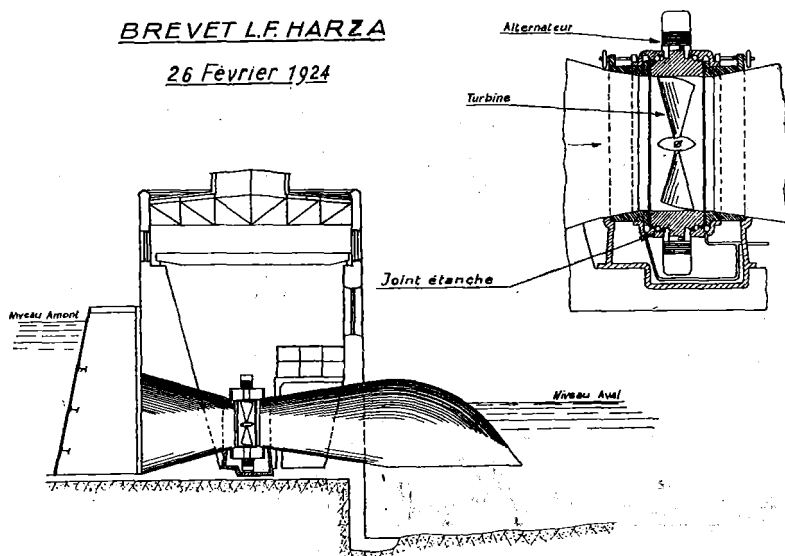


FIG. 15

pour des raisons évidentes d'esthétique, nous avons adopté le type d'alternateur dit « en parapluie » car il est situé au-dessus du pivot (fig. 14).

Avec une roue à axe horizontal, dont on peut attendre à priori un meilleur rendement lors du fonctionnement à double sens, l'alternateur placé sur l'arbre même de la roue est en totalité au-dessous de la surface de l'eau. Il est donc nécessaire de l'isoler de l'eau de mer. Trois types de solutions ont été proposés pour résoudre ce problème :

- 1) alternateur utilisant la roue hélice comme rayons supports et entourant complètement l'écoulement d'eau (type Harza) (fig. 15) ;

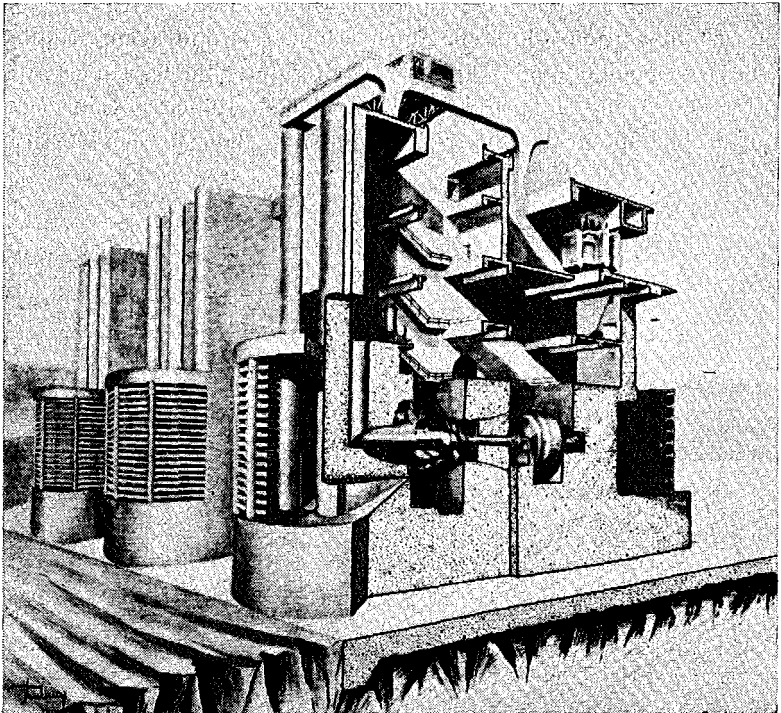


FIG. 16. — Chute d'Argentat - Groupe puits aval

- 2) alternateur en bout d'arbre placé dans un puits vertical et contourné par l'écoulement d'eau (type « puits » (fig. 16) ;
- 3) alternateur dans un « bulbe » complètement entouré par l'écoulement d'eau (type « bulbe ») (fig. 17).

On a pu penser aussi à l'utilisation éventuelle d'engrenages entre la turbine et l'alternateur ; des essais sont en cours.

*Premier type (Harza).* — Dès novembre 1919, un ingénieur-conseil américain, L. F. HARZA, demandait aux U. S. A. un brevet (obtenu en février 1924) pour une roue de turbine où le rotor de l'alternateur est bobiné à l'extérieur d'une ceinture portée par l'extrémité des pales de la roue. Cette solution com-

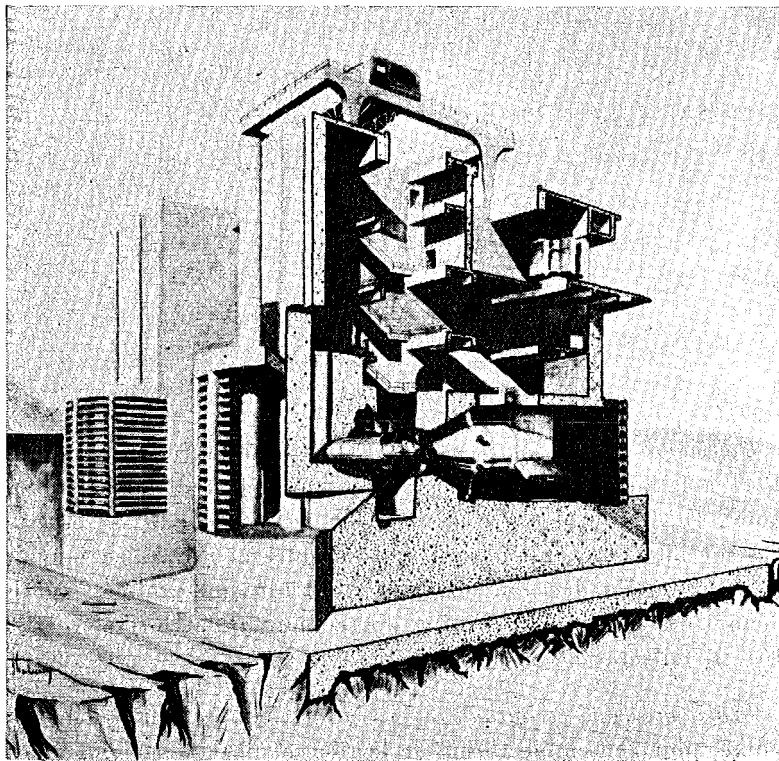


FIG. 17. — Chute d'Argentat - Groupe bulbe aval

portait un problème délicat pour la réalisation des joints qui paraît avoir été résolu pour la première fois par un Allemand, M. Arno FISCHER, sur les rivières de Bavière où quelques groupes d'une puissance unitaire de 2.000 ch ont été installés depuis 1943 et donnent satisfaction (fig. 18).

Il paraît difficile de dépasser une telle puissance unitaire par suite des efforts que les extrémités des pales doivent transmettre à la couronne.

ALTERNATEUR CEINTURANT LA ROUE  
STEINBACH -BAVIÈRE-

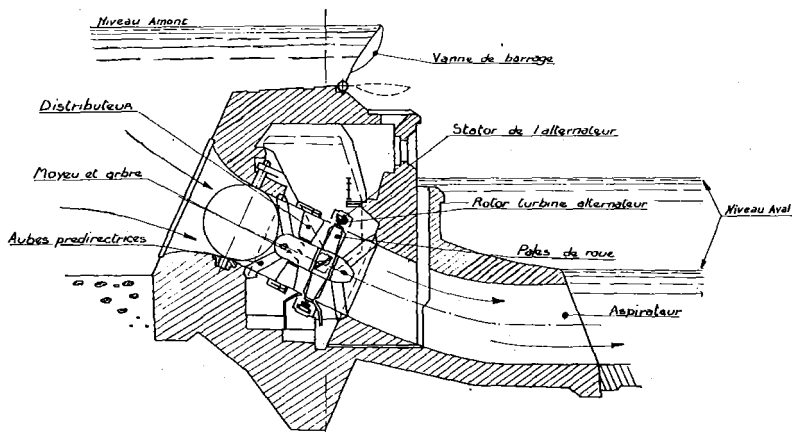


FIG. 18

*Deuxième type (« puits »).* — Cette solution fut étudiée dès 1944 à la demande et pour le compte de la Société d'Etudes pour l'Utilisation des Marées par la Société NEYRPIC. Des études sur modèle réduit ont été satisfaisantes et E.D.F. en janvier 1953 a pris la décision de faire construire un groupe expérimental de ce type pour l'usine d'Argentat sur la Dordogne (fig. 16). Il entrera en service dans l'été 1956.

*Troisième type (« bulbe »).* — L'alternateur est placé dans un bulbe, tout l'ensemble formé de la roue et de l'alternateur étant ainsi complètement immergé. La puissance électrique est éva-

cuée par des câbles logés dans les croisillons supportant les paliers ou dans le passage d'accès au bulbe.

La première réalisation paraît avoir été faite en Allemagne sur la Persante à Röstin, aussi par M. Arno FISCHER, (fig. 19) pour une puissance de quelques centaines de chevaux. Peu de renseignements ont été publiés, l'exploitation paraît avoir donné lieu à de graves difficultés par suite des condensations de la

ALTERNATEUR SUBMERGÉ - GROUPE "BULBE"  
-RÖSTIN-

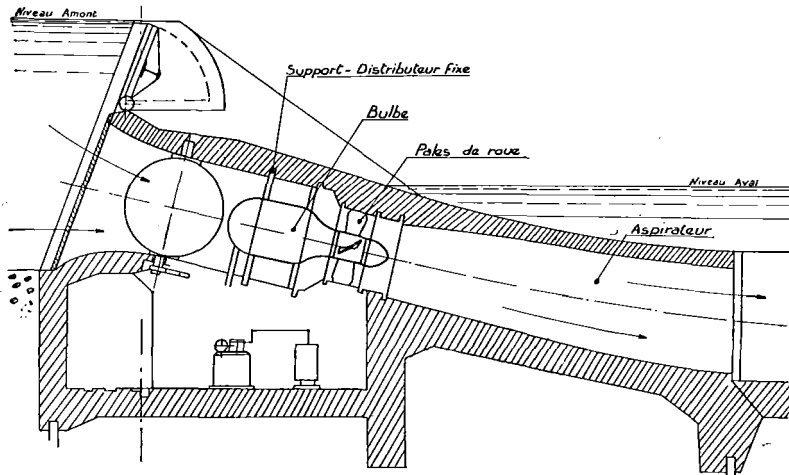


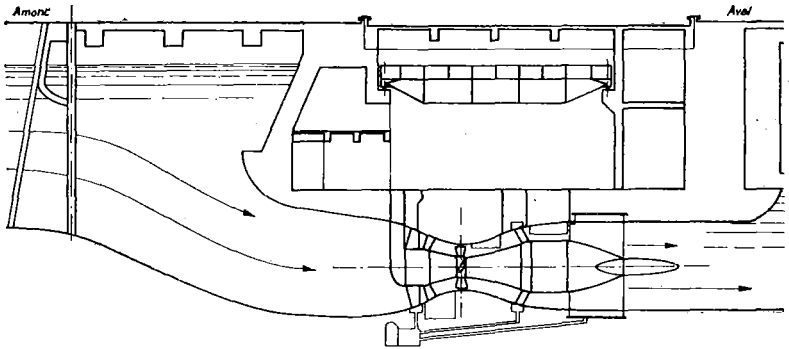
FIG. 19

vapeur d'eau contenue dans l'air intérieur du bulbe à la suite du refroidissement de cet air par l'eau extérieure au bulbe.

En janvier 1953, en même temps que pour les groupes puits, E.D.F. décidait de faire construire des groupes bulbes expérimentaux à Argentat et Cambeyrac (fig. 17-20-21). Ils seront en service dans l'été 1956.

Vers la même époque, un français, M. GUIMBAL, en liaison avec les constructeurs français ALSTHON et NEYRPIC, ajoutait

à cette idée de bulbe celle d'utiliser comme fluide de refroidissement intérieur l'huile. Un groupe de ce type, de 1.000 ch, a été commandé par la S.N.C.F. pour équiper l'usine de Castet (1) dans les Pyrénées (sur le Gave d'Ossau). La mise en service en 1954 a été très satisfaisante. Il semble malheureusement difficile d'obtenir par ce moyen des puissances nettement supérieures à 1.000 kW.



USINE DE CAMBEYRAC

Groupe bulbe aval.

FIG. 20

L'intérêt des groupes « bulbe amont » à axe horizontal pour l'usine marémotrice de la Rance réside surtout, — en dehors d'une légère amélioration de rendement de quelques pour cent dans le sens du turbinage direct (vidage), —

- 1) dans la possibilité, sans dépenses supplémentaires importantes, de fonctionner avec des rendements convenables dans toutes les hypothèses possibles : remplissage ou vidage, en turbinage ou en pompage ;
- 2) dans la possibilité d'installer, avec une rentabilité marginale suffisante, dans la largeur de la Rance une puissance nettement plus élevée qu'avec des groupes classiques, ce

---

(1) Houille blanche - Mars-Avril 1954.

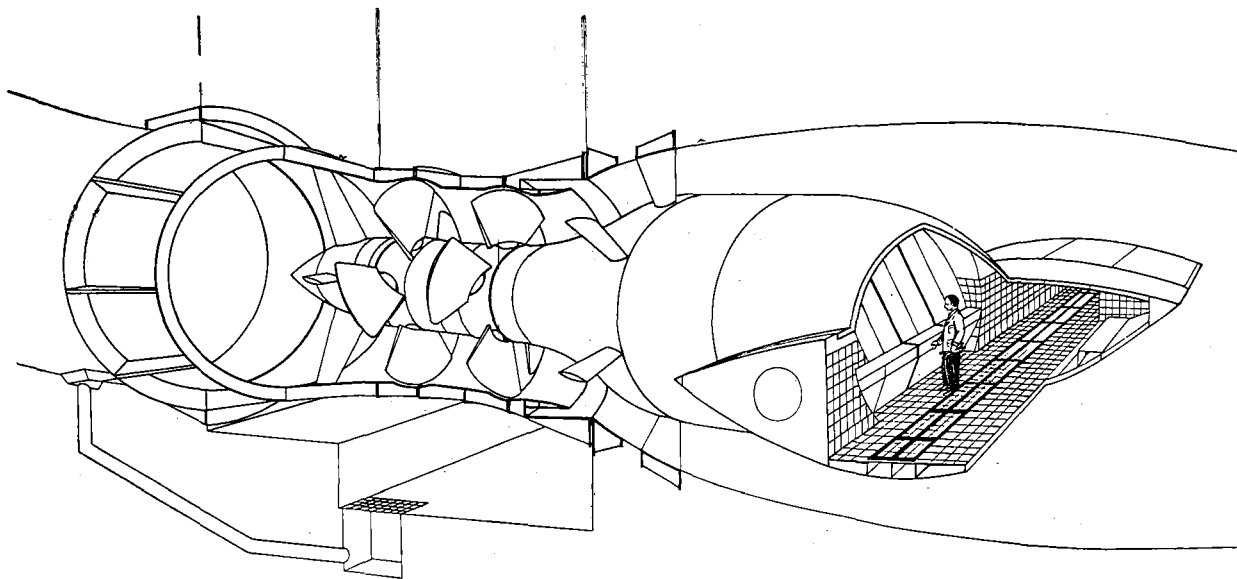


FIG. 21

USINE de CAMBEYRAC

Groupe bulbe aval — Double roue, Type Arno Fischer

qui conduit à aller jusqu'à 38 groupes de diamètre 5,65 m, permettant de plus le logement dans le corps du barrage des ateliers, transformateurs, poste haute tension, etc... ;

- 3) dans le grand débit de vannage offert par les groupes eux-mêmes ( $186 \text{ m}^3/\text{sec}$  sous 1 m de chute pour un groupe bulbe).

L'équipement en « bulbe amont » a paru à la fin des études d'E.D.F. nettement préférable à celui en puits, d'une part par son débit supérieur de vannage ( $186 \text{ m}^3/\text{sec}$  sous 1 m, contre

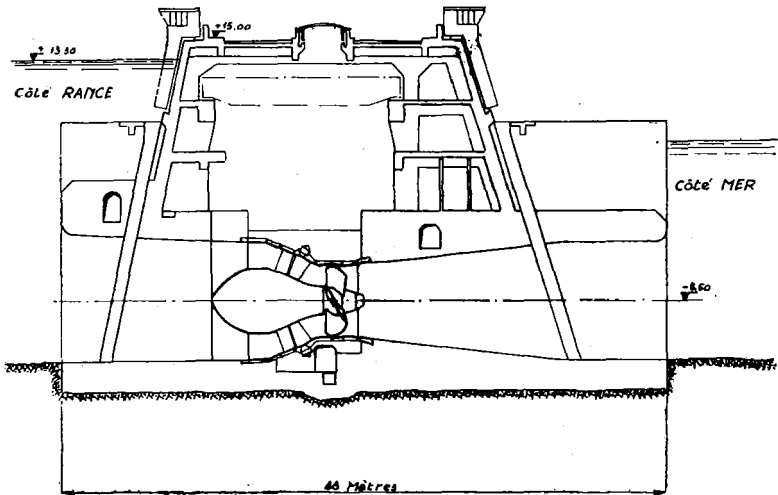


FIG. 22

USINE MAREMOTRICE DE LA RANCE — Projet 1955

Coupe dans l'axe d'un groupe

$100 \text{ m}^3/\text{sec}$ ), d'autre part, par les facilités considérables qu'il apporte pour résoudre les problèmes de manutention et, d'une manière générale, pour concevoir dans son ensemble toute la structure de l'usine. Une telle conclusion n'est par contre pas valable sans restriction pour une usine de rivière à faible nombre de groupes où les groupes puits gardent dans de nombreux cas tout leur intérêt. Les commandes de prototypes pour Cam-

beyrac et Argentat ont eu le grand mérite d'obliger les constructeurs à prendre à bras-le-corps les problèmes pratiques posés par la construction des groupes à axe horizontal. Mais il suffit d'avoir suivi l'évolution des projets successifs jusqu'au « groupe bulbe amont monobloc » actuellement choisi pour la Rance et d'admirer le dépouillement maintenant parfait de ses lignes (fig. 22) pour être assuré que ces prototypes ont joué leur rôle.

En conclusion, la construction en groupes monoblocs comprenant à la fois turbine et alternateur démontables en une seule fois et remplaçables par « échange standard » a permis d'adopter pour la Rance ce type de groupes, les difficultés certaines de mise au point étant sûrement surmontables dans le délai de démarrage des groupes successifs. Un premier groupe sera d'ailleurs commandé incessamment pour être installé dans une écluse désaffectée du port de Saint-Malo, il permettra d'effectuer toutes les expériences nécessaires avant la commande définitive des autres groupes.

## 7. — CYCLES D'ORDRES SUPERIEURS

### a) Définitions

Tous les cycles d'utilisation du paragraphe 3 sauf le dernier (bassins multiples) avaient une période d'une marée et, n'ayant pas fait l'objet d'une étude systématique, ne couvraient pas l'ensemble des possibilités offertes par l'utilisation des deux sens d'écoulement de l'eau et du pompage. La généralisation du problème nous a conduits à des résultats inattendus. Mais avant de les exposer, nous préciserons que les équations définissant le fonctionnement optimum lors d'un vidage ou d'un remplissage (turbinage ou pompage) n'étaient pas connues avant la création du S.E.U.M. Une de nos premières tâches a été de les établir au moyen du Calcul des Variations, d'en fixer les propriétés les plus importantes et de mettre au point l'utilisation pratique de ces calculs. Il s'agissait là de recherches mathématiques assez étendues ayant leur intérêt propre mais sur

lesquelles nous n'insisterons pas, renvoyant le lecteur s'il en est curieux à notre article du Bulletin de la Société Française des Electriciens (Mai 1953).

Une marée comporte quatre mouvements possibles, deux turbinages, deux pompages ; il y aura donc a priori seize combinaisons possibles représentant chacune un cycle possible pour l'exploitation d'une marée. Ce cas très simple d'une seule marée est assez bien adapté à l'étude de la production d'une énergie de valeur constante (le prix du kWh étant indépendant de l'heure et de la date). Le cas de deux marées, d'une durée un peu supérieure à 24 heures, déjà plus difficile, permet d'aborder et de comprendre le cas essentiel du prix de l'énergie variable avec l'heure considérée (heures pleines, heures de pointe, heures creuses), cas négligé par les premiers chercheurs qui, pour la plupart, semblent s'être fixé pour objectif la constance de la production. Le cas de 27 marées (quatorze jours) est seul à bien correspondre au problème réel car il permet d'introduire les heures creuses du samedi et du dimanche où l'énergie est normalement de prix plus faible. Mais chaque marée introduit quatre mouvements et nous avons vu que pour une marée le nombre de cycles possible égal au nombre des combinaisons de ces quatre mouvements entre eux est de  $2^4 = 16$ . Pour deux marées, nous en aurons  $(16)^2 = 256$  cycles, ce qui nécessite déjà un certain effort pour les classer convenablement. Pour 27 marées, nous aurons  $16^{27} = 2^{108}$  cycles différents, soit environ  $3.10^{32}$  (\*). Il n'y a donc aucun espoir de les recenser. Mais les études complètes des deux cas à une et deux marées, et l'esquisse de celui de trois marées, apportent la plupart des notions fondamentales nécessaires pour l'exploitation et montre l'extrême richesse du sujet en mettant en évidence la vraie nature de la souplesse extraordinaire d'une usine marémotrice. On voit ainsi s'introduire successivement les cycles du premier ordre relatifs à des variations de prix ayant la période d'une marée, du deuxième ordre pour une période de deux marées, voisine de la journée.

---

(\*) Trois cent mille milliards de milliards de milliards.

**b) Cycles du 1<sup>er</sup> ordre (une marée)**

Nous appellerons ainsi les cycles ayant une marée comme périodicité. Nous noterons s, le pompage direct, b le pompage inversé, 1 le turbinage direct, 2 le turbinage inversé, de telle sorte que le double effet double pompage représenté sur la fig. 23 aura comme notation alb2. Par suite de la périodicité indiquée, la suite des mouvements sera

alb2 alb2 alb2 .....

les points de début et de fin de cycle étant à la même cote.

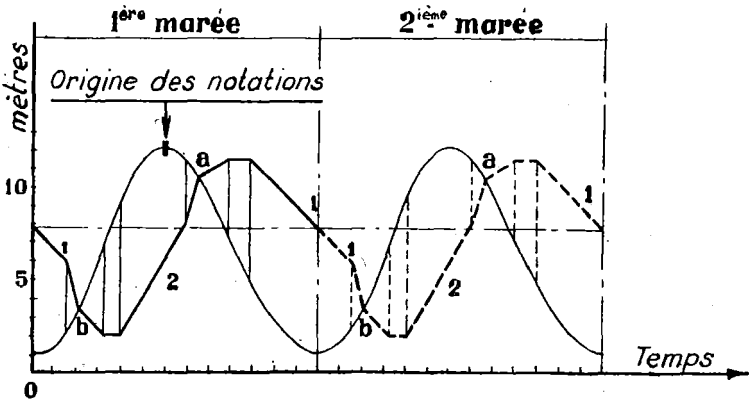


FIG. 23

Le tableau III montre clairement la formation de ces 16 cycles.

TABLEAU III

	Pas de pompage	Pompage direct	Pompage inversé	Deux pompages
Pas de turbinage	z	a	b	ab
Un vidage	1	a1	1b	alb
Un remplissage	2	a2	b2	ab2
Deux turbinages	12	a12	1b2	a1b2

Le cycle sans mouvement que nous appellerons « zéro » correspond au cas parfaitement possible où le prix de l'énergie est nul pendant toute la marée. Nous le désignerons par la notation (z), abréviation de zéro. Certains cycles, comme 1 b (fig. 24), paraissent à écarter comme conduisant à un pompage nuisible puisqu'il abaisse le bassin au moment où il convient d'ouvrir les vannes, afin de préparer le nouveau simple effet au vidage. De ce fait, il consomme de l'énergie pour un résultat défavorable.

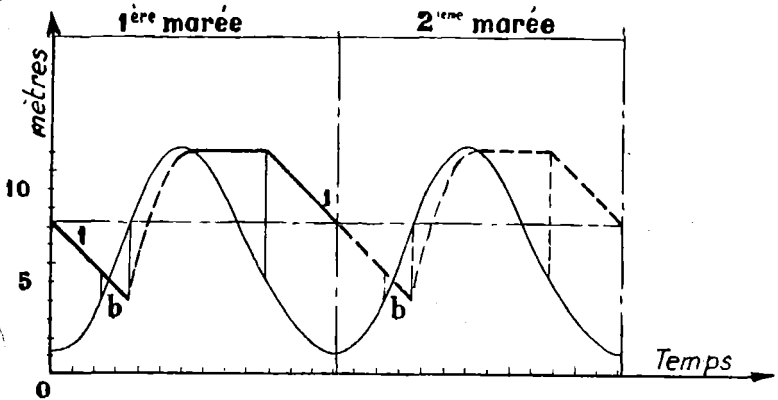


FIG. 24

Mais dans l'ère atomique, il sera peut-être intéressant, pour éviter d'arrêter un réacteur nucléaire, de consommer de l'énergie. En effet, la prépondérance atomique sera telle, peut-être que l'arrêt de nuit de toutes les hydrauliques et des marémotrices ne suffira pas à fournir une charge suffisante aux usines atomiques.

Dans ce cas, il pourra s'avérer intéressant de payer une petite somme pour consommer de l'énergie, et la marche en pompe des marémotrices, de coût presque négligeable, sera sans doute préférable à l'installation de résistances liquides ou à la création artificielle de consommation à allure vraisemblablement imprévisible. Des cycles comme 1b auront donc peut-être plus tard un intérêt.

Mais revenons à la conjoncture actuelle. Nous appellerons cycles positifs ceux qui répondent au cas où l'énergie n'a jamais une valeur négative. Nous trouvons immédiatement huit cycles positifs, le cycle (z) étant mis à part.

quatre « simple effet »	{	deux sans pompage (1) (vidage)	
		(2) (remplissage)	
	{	deux avec un pompage (a1)	(b2)

quatre « double effet »	{	un sans pompage (12)	
		deux avec un pompage (a12)	(1b2)
	{	un avec deux pompes (a1b2)	

la recherche des cycles utiles, de l'exploitation d'une seule marée, le prix de l'énergie étant constant par exemple, est ainsi complètement terminée.

### c) Cycles du deuxième ordre (deux marées)

Ici le prix de l'énergie sera constant ou périodique, si l'on substitue au jour civil une période égale à la durée de deux marées, ce qui représente une approximation assez grossière : la durée de deux marées successives varie entre 24 h 30 et 25 h 30, d'où un écart atteignant plusieurs heures en quelques jours. Mais l'analyse de ce cas est nécessaire pour saisir le mécanisme de formation des cycles d'ordres supérieurs.

Dès le deuxième ordre, la richesse en cycles est déjà étonnante.

Quatre fonctionnements en producteur d'énergie sont possibles : deux en vidages du bassin (appelés 1 et 3), deux en remplissage (appelés 2 et 4).

Quatre fonctionnements en consommateur d'énergie (pompage) sont possibles : deux en remplissage du bassin (appelés a et b), deux en vidage (appelés c et d).

*Premier exemple* — (fig. 25). un double effet répété à chacune des deux marées s'appellera 1 2 3 4 (cycle positif) la numération 1 désignant le premier vidage possible après la pre-

mière pleine mer. Nous représentons ici deux journées (quatre marées successives) pour bien mettre en évidence le caractère cyclique, caractérisé par le fait qu'à haute mer le niveau du bassin est le même toutes les deux marées.

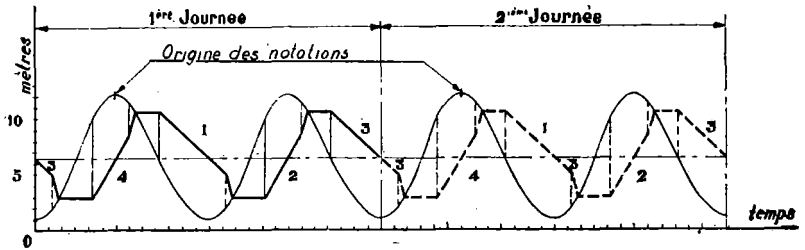


FIG. 25

*Deuxième exemple.* — Un simple effet à deux pompages s'appelant alc sera représenté par la fig. 26 (cycle positif).

Il peut en effet y avoir des combinaisons de hauteur de pleine mer et de prix d'énergie rendant intéressant de pomper aux deux pleines mers successives c et a avant de faire l'unique vidage l. Ce sera par exemple le cas où l'énergie de nuit et du matin ne vaudrait pratiquement rien et où celle de l'après-midi serait précieuse.

A priori le nombre de cycles différents du second ordre est de  $2^8 = 256$  (nombre des combinaisons possibles des huit mouvements (1, 2, 3, 4, a, b, c, d)). Nous avons trouvé que 104 seulement sont des cycles positifs, ce qui représente déjà une belle collection.

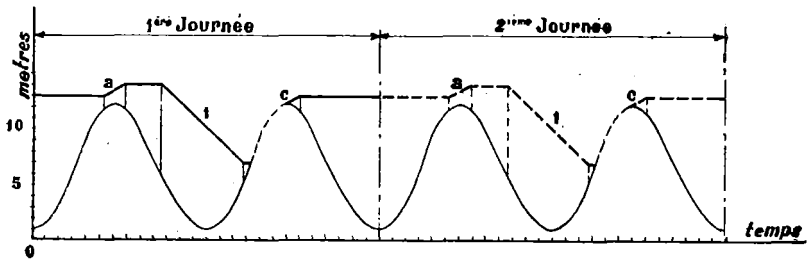


FIG. 26

Les 256 cycles possibles se classent rapidement suivant le nombre de mouvements consommateurs (zéro, un, deux, trois ou quatre pompages) et suivant le nombre de mouvements produc-

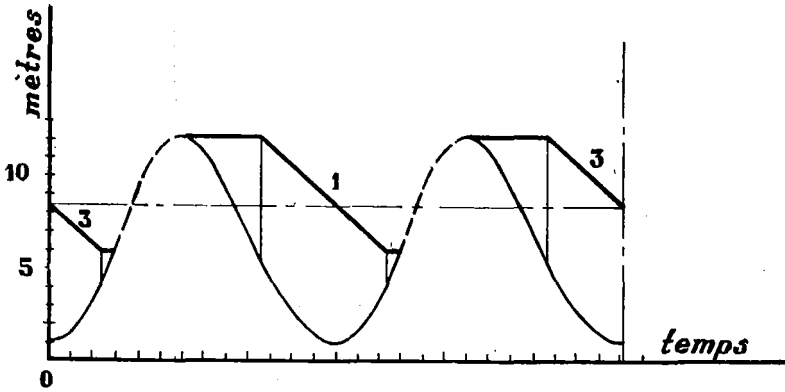


FIG. 27

teurs (zéro, un, deux, trois ou quatre turbinages). En fait, il est très utile de séparer en deux la classe des deux turbinages suivant qu'il s'agit de deux mouvements de même sens ou de deux mouvements de sens opposés dans un cas on répète à chaque marée le même mouvement, d'où le nom de *simple effet répété* 13 (fig. 27) produit de deux cycles de premier ordre, dans l'autre cas on ne fait pas de turbinage pendant toute une

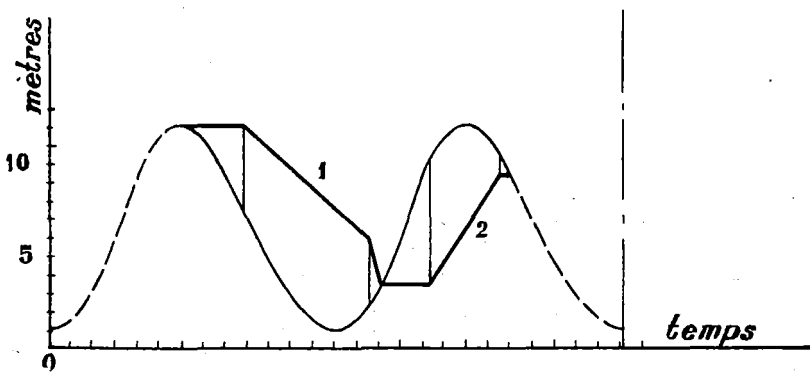


FIG. 28

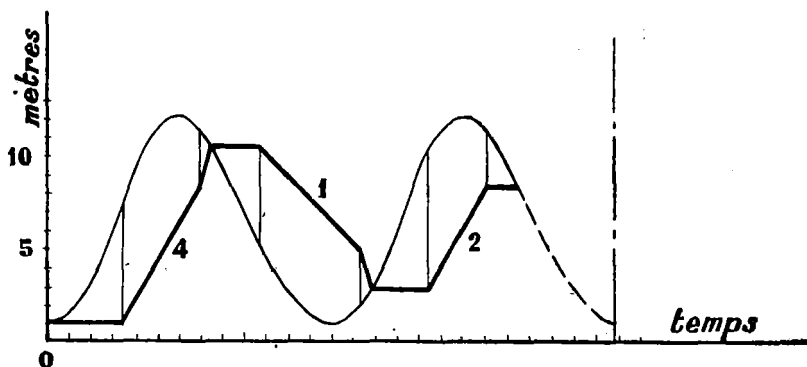


FIG. 29

marée *double effet unique* 12 (fig. 28) cycle du premier ordre suivi ou précédé d'un repos.

Les cycles à un seul mouvement porteront évidemment le nom de *simple effet unique*, ceux à quatre, de *double effet répété*. Restent ceux à trois mouvements, inconnus autrefois, traduisant le fait qu'il est souvent inutile et même coûteux de turbiner la nuit. Nous leur avons donné le nom de *sesqui-effet* 412 (fig. 29) (sesqui signifiant  $3/2$ ) définissant ainsi un cycle intermédiaire entre les simple et double effets.

Il est facile d'énumérer les 256 cycles grâce à une analyse combinatoire très simple. Le tableau IV suivant donne les résultats.

TABLEAU IV

	Zéro pompage	Un pompage	Deux pompages	Trois pompages	Quatre pompages	Total
Zéro turbinage	1	4	6	4	1	16
Simple effet unique	4	16	24	16	4	64
Simple effet répété	2	8	12	8	2	32
Double effet unique	8	16	24	12	4	64
Sesqui-effet	4	16	24	16	4	64
Double effet répété	1	4	6	4	1	16
	<hr/> 20	<hr/> 64	<hr/> 96	<hr/> 60	<hr/> 16	<hr/> 256

Il est un peu plus délicat d'énumérer les cycles positifs !

Finalement, on obtient les tableaux V et VI suivants :

TABLEAU V

*Cycles positifs (104)*

	Zéro pompage	Un pompage	Deux pompages	Trois pompages	Quatre pompages	Total
Zéro turbinage	—	—	—	—	—	—
Simple effet unique	4	8	4	—	—	16
Simple effet répété	2	4	2	—	—	8
Double effet unique	4	12	12	4	—	32
Sesqui-effet	4	12	12	4	—	32
Double effet répété	1	4	6	4	1	16
	15	40	36	12	1	104

TABLEAU VI

*Cycles non positifs (152) (zéro, « en attente » ou négatifs)*

	Zéro pompage	Un pompage	Deux pompages	Trois pompages	Quatre pompages	Total
Zéro turbinage	1	4	6	4	1	16
Simple effet unique	—	8	20	16	4	48
Simple effet répété	—	4	10	8	2	24
Double effet unique	—	4	12	12	4	32
Sesqui-effet	—	4	12	12	4	32
Double effet répété	—	—	—	—	—	—
	1	24	60	52	15	152

Les 104 cycles *positifs* se répartissent en vingt-neuf séries, tous les cycles pouvant se déduire par transposition de chaque tête de série.

TABLEAU VII  
Têtes de séries

Simple effet unique (quatre séries)	1, a1, 1c, alc
Simple effet répété (trois séries)	13, a13, alc3
Double effet unique (huit séries)	12, a12, 1b2, 12c, alb2, a12c, 1b2c, alb2c
Sesqui-effet (huit séries)	123, a123, 1b23, 12c3, alb23, a12c3, 1b2c3, alb2c3
Double effet répété (six séries)	1234, a1234, alb234, a12c34, alb2c34, alb2c3d4

Le tableau VIII annexé donne le classement des 256 cycles positifs ou non, et deux planches I et II annexées reproduisent les 104 cycles positifs.

#### d) Conclusion

On ne peut songer à aller beaucoup plus loin dans l'analyse. La période de trois marées entraîne  $2^{12} = 4.096$  cycles différents et nous avons pu établir qu'il y en a 1.136 positifs. Or chaque cycle peut être optimum pour une certaine variation du prix de l'énergie pendant ce cycle. Un dispatcher chargé de préparer le programme d'une quinzaine de quatorze jours ne saurait raisonnablement y passer plus d'un après-midi par exemple et devra donc se contenter de son intuition convenablement éduquée. Il devra bien connaître la solution du problème à deux marées, grâce aux deux tableaux joints représentant les 104 cycles positifs du second ordre. Il pourra lui être utile aussi de considérer les 34 cycles du tableau IX représentant d'après une théorie que nous n'exposons pas ici, des cycles dits d'attente qui, quoique non positifs pour l'ordre 2, peuvent pour un allongement convenable de la période, engendrer des cycles positifs. Ils seront donc intéressants aussi pour un dispatcher qui cherche à étudier une quinzaine, et pour le moment il devra en rester là, la complication du troisième ordre devenant excessive.

TABLEAU IX  
CYCLES EN ATTENTE DU 2<sup>m</sup>e ORDRE

	Pompages	
Pas de turbinage		a, b, c, d, ac, bd
Simple effet unique	1	1b, 1d, 2c, 3d
	2	alb, ald, a3d, 1bd, b2c, c3d
	3	albd, ac3d
Simple effet répété	1	13d
	2	a13d, 1c3d
	3	alc3d
Double effet unique	1	12d
	2	a12d, 1b2d
	3	alb2d
Sesqui-effet	1	123d
	2	a123d, 1b23d, 12c3d
	3	a12c3d, alb23d, 1b2c3d
	4	alb2c3d

La solution du problème à deux marées dans le cas du prix constant est évidemment particulièrement intéressante, car elle équivaut à la recherche de la production maximum d'énergie. Sa forme dépendra du coefficient de la marée. Les fig. 30 à 33 montrent que pour les faibles marées (coefficient 45) on obtient un simple effet répété à la vidange avec pompage alc3 :

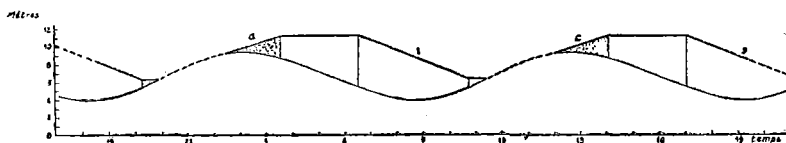


FIG. 30. — Coef. 45 ... alc3 ...

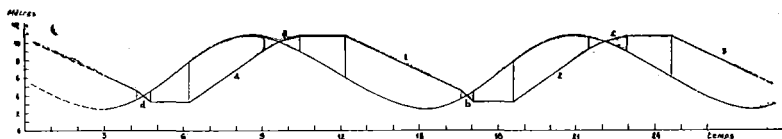


FIG. 31. — Coef. 70 ... alb2c3d4 ...

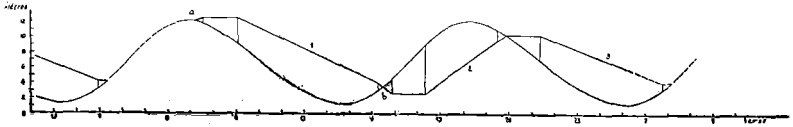


FIG. 32. — Coef. 95 ...alb23 ...

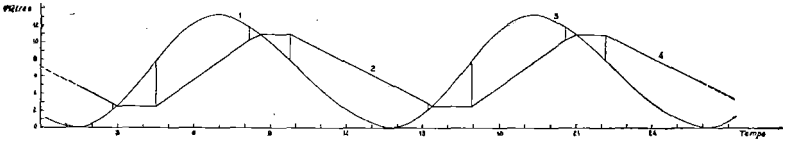


FIG. 33. — Coef. 120 ... 1234 ...

- pour les marées moyennes (coefficient 70), un double effet répété avec quatre pompages alb2c3d4 ;
- pour les fortes marées (coefficient 95), un sesqui-effet à deux pompages alb23 ;
- pour les marées exceptionnelles (coefficient 120), un double effet sans pompage 1234.

On peut aussi vouloir exploiter en pointe de manière à répondre mieux en hiver aux exigences de la consommation. Par exemple, la fig. 34 montre comment on peut arriver à obtenir

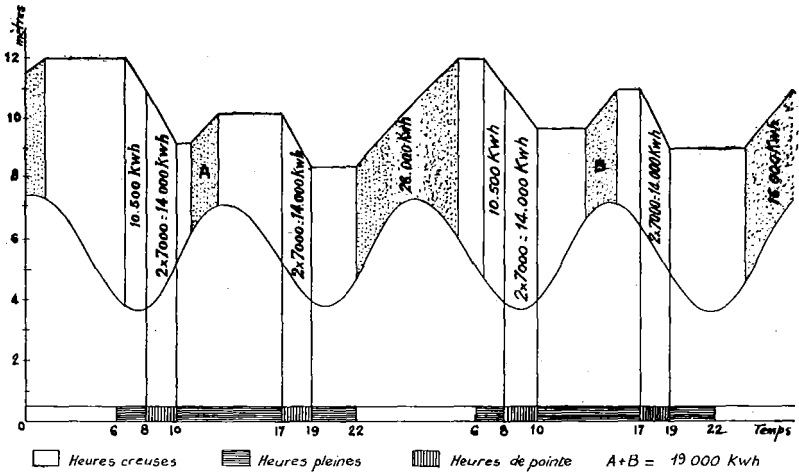


FIG. 34

la puissance maximum de chaque groupe (ici 7.000 kW) pendant les huit heures de pointe des deux journées considérées (8 h — 10 h et 17 h — 19 h) bien que ces jours-là les marées soient les plus faibles sur quatre années successives. (Notre notation sera ici alc3 (simple effet répété avec double pompage). Le niveau du bassin reste ainsi continuellement au-dessus de celui de la mer. Cet exemple suffira à montrer comment on peut arriver à utiliser pleinement la souplesse extrême des marémotrices.

Pour la Rance, l'utilisation de cycles différents tout le long de l'année permet de répondre au mieux aux conditions du moment considéré, créant une exploitation que l'on peut qualifier de « sur mesure », ceci contrairement aux autres formes de production d'énergie électrique, thermique, éclusée, fil de l'eau ou réservoir annuel.

## 8. — L'USINE DE LA RANCE

Comme nous l'avons vu, l'étude de l'aménagement de la Rance, décidée à la suite d'une première série d'études, aboutit d'abord au projet dit « projet 1951 », base de la demande en concession (26 mars 1952).

L'aménagement de la Rance fit alors l'objet des enquêtes réglementaires dans les départements d'Ille-et-Vilaine et des Côtes-du-Nord, ainsi qu'auprès des différentes administrations intéressées. Il fut approuvé à l'unanimité par les conseils généraux des départements, et les commissions départementales des sites ne lui firent aucune objection.

Ce « projet 1951 » comportait l'installation de 26 groupes à axe vertical, de 8.000 kW de puissance nominale, équipée de roues Kaplan, et de 10 pertuis de vannage répartis à raison de 6 sur la rive droite et de 4 sur la rive gauche ; une écluse, disposée sur la rive gauche, était en outre prévue pour permettre le franchissement des ouvrages. La digue-usine qui devait être installée entre la pointe de la Brebis (rive gauche) et la

pointe de la Briantais (rive droite) mesurait environ 700 mètres (fig. 35).

Elle utilisait exclusivement le simple effet au vidage sans pompage et devait avoir une production annuelle évaluée à 550 millions de kWh.

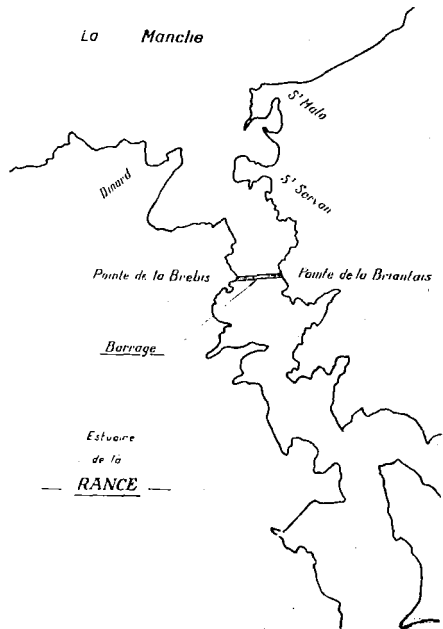


FIG. 35

Pendant que la demande en concession suivait son cours administratif intervenait un événement très important du point de vue technique, la mise au point des groupes-bulbes. Particulièrement adaptés à l'équipement des chutes de faible hauteur, comme nous l'avons vu, et au fonctionnement dans divers sens, ces groupes permettaient de tirer un meilleur parti du site de la Rance.

Ainsi au cours de l'année 1954, un nouveau projet dit « projet 1955 » a été étudié. Il comporte l'utilisation de groupes-bulbes

équipés de roues Kaplan à pales orientables au-delà de 200° et d'un alternateur situé à l'intérieur d'un bulbe.

Ce projet se prête avec beaucoup de souplesse aux six fonctionnements de base suivants :

- turbinage dans le sens mer-estuaire ;
- turbinage dans le sens estuaire-mer ;
- pompage dans le sens mer-estuaire ;
- pompage dans le sens estuaire-mer ;
- vannage dans le sens mer-estuaire et  
dans le sens estuaire-mer.

L'exploitation se fera à cycles variables ; compte tenu de l'heure de la pleine mer, de l'amplitude de la marée et des différentes valeurs de l'énergie au cours de la journée, le dispatcher choisira parmi les innombrables cycles possibles celui qui convient le mieux au jour considéré.

Ainsi, l'énergie produite par l'usine marémotrice pourra, suivant les nécessités de la consommation, être concentrée sur les heures pleines ou les heures de pointe, ou être répartie de manière à économiser au maximum le charbon consommé par les centrales thermiques.

En particulier sur simple préavis d'une journée l'usine pourra se présenter comme une usine au fil de l'eau, capable pour une part importante de concentrer son énergie dans les heures pleines, ou comme une usine d'éclusée capable de concentrer son énergie aux heures de pointe.

Son introduction dans le système général de production ne présuppose pas une consommation de forme déterminée et l'exploitation pourra être conduite pour répondre au mieux aux besoins.

Le nouveau projet réalisé suivant ces nouvelles conceptions conserve l'emplacement du projet 1951 entre la pointe de la Brebis (rive gauche) et la pointe de la Briantais (rive droite) (fig. 35). Il comporte une digue-usine dont le profil approxi-

matif est indiqué ci-contre, qui mesure environ 700 m de longueur et dont la construction exigera 460.000 m<sup>3</sup> de béton (fig. 22 et 36).

Sur la rive gauche, une écluse doit assurer la navigation entre la mer et l'estuaire.

L'usine a la forme d'un tunnel dont la partie supérieure est à la cote + 15, les plus hautes eaux pouvant atteindre le niveau + 13,5. Tout le matériel de production, de transformation, d'évacuation de l'énergie et d'exploitation doit être installé à l'intérieur de la digue-usine. L'équipement comprendra :

- 38 groupes-bulbes de 9.000 kW, tournant à 88,2 t/m, dont l'énergie sera débitée sur le réseau général à 220 kV ;
- 10 pertuis de vanne aidant aux différents remplissages et vidages de l'estuaire nécessaires pour l'exploitation.

Les plages de montage et d'entretien des groupes ainsi que les ateliers doivent être installés à chaque extrémité de la digue, au-dessus de la zone équipée par les pertuis.

La conception monobloc des groupes permet, on le voit, un ensemble de construction simple et sûr ; le remplacement des groupes à reviser se fera par simple levage à travers une fosse, un groupe de rechange prenant en quelques heures la place du précédent.

Sur la base économique de 1954, les dépenses d'établissement ont été évaluées à 32 milliards environ.

L'appel d'offres ayant été lancé fin juillet 1955, les travaux définitifs pourraient être échelonnés de 1956 à 1963 et l'on prévoit pour l'hiver 1963 la mise en service du dernier des 38 groupes (après la mise en service de 8 à 10 groupes au bout de quatre ans et de 8 à 10 autres groupes deux ans plus tard).

Ce projet conduit à une puissance installée nominale de 342.000 kW et à une productivité annuelle de plus de 800 millions de kWh, équivalente à l'économie de charbon que pour-

rait apporter une usine au fil de l'eau, genre Rhin ou Rhône, de un milliard de kWh environ.

L'usine de la Rance pourra suivant les cas assurer une *puissance de pointe* (moyenne de l'énergie produite pendant les heures de pointe en hiver) de 282.000 kW ou une *puissance garantie* (moyenne de l'énergie produite pendant les heures pleines d'hiver) de 140.000 kW.

Par comparaison, rappelons que l'excellent projet de Vogelgrün sur le Rhin, inscrit au 2<sup>me</sup> plan, apporte pour des dépenses de 24 milliards de francs, 750 millions de kWh, 45.000 kW de puissance garantie et 55.000 kW de puissance de pointe. Ces chiffres permettent de juger de l'intérêt exceptionnel d'une usine comme la Rance.

## 9. — LES PROJETS DE CHAUSEY ET DES MINQUIERS

Nos projets visent à équiper dans la baie du Mont-Saint-Michel entre Granville, les îles Chausey et la pointe du Grouin près de Cancale, dix à quinze millions de kilowatts. Une puissance comparable peut être attribuée au projet des Minquiers. Or la consommation totale de la France entière en 1954 a atteint seulement (pertes comprises) 8,3 millions de kW dont 4,8 de thermique. De tels projets ne se justifient que par l'augmentation rapide et pratiquement constante de la consommation tant en puissance instantanée (7,1 % entre les années 1954 et 1953, 77 % entre 1954 et 1946) qu'en énergie annuelle (9,1 % entre 1954 et 1953). Il est impressionnant de noter que le deuxième plan du décret-programme récent prévoit une consommation de 70 milliards de kWh pour l'année englobant l'hiver 1960-61, et le troisième plan en cours de préparation 100 milliards de kWh pour l'année englobant l'hiver 1965-1966, ceci en face des 45 milliards actuels. En admettant par exemple que l'énergie marémotrice représente dans l'avenir, en puissance, le quart de la production totale d'énergie nouvelle créée à partir de 1955, la production de l'usine Chausey-Mont-Saint-Michel trouvera sa

place dans celle de l'hiver 1980, la puissance totale française étant alors de l'ordre de 50 millions de kW. Or il faut quinze ans au moins pour exécuter un tel projet. Il reste donc dix années pour les études, ce qui ne paraît pas trop long vu l'importance du projet.

La production au moyen des marées de puissances de cette importance rend nécessaire l'analyse détaillée du processus physique correspondant. On ne peut plus admettre que l'usine ne modifiera pas le régime des marées caractérisé par la variation du niveau de l'eau et celle du courant, et en particulier par le décalage dans le temps entre les courbes de variation correspondantes. Nous avons montré qu'il existe une limite naturelle à l'énergie que l'on peut capter, limite que le volume du bassin et l'amplitude de la marée ne suffisent pas à déterminer.

Dans une chute d'eau fluviale, l'énergie produite par l'usine est soustraite de l'énergie qui se dissipait naturellement, avant la création du barrage, en remous, tourbillons, frottements divers, et la limite maximum de l'énergie transformable est égale au total de ces pertes. Devons-nous, par analogie, considérer l'énergie dissipée par la marée comme la limite que nous recherchons ?

Ainsi l'énergie traversant l'emplacement du barrage de la Rance (1), différence entre l'énergie entrant à marée montante et l'énergie sortant à marée descendante, est dissipée par frottements dans l'estuaire; car nous pouvons, à bon droit, négliger le débit de la rivière Rance.

Cette question fondamentale se prête bien au calcul : la figure 37 résume les résultats obtenus par M. ALLARD (Annales de Géophysique, t. 7, 1951) en donnant pour différents profils, en millions de kilowatts pour la marée de vive eau moyenne (coefficient 95), les puissances moyennes comptées positivement suivant les sens donnés dans la figure. (Les chiffres encadrés,

---

(1) En fait l'action des astres sur les eaux de l'estuaire apporte en sus une puissance non nulle, mais en fait négligeable, quelques dizaines de kilowatts par kilomètre carré, moins de 1.000 kW pour tout l'estuaire de la Rance.

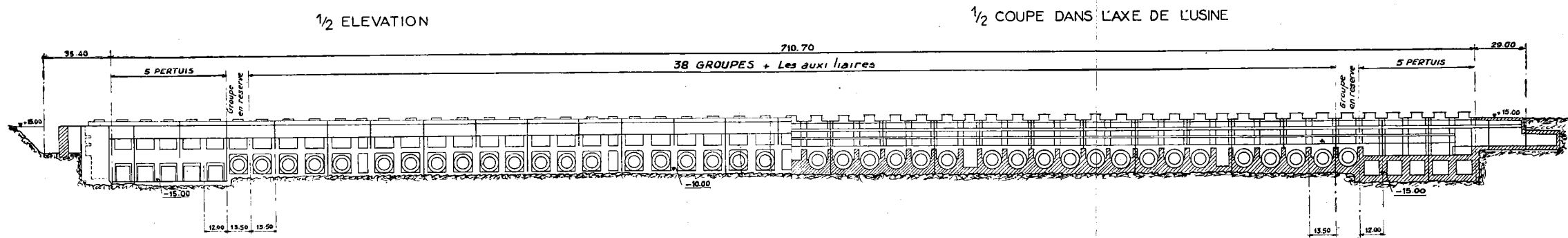


FIG. 36. — LA RANCE

Coupe longitudinale dans l'usine — (Projet 1955)

*Toutes les cotes sont prises par rapport au 0 des cartes marines*

obtenus par différence des puissances traversant les profils, donnent dans les mêmes conditions les puissances dissipées. Les chiffres correspondant à la moyenne sur une année sont à peu près égaux à la moitié des chiffres du tableau précédent, qui donnent la puissance moyenne pour une marée de *vive eau*).

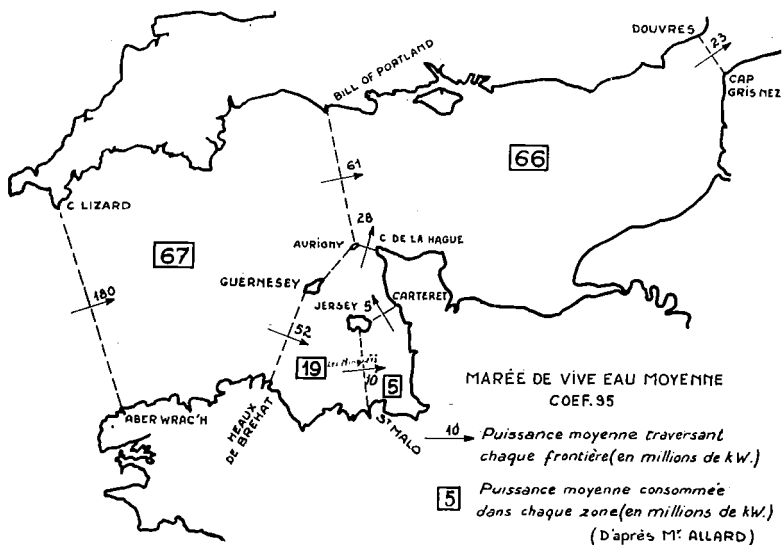


FIG. 37

Les puissances dissipées sont étonnement faibles : la puissance dissipée en moyenne annuelle dans le secteur Saint-Malo-Jersey - Carteret sur une surface de 3.200 km<sup>2</sup> est de l'ordre de 2 millions de kilowatts, ce qui donnerait environ 350.000 kW pour la puissance moyenne consommée dans la baie du Mont-Saint-Michel. En adoptant des chiffres plus élevés pour la Rance afin de tenir compte de frottements certainement plus élevés et par suite d'une plus grande puissance dissipée par unité de surface, nous obtenons un maximum de 60.000 kW dissipés en moyenne dans l'estuaire de la Rance (1). Nos projets d'usine

(1) On retrouve l'ordre de grandeur de ces chiffres par observation des courants en Rance et de leur décalage actuel avec les dénivellations de la marée.

dans la baie du Mont-Saint-Michel visent à équiper de 10 à 15 millions de kilowatts, soit de 30 à 50 fois la puissance actuellement dissipée. Les énergies que nous comptons utiliser sont donc très supérieures aux énergies dissipées naturellement. L'analogie avec les chutes d'eau est donc trompeuse. Ceci signifie simplement que nous ne pouvons espérer équiper des usines marémotrices de grande puissance sans modifier le régime des marées, il nous faudra attirer l'énergie qui actuellement se dissipe en d'autres lieux.

Or, la puissance totale dissipée en moyenne dans l'année et calculée dans les mêmes conditions atteint au maximum pour la Manche 80 millions de kilowatts, soit à peu près le même chiffre que celui de la puissance électrique consommée aux U.S.A. Encore convient-il de remarquer, avant de généraliser, que les océans profonds, à eux tous, Atlantique, Pacifique, Océan Indien, Antarctique, etc... dissipent une bien faible part de l'énergie des marées, un million de kilowatts au maximum, soit 3 W/km<sup>2</sup>. Seules comptent en fait dans le bilan mondial les mers peu profondes et resserrées comme la Manche, la Mer d'Irlande, la Mer du Nord, le Détroit de Behring, celui de Malacca, etc... Au total, la puissance moyenne dissipée par les marées sur le globe tout entier est de l'ordre du milliard de kilowatts. Ceci reste du même ordre de grandeur que l'énergie moyenne horaire de toute sorte consommée par les humains (eau, charbon, pétrole, gaz naturel, etc...). Cette immense palpitation qui frappa d'effroi les guerriers d'Alexandre aux bouches de l'Indus est faite à bien peu de frais, et l'on étonnerait le navigateur en lui affirmant que cette puissance n'est pas supérieure à celle mise en jeu par l'homme dans les machines inventées par lui.

Ces calculs d'énergie dissipée donnent sans doute, malgré leurs imperfections, une idée assez juste du bilan mondial, car le chiffre trouvé explique bien la contradiction entre la théorie et l'observation pour l'accélération séculaire du moyen mouvement de la Lune. Le contre-coup sur la Lune de la variation séculaire

de l'excentricité de l'orbite terrestre produite par les perturbations séculaires explique  $7''$ , 1 d'arc, l'observation donne  $11''$ ,9. (Laplace dans une première théorie du contre-coup avait trouvé  $12''$  mais sa théorie comportait un facteur 2 erroné, ce que ses successeurs découvrirent avec regret, posant ainsi le problème de l'écart). Cette différence de  $4''$ ,8 par siècle donne  $32'$  d'arc au bout de 20 siècles, c'est-à-dire une erreur égale au diamètre même de la Lune, ce dont on est sûr par les observations d'éclipses des Chaldéens et des Arabes. L'analyse détaillée du problème s'énonce par l'équation suivante :

$$11''{,}9 = 7''{,}1 + 8''{,}4 + 0''{,}7 - 4''{,}3$$

Les termes  $8''$ ,4 et  $0''$ ,7 sont dus au ralentissement de la rotation terrestre par le frottement des bourrelets de marée provoquée par la Lune et le Soleil, le terme négatif  $- 4''$ ,3 au ralentissement du mouvement de la Lune provoqué par l'attraction du bourrelet de marée. La décélération de la Terre est donc de  $9''$ ,1 d'arc par siècle soit un jour entier après 7.200 ans. La puissance libérée par ce ralentissement de la rotation de la Terre est de 1,5 milliard de kilowatts. On retrouve bien l'ordre de grandeur précédent. Notre problème d'utilisation de l'énergie des marées s'est trouvé pour un instant lié aux observations des astronomes chaldéens, magie de l'intelligence humaine.

Ce serait une erreur d'estimer que ce chiffre d'un milliard de kilowatts est la limite supérieure de ce que les hommes peuvent tirer de l'énergie des marées. Le problème est plus complexe, car la transformation d'énergie pourrait provoquer un ralentissement supplémentaire de la Terre, un milliard de kilowatts supplémentaires étant libérés si l'on accepte de perdre un jour après 2.000 ans,

Nous ne pouvons donc nous appuyer sur l'énergie dissipée ; mais si nous acceptons l'idée de modifier le régime même des marées, en étudiant les variations de l'énergie accumulée dans une aire, nous saurons imaginer un cycle permettant de prélever une quantité considérable d'énergie par des manœuvres

TABLEAU VIII  
CLASSEMENT DES 256 CYCLES POSSIBLES EN SERIES

	Pompage	Cycles positifs 104 en 29 séries	Cycles non positifs 152 en 41 séries
Pas de turbinage	0 1 2 2 3 4		0 (cycle nul) a, b, c, d ab, bc, cd, ad ac, bd abc, bcd, acd, abd abcd
Simple effet unique	0 1 1* 2* 2 2 2 2 3 3 3 3 4	1, 2, 3, 4 a1, b2, c3, d4 1c, 2d, a3, b4 alc, b2d, ac3, bd4 » » » » » » » » » »	1b, 2c, 3d, a4 1d, a2, b3, c4 alb, b2c, c3d, ad4 ald, ab2, bc3, cd4 lbc, 2cd, a3d, ab4 lbd, a2c, b3d, ac4 lcd, a2d, ab3, bc4 albc, b2cd, ac3d, abd4 lbcd, a2cd, ab3d, abc4 albd, ab2c, bc3d, acd4 alcd, ab2d, abc3, bcd4 albcd, ab2cd, abc3d, abcd4
Simple effet répété	0 1 2 2 3 3 4	13, 24 a13, 1c3, b24, 2d4 alc3, b2d4 » » » » »	1b3, 2c4, 13d, a14 1b3d, a2c4 alb3, b2c4, 1c3d, a2d4 a13d, ab24, 1bc3, 2cd4 albc3, b2cd4, alc3d, ab2d4 alb3d, ab2c4, 1bc3d, a2cd4 albc3d, ab2cd4
Double effet unique	0 1 1 1* 2 2* 2* 3* 3 3 4	12, 23, 34, 14 a12, b23, c34, 1d4 1b2, 2c3, 3d4, a14 12c, 23d, a34, 1b4 alb2, b2c3, c3d4, ald4 al2c, b23d, ac34, lbd4 1b2c, 2c3d, a3d4, alb4 alb2c, b2c3d, ac3d4, albd4 » » »	12d, a23, b34, 1c4  1b2d, a2c3, b3d4, alc4 12cd, a23d, ab34, 1bc4 a12d, ab23, bc34, 1cd4 1b2cd, a2c3d, ab3d4, alb2c4 alb2d, ab2c3, bc3d4, alc4d a12cd, ab23d, abc34, 1bcd4 alb2cd, ab2c3d, abc3d4, albcd4

Sesqui- effet	0	123, 234, 134, 124	
	1	a123, b234, 1c34, 12d4	123d, a234, 1b34, 12c4
	1	1b23, 2c34, 13d4, a124	
	1	12c3, 23d4, a134, 1b24	
	2	a1b23, b2c34, 1c3d4, a12d4	1b23d, a2c34, 1b3d4, a12c4
	2	a12c3, b23d4, a1c34, 1b2d4	12c3d, a23d4, a1b34, 1b2c4
	2	1b2c3, 2c3d4, a13d4, a1b24	a123d, ab234, 1bc34, 12cd4
	3	a1b2c3, b2c3d4, a1c3d4, a1b2d4	1b2c3d, a2c3d4, a1b3d4, a1b2c4
	3		a1b23d, ab2c34, 1bc3d4, a12cd4
	3		a12c3d, ab23d4, a1bc34, 1b2cd4
4		a1b2c3d, ab2c3d4, a1bc3d4, a1b2cd4	
Double effet répété	0	1, 2, 3, 4	
	1	a1234, 1b234, 12c34, 123d4	
	2	a1b234, 1b2c34, 12c3d4, a123d4	
	2	a12c34, 1b23c4	
	3	a1b2c34, 1b2c3d4, a12c3d4, a1b23d4	
	4	a1b2c3d4	

RESUME :	Séries à un cycle	2	2
	Séries à deux cycles	3	3
	Séries à quatre cycles	24	36
		—	—
		29	41

NOTA BENE. — 1) Dans une série les divers cycles se déduisent les uns des autres par *transposition* suivant les deux lois

$$a b c d a \text{ et } 1 2 3 4 1$$

2) Par contre, les cycles déduits les uns des autres par *permutation* circulaire sont identiques  
 $a1b2c = 1b2ca = b2ca1 = 2ca1b = ca1b2$

Nombre de Pompages	SIMPLE EFFET UNIQUE	Repère	Nombre de Pompages	SIMPLE EFFET RÉPÉTÉ	Repère
0		1	0		13
		2			24
		3			a13
		4			1c3
1 1 <sup>ère</sup> série		a1	1		b24
		b2			2d4
		c3			a1c3
		d4			b2d4
1 2 <sup>ème</sup> série		1c	2		
		2d			
		a3			
		b4			
2		a1c	2		
		ac3			
		b2d			
		bd4			

DU DEUXIEME ORDRE

Nombre de Pompages	DOUBLE EFFET UNIQUE	Repère	Nombre de Pompages	DOUBLE EFFET UNIQUE	Repère
0		12	2 1 <sup>ère</sup> série		a1b2
		23			b2c3
		34			c3d4
		14			a1d4
1 1 <sup>ère</sup> série		a12	2 2 <sup>ème</sup> série		a12c
		b23			ac34
		c34			b23d
		1d4			1bd4
1 2 <sup>ème</sup> série		1b2	2 3 <sup>ème</sup> série		1b2c
		2c3			2c3d
		3d4			a3d4
		a14			a1b4
1 3 <sup>ème</sup> série		12c	3		a1b2c
		23d			b2c3d
		a34			ac3d4
		1b4			a1bd4

PLANCHE 2

Nombre de Pompages	SESQUI EFFET	Repère	Nombre de Pompages	SESQUI
0		1 2 3	2 1 <sup>ère</sup> série	
		2 3 4		
		1 3 4		
		1 2 4		
1 1 <sup>ère</sup> série		a 1 2 3	2 2 <sup>ème</sup> série	
		b 2 3 4		
		1 c 3 4		
		1 2 d 4		
1 2 <sup>ème</sup> série		1 b 2 3	2 3 <sup>ème</sup> série	
		2 c 3 4		
		1 3 d 4		
		a 1 2 4		
1 3 <sup>ème</sup> série		1 2 c 3	3	
		2 3 d 4		
		a 1 3 4		
		1 b 2 4		

CYCLES POSITIFS

DU DEUXIEME ORDRE

FET	Repère	Nombre de Pompages	DOUBLE EFFET RÉPÉTÉ	Repère
	a1b23	0		1234
	b2c34			a1234
	1c3d4	1		1b234
	a12d4			12c34
	a12c3			123d4
	b23d4			a1b234
	a1c34	2 1 <sup>ère</sup> série		1b2c34
	1b2d4			12c3d4
	1b2c3			a123d4
	2c3d4	2 2 <sup>ème</sup> série		a12c34
	a13d4			1b23d4
	a1b24	3		a1b2c34
	a1b2c3			1b2c3d4
	b2c3d4			a12c3d4
	a1c3d4			a1b23d4
	a1b2d4	4		a1b2c3d4

convenables de vannes et de turbines. L'énergie entrante ne sera plus restituée en grande partie comme maintenant aux zones adjacentes.

Des études difficiles sont en cours ; elles se déroulent de façon satisfaisante, mais il est trop tôt pour en rendre compte ici. Il nous suffira de dire que le décalage dans le temps entre étales de courant et étales de niveau sera fortement modifié et non l'amplitude des variations ni les valeurs extrêmes des hauteurs d'eau et des courants.

\*

\*\*

En conclusion, pour reprendre les termes d'un rapport officiel à la Commission des Investissements, l'énergie des marées permet, grâce à ses qualités exceptionnelles de souplesse, de créer des usines de haute rentabilité. La France, qui possède probablement les plus beaux emplacements du monde, pourra, si cela s'avère utile ou nécessaire, construire, en deux usines, de quoi quadrupler la production totale actuelle d'énergie électrique. Dès aujourd'hui la mise en route des chantiers de la Rance, décidée à la suite de recherches dont nous avons rendu ici un compte rapide, va ouvrir la voie à une forme nouvelle d'énergie promise au plus brillant avenir.