

L'ENERGIE DES MAREES

L'INSTALLATION DE LA RANCE PREMIÈRE RÉALISATION MONDIALE DE L'ESPÈCE

Damos aos nossos leitores, devidamente autorizados pelo conferente e pela «Société des Ingénieurs Civils de France», um extracto do trabalho apresentado pelo Engenheiro ROBERT GIBRAT sobre a instalação de aproveitamento da energia das marés do Rance, na Bretanha, em França, que reputamos de grande interesse técnico. A Conferência foi feita em 28 de Fevereiro de 1962, perante grande assistência de membros da «Société Royale Belge des Ingénieurs et des Industriels», da Secção da Bélgica da «Société des Ingénieurs Civils de France», da «Société Royale Belge des Electriciens» e do «Cercle Technique de la Chaleur». O conferente, cujo nome e valor profissional todos conhecem, é professor de Electricidade Industrial na «Ecole Nationale Supérieure des Mines» de Paris, engenheiro-consultor da ELECTRICITE DE FRANCE, e director-geral da INDATOM, sendo desde 1942 o animador e coordenador do projecto do aproveitamento do Rance.

Gostaríamos de publicar na íntegra o seu trabalho, mas a falta de espaço obriga-nos a cortar um dos seus capítulos, pedindo desculpa ao autor e aos nossos leitores.

No projecto do Rance, cujos trabalhos foram iniciados em Janeiro de 1961, está prevista a instalação de 24 grupos duma potência unitária de 10 000 kW. Em 1967 a produção anual total disponível será de 544 milhões de quilowatts-hora. O centro nervoso desta central será o grupo motor turbina de 10 000 kW em forma de bolbo.

Um protótipo funcionando durante alguns meses em Saint-Malo*, após 9000 horas em imersão e 7000 horas em seco, e submetido a 931 arranques, provou bem a segurança de marcha do aparelho gerador, tendo-se afastado muito pouco das previsões dos engenheiros.

Na primavera de 1943 os laboratórios hidráulicos da SOGREAH, em Grenoble, estudaram, em modelo, as possibilidades oferecidas pela energia das marés.

Em 1951, a E. D. F. terminava os estudos do primeiro projecto da central maremotriz do Rance que consistia em fechar o estuário com uma barragem equipada com 26 grupos clássicos com eixo vertical de 8000 kW. Estas máquinas não estavam previstas para funcionar senão como turbina quando do esvaziamento da bacia ou como bomba.

O Serviço de Estudos das Centrais Maremotrizes da E. D. F. demonstrou então o interesse que apresentariam estas instalações se os grupos pudessem adaptar-se ao funcionamento em ciclos múltiplos, isto é, indiferentemente nos dois sentidos de passagem de água (fluxo e refluxo).

Os estudos empreendidos permitiram realizar esta condição.

Para obter a variedade de ciclos de exploração, que os seus serviços de estudos tinham conseguido estabelecer, a E. D. F. pediu aos principais construtores de máquinas que estudassem o grupo ideal que pudesse servir para o equipamento das centrais maremotrizes. Naturalmente os grupos clássicos de baixa queda, movidos por turbinas

Kaplan de eixo vertical, com espirais envolventes e aspiradores em coto-velo escolhidos quando do estabelecimento do projecto do Rance em 1951 não podiam servir para tal diversidade de funcionamento.

A situação no caso do Rance é muito diferente dos outros problemas de baixas quedas; em primeiro lugar, em consequência da enormidade dos volumes de água a turbinar, e, em segundo lugar, porque não se poderia comparar uma barragem fluvial, onde o nível de água se encontra sempre do mesmo lado, com uma barragem de central de marés em que a água pode estar no seu mais alto nível tanto dum lado como do outro.

A técnica das turbinas Kaplan de eixo horizontal, aperfeiçoada desde 1924 pelo engenheiro alemão Harza, foi aplicada a fracas potências na Alemanha em 1942, permitindo a turbinagem nos dois sentidos, e, por consequência, aumentando a duração diária de produção de corrente.

É um facto conhecido que, para uma dada potência, os valores relativos do caudal e da altura de queda têm uma influência primordial sobre o custo duma instalação hidroeléctrica. Em especial o preço de custo do quilowatt-hora anual atinge o seu nível mais elevado para as baixas quedas.

Para baixar o limiar da rendabilidade destas instalações, domínio das turbinas Kaplan e Hélices, foi necessário apelar para técnicas novas que permitem realizar economias maciças nos preços das obras de construção civil e do material electromecânico: entre estas técnicas a solução axial representa a que se achou como mais interessante.

A conduta hidráulica é muito simples em relação à das turbinas Kaplan e Hélices clássicos que necessitam de obras volumosas e caras; as turbinas têm dimensões mais reduzidas, graças ao escoamento axial da água motriz e a alimentação cónica da roda.

Imaginados em 1920, os grupos bolbo não tiveram o seu verdadeiro desenvolvimento senão nos últimos anos, graças ao impulso dado aos estudos das turbinas axiais pelo projecto da central maremotriz do Rance. Os progressos realizados levaram à concepção dos bolbos de grande potência.

Em 1952, a ELECTRICITE DE FRANCE decidiu aplicar os grupos bolbo à central de marés que projectava construir na foz do rio Rance, local particularmente favorável, onde se vinha pensando desde há muito fazer a instalação de uma central do género. É com efeito esse um dos sítios do mundo onde, por força de condições geográficas excepcionais, a amplitude das marés é maior. O sítio onde se sabe que a amplitude das marés é maior, é na baía de Fundy (Canadá), em que atinge 15,50 m.

(*) Este grupo foi instalado numa doca seca abandonada de Saint-Malo entre o anteporto aberto sobre o mar e sujeito às marés e as bacias de marés cujo nível se manteve entre 10,50 m e 12,50 m, podendo este nível ser excepcionalmente abaixado para 8 m.

O grupo tinha sido disposto com a ogiva do lado do mar e a roda da turbina do lado da bacia (contrariamente à disposição do Rance, a turbinagem directa tinha lugar quando do enchimento da bacia; a turbinagem inversa ao despejar). O protótipo de Saint-Malo desenvolvia uma potência de 12 200 Cv para uma queda de 5,50 m a 88 rot/min e com um caudal de 227 m³/s. A roda da máquina, constituída por um hélice de pás móveis e de eixo horizontal, tinha 5,8 m de diâmetro e pesava 4 t.

Um projecto feito em 1945 para ali se construir uma central de marés, funcionando com duas bacias conjugadas, não teve seguimento.

A U.R.S.S., que desde há muito tem estado a estudar as possibilidades de exploração industrial da energia das marés, seguiu com a maior atenção, in loco, os trabalhos feitos pela E.D.F. no Rance. Chegou o momento dos ensaios não só dos locais onde as marés são mais favoráveis como também das máquinas capazes de explorar a sua energia. Neste sentido, foi feita a encomenda à «Neyrpic» de Grenoble de um grupo bolbo maremotor experimental, que consta de uma turbina de eixo horizontal de 400 kW de potência para uma queda de 1,28 m a 72 rot/min; o diâmetro da roda é 3,30 m, com a sua regulação e um conjunto de aparelhos de medições hidráulicas. O alternador síncrono de 415 kVA/380 V será fornecido pela Alsthom.

O estuário do Rance, rio costeiro que se lança na Mancha perto de Saint-Malo, apresenta disposições particularmente favoráveis para a instalação de uma central de marés. O seu comprimento, desde a foz em Dinard, é de 20 km e a sua largura atinge frequentemente 2 km, constituindo, portanto, um reservatório natural de muito grande capacidade. Por razões de melhor rendabilidade, o projecto inicial, que fora elaborado numa época em que se receava a penúria de energia, foi reduzido. No actual projecto, chamado petite RANCE, como já vimos, vão ser instalados apenas 24 grupos bolbo; a produção, que devia atingir $800 \cdot 10^6$ kWh por ano, será apenas de cerca de $550 \cdot 10^6$ kWh (perto de 3% da produção francesa de electricidade) mas o custo do conjunto das obras $37 \cdot 10^9$ N. F. em vez de $600 \cdot 10^6$ em que se tinha estimado o primitivo projecto do grande RANCE.

O mês de Agosto de 1965 marcará uma data importante na história da hidráulica e da produção de electricidade. Nessa data com efeito devem começar a girar as primeiras turbinas da Central do Rance.

Fazendo o estudo desde o modelo no laboratório, à experimentação em Saint-Malo, os técnicos franceses ganharam a batalha da hulha verde. A central maremotriz do Rance é uma vitória preparada durante 18 anos de permanente estudo e aturada observação.

O interesse das maremotrizes para a França é imenso. Além do Rance, os projectos de Chausey e dos Minquiers representam cada um, aproximadamente 10 000 MW. Num mundo que talvez seja dominado por uma fonte de energia, a energia nuclear idêntica a si própria todos os dias, a todas as horas, e em todos os lugares da terra, e onde, no entanto, o consumo continuará regulado pela submissão dos homens ao sol e às estações, a sorte da França estará, sem dúvida, em poder casar átomo e maré, unindo assim a força infatigável e o receio do repouso de um com a variedade infinita das doze horas diárias de trabalho do outro.

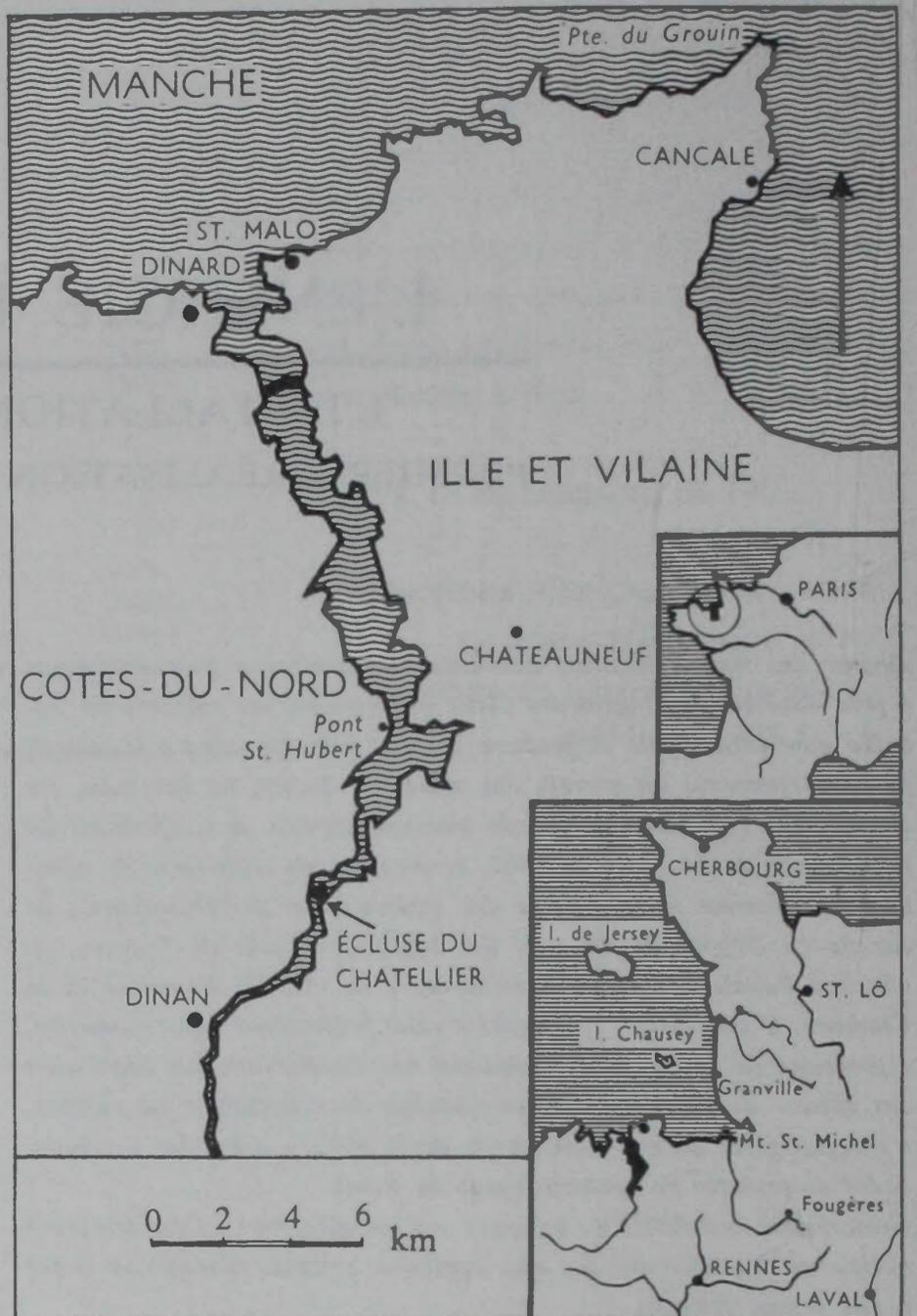
LES USINES MAREMOTRICES

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, après qu'une loi, votée le 8 août 1956 ait autorisé l'établissement d'un barrage au travers de l'estuaire de cette rivière.

1960 — Le 29 décembre, le Ministre de l'Industrie, par lettre adressée au Directeur Général de l'Electricité de France, l'autorisait à engager, en 1961, le programme d'aménagements hydro-électriques dont les travaux préparatoires avaient déjà été autorisés par une précédente lettre du 15 juillet 1960. Ce programme comprenait, entre autres, la Rance, première usine maremotrice du monde...

1961 — Le 10 janvier, les deux principaux marchés, toutes formalités remplies, étaient notifiés pour un total de 32 milliards d'anciens francs, soit plus des trois-quarts de la dépense totale: l'un à un grou-



L'usine maremotrice de la Rance — Situation

pement d'entreprises pour la réalisation du génie civil, y compris la fermeture de l'estuaire; l'autre à un groupement de constructeurs pour la construction, le montage et la mise en route de 24 groupes de 10 MW chacun.

Mai 1962 — La première enceinte rive gauche est fermée, mise à sec et les travaux de béton pour les vannes très avancés. Rive droite on a posé les premières pièces mécaniques de l'écluse. La construction de l'enceinte centrale s'amorce. Plus de 900 hommes sur le chantier. Cela se passe avec l'assentiment joyeux des populations locales et «Le Figaro» a déjà publié des annonces affirmant qu'un achat de terrains à Dinard est une affaire rare, «...la plus-value étant assurée par le barrage de la Rance».

Il existe plus de cent articles techniques ou économiques sur la Rance et sur l'énergie des marées; j'en ai, pour ma part, commis plus d'une trentaine⁽¹⁾. Le démarrage des travaux va en faire naître des nouveaux. Je consacre donc ces premières pages non à une description détaillée des recherches et des travaux, mais à un court historique de vingt années de patience, d'efforts et de difficultés. Nous verrons ensuite avec plus de précision deux chapitres particuliers dans l'ensemble

¹⁾ Voici une très courte bibliographie comportant les articles essentiels:

- L'énergie des marées, par M. R. GIBRAT — Bulletin de la Société Française des Electriciens, Mai 1953, p. 283 à 332.
- La joie de comprendre, par M. R. GIBRAT — Bulletin de la Société Française des Electriciens, Mars 1956.
- La station maremotrice expérimentale de Saint-Malo, par M. I. KAMMERLOCHER — Revue Générale de l'Electricité, Mai 60, p. 237 à 261.
- L'équipement hydro-électrique des basses chutes avec des groupes bulbes immergés, par M. F. AUROY et L. KAMMERLOCHER — La Technique Moderne, Juin et Septembre 61, p. 217 à 224 et 429 à 436.

du sujet, le premier sur la source de l'énergie des marées, car j'ai été amené à y réfléchir beaucoup à nouveau ces temps derniers et la question fait intervenir des notions générales que je crois intéressantes pour tous, le second sur l'équipement même de la Rance pouvant donner ainsi des indications précises sur la marche des travaux et leur état en avril 62.

L'histoire commence un peu comme dans les contes de Mère grand... Chargé en octobre 1940 de la Direction de l'Electricité au Ministère des Travaux Publics à Paris, j'avais l'habitude d'aller le dimanche matin à mon bureau pour parcourir les vieux dossiers classés. Donc, un dimanche d'octobre 1940, je lisais un rapport datant de l'année 1920. Mon esprit, pour toutes ces lectures du dimanche matin, était détendu, même assoupi. Le tragique qui nous environnait tous à cette époque s'était éloigné pour quelques heures grâce au calme apporté par la solitude et surtout par ce retour technique vers un passé attendrissant.

Il était évident, à la lecture du rapport, que les conditions économiques de cette époque, particulièrement l'absence d'interconnexions électriques sérieuses, avaient justifié, sans discussion possible, l'abandon et l'oubli de ce projet, comme lui, voisin, de l'Aber Wrac'h. Aussi ma conscience presque endormie s'appêtait à la satisfaction qu'apporte l'accord avec les conclusions d'une lecture.

Brusquement, j'eus une véritable illumination: il était évident que les études sur l'énergie des marées avaient toujours et partout été conduites en utilisant sans plus les connaissances classiques du génie hydraulique. J'avais intérieurement acquis la certitude qu'en reprenant tout à la base, théories, techniques et technologies, tout changerait et tout deviendrait très favorable. Il n'y avait pas un mot dans le rapport qui puisse expliquer cela, mais je me souviens que sous la violence du choc et avec de pénibles battements de coeur, je dus me lever, parcourir de long en large le grand bureau un peu obscur. Pendant plus d'une heure, je ne pus me calmer, revenant m'asseoir parfois pour jeter sur les papiers quelques notes, essayant de préciser et de comprendre cette certitude inattendue, repartant pour une longue marche. J'avais appris en un instant que pour toute ma vie j'étais condamné à être le défenseur de l'énergie des marées, que je ne pourrais jamais cesser d'y croire.

Je savais qu'il y avait là une forme d'énergie au moins égale aux autres. J'ignorais, par contre, que nous aurions besoin de vingt années pour comprendre ce qu'il fallait faire et pour le faire; je ne pressentais pas qu'au moins, à deux reprises, m'étant posé un problème fondamental, il me faudrait porter l'énoncé plusieurs années dans ma poche et le regarder des milliers de fois avant d'avoir l'inspiration me permettant de l'attaquer. Je ne savais surtout pas que le succès ne serait possible que grâce aux efforts d'une grande équipe, dotée de grands moyens, et rassemblant des esprits de toutes les familles intellectuelles. Comment s'est créée cette équipe: immédiatement, j'avais demandé aux sociétés intéressées par la production de l'énergie électrique (producteurs, S. N. C. F., houillères, électrochimistes) de constituer une société d'études; ce fut fait en 1941.

A la nationalisation, dès 1946, une deuxième phase de l'histoire commença. L'Electricité de France reprit les activités de la Société d'études dans un service aux mêmes initiales (S. E. U. M.). Les études de la première phase lui avaient en effet paru assez encourageantes pour qu'elle prenne la décision de les poursuivre. J'avais, début 1943, accepté de devenir l'animateur de la Société d'Etudes, je devins donc tout naturellement Ingénieur-Conseil d'E. d. F. pour les usines marémotrices, ce que je suis encore aujourd'hui.

Cette deuxième phase se termina en 1951, lorsque les études d'avant-projet parurent assez mûres et le succès suffisamment probable pour qu'une région d'équipement soit chargée des études de réalisation. Enfin, depuis le 1.^{er} janvier 1961, une quatrième phase est née avec le démarrage des travaux définitifs, une région d'équipement spéciale étant formée pour l'exécution des travaux.

J'ai parlé plus haut d'une équipe. En fait, il y en a quatre, attachées

chacune à un secteur différent. Ce fut pour moi, pendant vingt ans, une joie continuelle de les animer, de les coordonner, de les reconforter.

- a) La première née s'est occupée dès 1941 des problèmes mathématiques théoriques ou pratiques posés par la nature même de l'énergie des marées et particulièrement a mis au point les calculs d'énergie. Elle a complètement résolu toutes les questions concernant la Rance et ainsi créé une nouvelle science appliquée qui n'a rien emprunté à nos prédécesseurs en France ni aux étrangers qui ont rêvé ou rêvent encore des marémotrices. Il est exceptionnel de voir dans un domaine scientifique ou technique une équipe ne devant rien à personne, c'est exaltant, et l'absence de bibliographie est fort agréable. Tout son travail a pleinement confirmé mon pressentiment d'octobre 1940. Il reste beaucoup à faire à cette équipe car, pour l'utilisation de la baie de Chausey (10 000 MW par exemple) de nouveaux problèmes apparaissent: il faut alors définir la réaction du barrage sur les marées, étudier l'influence de prises d'énergie, etc. Or tout cela est encore obscur pour nous, ainsi l'influence de l'accélération de Coriolis reste toujours mystérieuse et les conclusions d'Henri Poincaré toujours douteuses.
- b) La deuxième équipe a en charge toutes les questions relevant des modèles réduits. Un énorme effort a été fait pendant vingt ans dans ce domaine à Grenoble, à Chatou, à Saint-Servan. Ici encore, nous sommes en possession de toute la technologie nécessaire pour la Rance, soit pour l'exécution des travaux, soit pour le dessin optimum des ouvrages, mais l'extension à la baie de Chausey pose encore bien des problèmes. Sa tâche est donc loin d'être terminée.
- c) La troisième équipe, en utilisant les études sur modèles réduits, a mis au point les solutions à apporter aux problèmes de génie civil. Le travail considérable fait en 1959 par la région d'équipement sur les dessins du barrage et, particulièrement, sur la voûte qu'il constitue a, en adaptant les projets initiaux de façon particulièrement heureuse aux problèmes hydrauliques, donné au projet sa pleine valeur.
- d) La quatrième équipe, chargée depuis 1951 des problèmes de construction du groupe turbo-alternateur, a connu un succès particulièrement éclatant en novembre 1959 lors de la mise en route d'un premier groupe en vraie grandeur dans l'écluse de Saint-Malo. Des études très complètes avaient en effet permis aux constructeurs de faire leurs classes par des groupes bulbes originaux (Cambeyrac, Argentat, puis Beaumont-Monteux). Des études de corrosion très précises et très variées permettaient de définir pendant ce temps les nuances des aciers à employer dans l'eau de mer et toutes les précautions à prendre en air marin. Un appel d'offres put donc être lancé en juillet 1955 pour un premier groupe. Des études de détail minutieuses suivies d'une construction très soignée trouvèrent leur récompense dans une mise en route impeccable. Les essais de rendement furent excellents et confirmèrent complètement tous les espoirs. L'exploitation du groupe, depuis ordre, plus de vingt-six mois, a fourni des renseignements de premier ordre, plus de vingt ans: une génération a été nécessaire pour comprendre, étudier, résoudre et convaincre. Ce n'est pas trop et il ne peut en être autrement pour toute oeuvre humaine vraiment nouvelle.

Voici donc maintenant l'usine en cours de construction. Depuis l'idée initiale du dimanche d'octobre 1940 à la lettre du Ministre de fin 1960, plus de vingt ans: une génération a été nécessaire pour comprendre, étudier, résoudre et convaincre. Ce n'est pas trop et il ne peut en être autrement pour toute oeuvre humaine vraiment nouvelle.

Tout un édifice a dû être construit depuis les fondations reprenant à leur départ les théories des marées jusqu'aux divers étages où s'étudiaient corrosion, propriétés mécaniques des turbines ou des vannes, propriétés électriques des alternateurs. Théoriciens et ingénieurs ont été constamment mêlés, chaque pierre devant trouver sa place. Aucune

idée n'a été rejetée à priori, les choix ont été faits quand il le fallait, l'expérimentation a été utilisée sans pitié à toutes les échelles de grandeur. Une volonté née de la certitude irraisonnée d'avoir raison ne s'est pas démentie tant que tous n'ont pas été convaincus. Comme dans une fugue, technique et économique ont déroulé sujets et contre sujets, réponses et coda.

Après cette revue rapide, nous allons maintenant comme nous l'avons dit traiter en détail d'une part de la source de cette énergie (2) si particulière, d'autre part de la réalisation même de l'usine. Dans le court espace qui nous est offert, j'ai préféré agir ainsi plutôt que reprendre tous les problèmes en me cantonnant par force dans de vagues généralités. Un gros livre qui reste à écrire serait nécessaire pour exposer même seulement l'essentiel des travaux effectués.

Por falta de espaço, somos constringidos a não apresentar aos nossos leitores a parte da magistral lição do Engenheiro R. GIBRAT — Source de l'énergie des marées — *passando por isso imediatamente à última parte.*

B — L'USINE MAREMOTRICE DE LA RANCE

LES MAREES LOCALES

Amplitudes

Les côtes françaises bretonnes de la Manche sont une des régions du Globe où les marées sont les plus fortes. Ceci s'explique en particulier par l'obstacle apporté par la presqu'île du Cotentin à l'onde de marée venant de l'Atlantique.

Dans l'estuaire de la Rance, la différence de niveau entre une pleine mer (marée haute) et une basse mer (marée basse) consécutives peut atteindre 13,50 m.

Les marées sont du type semi-diurne. Il y a deux pleines mers et deux basses mers en 24 h. 50 mn.

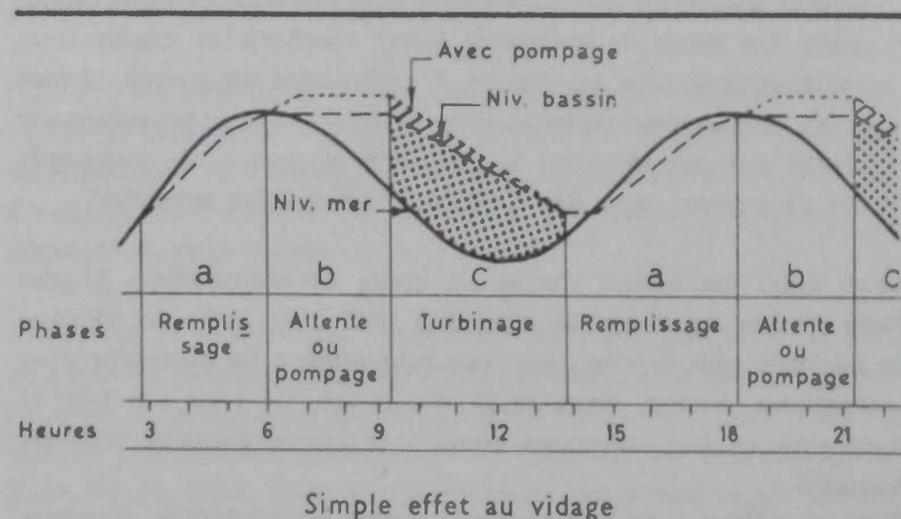
En marée de vive eau d'équinoxe, le débit maximum qui passe dans la Rance atteint tant au flot qu'au jusant, 18 000 m³/s, soit trois fois environ le débit du Rhône en crue à Avignon.

L'UTILISATION DE L'ENERGIE

Cette utilisation dans l'usine la plus simple, conduit à réaliser des remplissages et des vidages successifs d'un bassin (estuaire) avec des turbines et des vannes.

Simple effet au vidage

A marée montante, on remplit le bassin par les vannes.



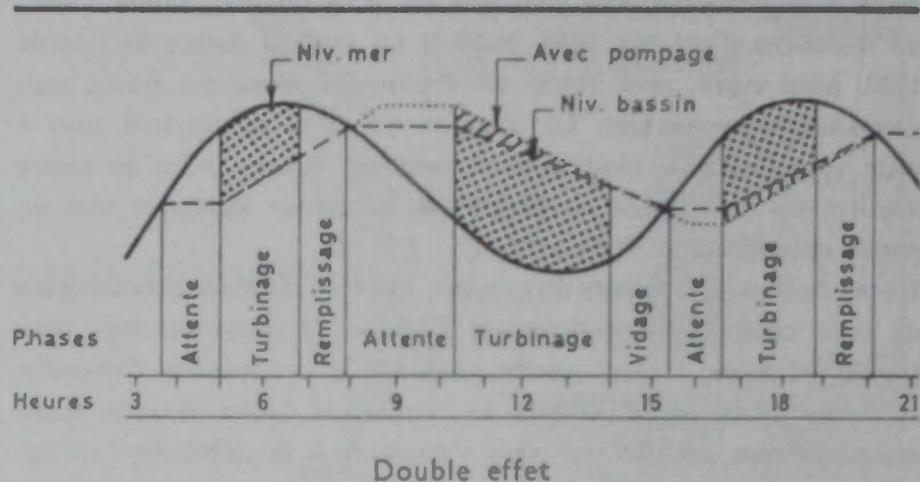
A la pleine mer, on ferme les vannes et on attend pour vider le bassin par les turbines, que la mer en se retirant ait créé une hauteur de chute suffisante.

C'est l'exploitation la plus simple qui était réalisée autrefois dans les moulins à marée.

Ce cycle peut être amélioré en utilisant l'énergie disponible sur le réseau aux heures creuses pour pomper l'eau de la mer afin de surélever le niveau du bassin et d'augmenter le volume turbinable.

Simple effet au remplissage

Dans ce cas, l'énergie est produite par remplissage du bassin en turbinant à marée montante de la mer vers le bassin.

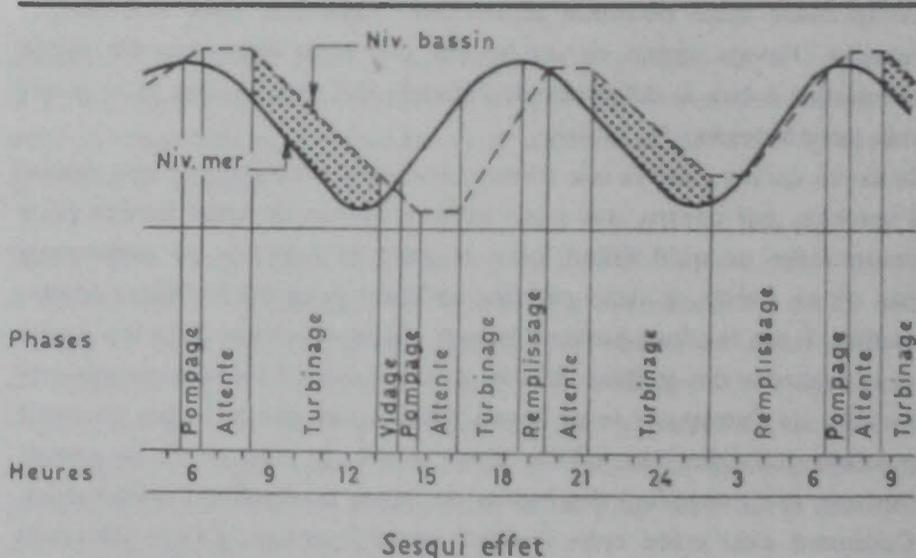


Double effet

C'est la combinaison des deux cycles précédents. L'énergie est produite à la fois lors du remplissage et lors du vidage du bassin.

Sesqui effet

Ce cycle consiste à utiliser deux marées successives de «vive eau» pour réaliser trois turbinages (d'où le nom de sesqui effet ou effet 3/2), avec deux pompages intermédiaires permettant d'améliorer les



turbinages postérieurs.

Parmi les nombreux cycles que l'exploitant aura à sa disposition, le choix devra se porter sur celui qui convient le mieux, selon l'amplitude de la marée et la valeur de l'énergie aux diverses heures de la journée. Pour un prix constant de l'énergie, la recherche du meilleur cycle donnerait :

- pour les faibles marées: simple effet répété avec pompage,
- pour les marées moyennes: double effet répété avec pompage,
- pour les fortes marées: sesqui effet avec pompage,
- pour les marées exceptionnelles: double effet sans pompage.

Grâce au fonctionnement à *double effet* et au *pompage*, on peut donc obtenir une exploitation «sur mesure», fonction de l'heure et de l'amplitude de la marée. De cette façon, on tend à abandonner le rythme lunaire des marées pour se rapprocher du rythme solaire qui est celui des activités humaines.

La théorie des cycles, telle que nous la connaissions au début des travaux, soit en janvier 1961, nous assurait déjà, à 2% près, de tirer le maximum de la Rance. Mais l'effort pour rattraper les deux derniers points vaut la peine d'être tenté, car cela représente pratiquement 2% du coût d'investissement, les dépenses d'exploitation restant les mêmes.

Une petite équipe est donc restée en alerte sur les perfectionnements à apporter au calcul des cycles.

Il y a un barrage avec, d'un côté, la mer, et de l'autre, le bassin.

Nous appelons $S(z)$ la surface du bassin à la cote z .

Le débit total Q du bassin vers la mer est: $Q = S(z) dz/dt$.

Nous faisons passer l'eau à travers n turbines, d'où n fois la puissance d'une turbine: (H) étant la hauteur de chute et q le débit par turbine: $P = nH(q, H)$. On démontre aisément que les n turbines doivent marcher à même débit q . S'il y a des vannes qui assurent un débit V , le débit total sera la somme des n débits de turbines et du débit des vannes soit: $Q = nq + V$.

Le problème de base est de rendre maximale l'énergie produite entre deux instants de fonctionnement.

$$E = \int_A^B nN(q, H) dt$$

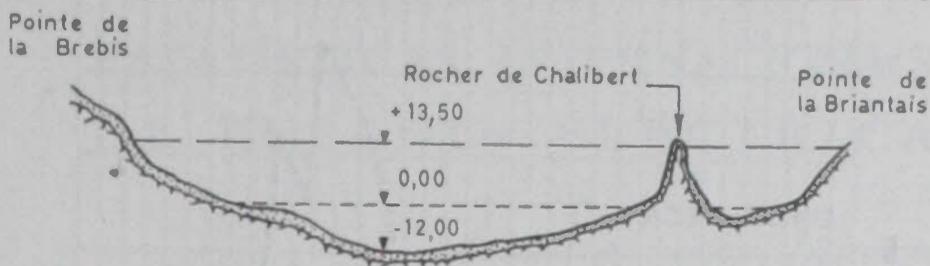
En d'autres termes, quelle politique suivre pour vider l'eau du bassin dans la mer: faire varier $z(t)$. Je connais depuis 1942 la solution déduite du calcul des variations:

$$n \frac{\delta N}{\delta H} + S \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta N}{\delta q} \right) = 0$$

Un premier problème, plus difficile d'ailleurs, est de tenir compte du fait que nous n'avons pas une puissance infinie, car elle est limitée par celle que les constructeurs acceptent pour l'alternateur. Il faut faire appel à un degré plus élevé de mathématiques, mais la solution a aussi près de vingt années.

Un second problème est de tenir compte du fait que l'énergie n'a pas une valeur constante. Ce n'est donc pas l'énergie qu'il convient de rendre maximale. Il faut introduire un prix, ce prix pouvant varier avec le temps — (l'énergie de jour n'ayant pas la même valeur que l'énergie de nuit) — et pouvant varier avec la puissance. Une première tranche de puissance vient remplacer une énergie coûteuse: le prix peut donc dépendre à la fois de N et de t .

Cette précision n'est pas réellement une difficulté supplémentaire. Au contraire même, elle supprime certaines difficultés d'unicité de solution. C'est la première fois que je rencontrais cela; ensuite j'ai vu depuis que c'était fréquent. Je m'explique: souvent, quand on prend, à la suite du premier problème, un autre plus complexe par le fait qu'un certain terme cesse d'être constant, des difficultés d'unicité disparaissent. C'est le cas de l'introduction du prix variable:



Profil du terrain dans l'axe de l'ouvrage

on cesse de rester dans un cas d'exception du calcul des variations et on retombe alors dans la normale.

Notre théorie se complique ensuite par le fait que nous ne faisons pas que turbiner dans un sens défini. À côté du fonctionnement en turbine directe, on a le fonctionnement en turbine inversée, puis en pompe directe et enfin en pompe inversée. On a chaque fois deux sens possibles de solution, donc huit possibilités de rotation, auxquelles il faut ajouter le fait d'utiliser les machines comme vannes, en orifice direct et en orifice inversé, au total dix.

Les rapports entre les diverses extrémales correspondant à chaque fonctionnement sont délicats. Ici, interviennent les travaux de classements des cycles. La classification des cycles a été très amusante à faire pendant des vacances en Bavière.

J'ai pu, alors, il y a 5 ou 6 ans, diviser par trois ou quatre, ou peut-être par dix, le nombre de cycles utiles à partir de celui des cycles possibles. Au lieu d'avoir un nombre de cycles par quinzaine à 36 zéros, par exemple, j'ai gagné un zéro, mais il en reste 35.

La tâche que nous nous sommes donnée dans l'équipe a été d'une part, d'essayer de lever les difficultés restant dans la théorie (obscurités qui nous ne gênaient pas tant quand nous nous contentions d'être à 2% près), et d'autre part, d'essayer de gagner encore quelques zéros dans le nombre des cycles intéressants. Des résultats très intéressants ont été apportés dans ce domaine. Il ne peut malheureusement pas être question de les exposer ici.

SITE DE L'AMENAGEMENT

L'usine marémotrice de la Rance est implantée entre la pointe de la Briantais, rive droite, et la pointe de la Brebis, rive gauche; la largeur de la Rance à cet endroit est de 750 m environ.

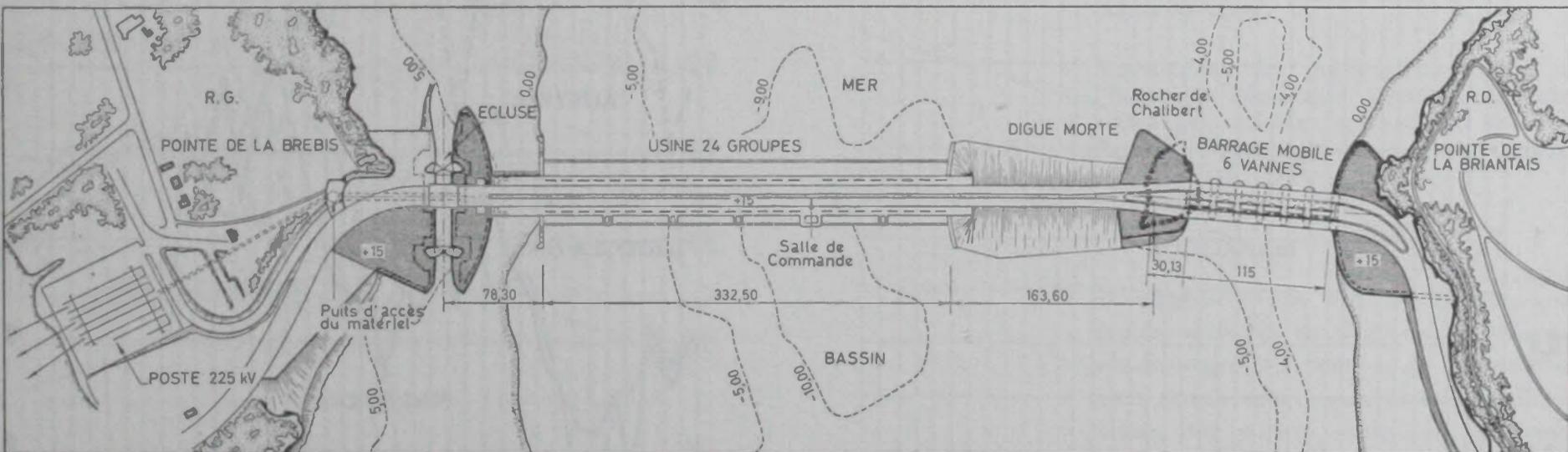
Le tracé passe par l'îlot de Chalibert.

Les sondages ont montré que le lit était constitué par une roche granitique, recouverte par endroits de sable et de galets.

Les fonds les plus profonds sont à 12 mètres au-dessous du zéro des cartes maritimes.

La retenue s'étend jusqu'à l'écluse du Chatellier, près de Dinan, sur une vingtaine de kilomètres.

Superficie du bassin (à + 13,50 C.M.)	22 km ²
Volume utile du bassin	184 000 000 m ³
	(entre 0,00 et + 13,50 C.M.)



Plan d'ensemble de l'aménagement

(conclui na pág. 48)