Énergie mécanique de la marée : Utilisation

Harnessing the mechanical energy of the tides

PAR

A. DE ROUVILLE

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES E. R.

SOMMAIRE

A) Préambule.

B) Analyse des rapports particuliers :

L'énergie des marées en Grande-Bretagne, par MM. G. F. Kennedy et H. Headland.

Rapport néerlandais, par M. de Vos.

Exemples d'application en projet :

« Projet de la Rance ».

« Projet des Iles Chausey ».

Les calculs de la production d'une usine marémotrice, par MM. Voyer et Péné.

Cycles d'utilisation de l'énergie marémotrice, par M. Gibrat.

L'exploitation d'une usine marémotrice en régime d'économie de charbon, par M. Gibrat.

Evolution constructive des groupes de l'usine de la Rance, par MM. Kammerlocher et Duclos.

La turbine à admission constante et vitesse variable, par M. Schwob.

Sur la possibilité d'utiliser l'énergie des courants marins au moyen de machines analogues aux aérogénérateurs, par MM. Remenieras et Smaghe.

C) Essai de synthèse et réflexions.

SUMMARY

A. — INTRODUCTORY REMARKS.

B. — ANALYSIS OF INDIVIDUAL REPORTS.

"Tidal energy in Great Britain," by G. F. KENNEDY and H. HEADLAND.

A Dutch report, by M. DE VOS.

Examples of projects being put into practice:

"La Rance" project.

"Iles Chausey" project.

"Calculating tidal power station output," by Messrs. VOYER and PENE.

"Utilisation cycles for tidal energy," by M. GIBRAT.

"Running a tidal power station as part of a coal-saving plan," by M. GIBRAT.

"Progress in the construction of the La Rance power station units," by Messrs. KAMMERLOCHER and DUCLOS.

"Constant-intake variable-speed turbines," by M. SCHWOB.

"The possibility of utilising the energy of sea currents by means of machines similar to air-driven generator," by Messrs. REMENIERAS and SMAGHE.

C. — ATTEMPTED SYNTHESIS AND COMMENTS.

A. — PRÉAMBULE

Puisque la S.H.F. a mis cette année à l'honneur le sujet de l'énergie de la mer et le présente d'une manière très solennelle, puisqu'elle a bien voulu se souvenir, me chargeant de ce rapport général, que, par un concours de circonstances assez fortuit, nous avons suivi — je ne dis pas dirigé, ni dominé — cette affaire depuis son origine, au lendemain de la première

guerre mondiale, je ne peux m'empêcher de rappeler en quelques mots et la genèse et l'évolution psychologique de la question depuis trente-cinq ans.

Je dis trente-cinq ans, mais il faudrait remonter au XVIII^e siècle pour rappeler, avec le nom de BÉLIDOR, que l'idée flottait depuis bien longtemps dans l'eau, et je ne l'y remonterai pas.

Mais j'adresserai un léger reproche aux historiens contemporains de la Houille Bleue; ils ont régulièrement oublié un projet que j'ai eu à instruire en ce siècle, en 1918, concernant l'accolement de bassins le long de la côte droite de Barneville, au sud de Carteret. M. l'Inspecteur général Widmer s'était dérangé pour cette nouveauté, et l'on en retrouverait un dossier dans les archives du Ministère des Travaux publics.

Je dois cependant, pour ne parler que des disparus, associer deux grands noms à ces souvenirs un peu personnels :

— Celui du ministre LE TROCQUER, qui a tenu le portefeuille des Travaux publics durant quatre ans, un record de nos républiques, et qui a réellement voulu que la question prenne corps (il en téléphonait plusieurs fois par jour au Directeur des Forces hydrauliques de l'époque);

Celui de l'inspecteur général DE LA BROSSE, premier président du Comité de la Houille Bleue, avant deux amiraux qui s'y intéressèrent très intelligemment.

M. DE LA BROSSE envisageait déjà un modèle réduit de la station marémotrice. Sans doute ne parlait-il que d'y sacrifier 500.000 francs (17 millions d'aujourd'hui) qui devront se faire multiplier encore une fois par 500 pour s'approcher de l'échelle des nécessités révélées par des études plus approfondies.

Nous avons fait l'inventaire des ressources de nos côtes, sans oser affronter l'ordre de grandeur où nous a portés M. CAQUOT.

Nous avons constaté la difficulté de trouver beaucoup de havres favorables par le régime géologique, hydrographique de leurs abords et de leur passe, pour une station d'essai à un ou deux groupes turbo-alternateurs.

Nous avons confié à un bureau d'études privé le soin de concevoir, mettre au point et sans doute réaliser une petite station marémotrice qui, après bien des avatars techniques, financiers, administratifs et parlementaires, a été presque sur le point d'aboutir; mais elle n'a pas dépassé le stade d'un hangar et d'un chemin d'accès. Est-ce un bien, si l'on en juge par l'échelle à envisager aujourd'hui? est-ce un mal? car cela aurait tout de même donné quelques indications.

Déjà ces balbutiements nous avaient fait percevoir :

— le développement et la nécessité de diagrammes et calculs directs, tant la schématisation hâtive des cycles et des courbes moyennes de marée conduisait à de grossières erreurs;

d'autre part :

— la concentration de compétences nécessaires pour aborder sainement de telles études.

Déjà l'on parlait pour la Rance, apparaissant

alors comme le summum de l'équipement à concevoir, d'un prix de 0,50 F (ou 20 F maintenant) le kWh an, et de 0,05 F ou 2 F le kWh brut.

Je n'ai pas l'impression qu'on se fût trop mépris sur les ordres de grandeur.

Déjà quelques constructeurs de pompes et turbines avaient été alertés (jusqu'en Suisse) et s'étaient penchés sur les problèmes particuliers qui les intéressaient.

Vous dire le nombre d'inventeurs déchaînés par les appels et la propagande de la presse qui ont défilé devant la Commission et encore plus devant notre premier crible, ce serait évoquer assez vainement une époque qui paraît aujourd'hui plus puérile que légendaire.

Nombre d'entre eux, surtout pour les systèmes d'utilisation des vagues, étaient obligés, sans s'en rendre compte, de commettre une pétition de principes basée sur une forme plus ou moins habilement dissimulée du mouvement perpétuel. Et nous avons dû faire appel à un dévoué ingénieur de la Marine, corps auquel je reconnais notamment avec respect un sens profond de la saine mécanique, pour dépister le point où s'introduisait ce classique pont aux ânes, tel un neurologue pour le point de folie des aliénés imperceptibles.

Par contre, on était plus embarrassé qu'aujourd'hui à l'idée de jeter de grosses quantités d'énergie en quelques heures dans un réseau qui, surtout en Bretagne, n'avait pas une grosse capacité. Et l'on parlait alors du charbon anglais qui venait facilement et abondamment en Bretagne sans contre-partie équivalente d'hydraulique (que ces temps sont changés!). D'où la recherche de stations régulatrices de houille verte ou de réservoirs supérieurs propres au pompage.

Tout ce passé — j'allais dire ce fatras — est largement périmé, dépassé, depuis que la S.E.U.M. ou le SEUM d'abord, la Direction des Etudes et Recherches d'E.D.F. ensuite (avec votre président à la tête) a pris en main le problème avec tout le sérieux qu'on peut en attendre et qui est nécessaire dans cette technique trop longtemps empreinte de poésie et de fantaisie.

Et si j'ai fait moi-même trop de poésie, qu'on m'excuse de cette diversion, venant d'un ancêtre qui aime toujours à conter son histoire parce qu'elle est celle qu'il connaît le mieux.

Le sujet n° VI, soumis aux *IV^{èmes} Journées de l'Hydraulique*, est relatif à l'utilisation de la marée.

Il a donné lieu à neuf rapports particuliers, proposés ou suggérés au gré de ce qu'on savait des études menées tant en France qu'à l'étranger sur tel ou tel élément du sujet.

Deux de ces études, dues à MM. KENNEDY et HEADLAND et à M. DE VOS, relatent l'état de la question en Angleterre et aux Pays-Bas.

Deux autres rapports décrivent les projets de réalisation conçus en France : le barrage de la Rance et la clôture de la baie des Chausey.

Trois autres (dus à MM. VOYER et PENEL et à M. GIBRAT) ont trait au mode de calcul de la production et aux meilleurs modes ou cycles d'exploitation d'une marémotrice.

Deux autres études, dues à MM. KAMMERLOCHER et DUCLOS, d'une part, et à M. Louis SCHWOB, d'autre part, concernent les groupes.

Une étude un peu plus indépendante du problème de base de la marémotrice sous chute d'eau est due à MM. REMENIERAS et SMAGGHE; elle concerne les courants marins.

Ces études, très variées on le voit dans leur objet ou leur degré de généralité, se laisseront difficilement coordonner en une synthèse d'ensemble; mais une telle construction nous importe assez peu si chacune nous apporte une mise au point et un aspect partiels du sujet commun qui nous occupe aujourd'hui.

Nous essaierons d'en donner une idée sommaire, nécessairement infidèle et incomplète, ce dont nous nous excusons d'avance auprès des auteurs distingués et zélés qui ont bien voulu ajouter chacun leur pierre à l'édifice, lequel ne compte même pas un centenaire depuis le jet de ses premiers fondements, mais plus exactement un tiers de siècle de gestation active

B. — ANALYSE DES RAPPORTS PARTICULIERS

L'ÉNERGIE DES MARÉES EN GRANDE-BRETAGNE

D'APRÈS UNE NOTE DE
MM. G. F. KENNEDY ET H. HEADLAND

Deux projets d'utilisation de la marée ont seuls été étudiés, l'un dans la Severn, l'autre dans le détroit de Menai (entre Anglesey et la côte galloise).

SEVERN

Les études sur la Severn remonteraient au siècle dernier (1849), mais seraient plus actives depuis 1933, ou mieux se développeraient en corrélation avec nos propres études sur l'Aber Vrac'h, qui ont vivement intéressé les cercles compétents anglais.

En tout cas, on s'est arrêté assez vite (1933) à la solution du bassin unique, travaillant au jusan; le pompage, envisagé au début, fut abandonné ensuite (1945) pour laisser place à la marche en parallèle sur le réseau de 132 kV, évolution assez normale.

L'équipement a passé, aux mêmes époques, de 72 groupes de 12.000 kW à 32 groupes Kaplan de 25.000 kW; les turbines, à axe vertical, sont réunies par quatre à autant d'alternateurs « parapluie » tournant à 40 ou 50 tours, grâce à une excitatrice par groupe.

Les caractéristiques essentielles les plus intéressantes sont celles des marnages et des chutes utilisées :

marnage : 47 p. 60 à 22 p. 60;

chutes : 32 p. 5 à 6 ou 7 pieds.

Les productions annuelles sont de l'ordre de 2.400.000.000 kWh.

FIG. 1. — Barrage sur la Severn.
Schéma général proposé des travaux (1945).

FIG. 2. — Coupe transversale d'une usine proposée.

On sait seulement que les usines près des Schoots seraient séparées en deux parties de 2.270 pieds chacune par un ensemble de vannes de 6.825 pieds au droit des English Stones, le tout complété par un barrage de clôture de 4.000 pieds; au total un développement de 4.500 mètres environ, nettement plus long que le barrage de la Rance par conséquent.

Deux écluses de navigation de 70 pieds de largeur; cinq échelles à poissons, un portique de levage de 500 tonnes, un pont route, seraient les compléments accessoires de l'installation.

Des essais complémentaires sur modèle devraient veiller à la conservation de la marée, aux érosions ou envahissements (ceux-ci plus à craindre que celle-là), à la vitesse des courants, aux conditions de la navigation.

La question de la régularisation de l'énergie produite s'est arrêtée, entre les six solutions classiques possibles, à la dilution du courant dans les zones du pays situé au sud du Wash (Londres, Birmingham et S.-W.) auxquelles viendront peut-être s'ajouter des usines thermiques hydrauliques ou de pompage existant déjà

ou à construire dans le nord de la Grande-Bretagne.

En effet, les sites offrant des puissances comparables avec un décalage de temps convenable n'existent pas en Grande-Bretagne, et il resterait toujours la grande différence de production entre la vive-eau et la morte-eau.

Il faut escompter en outre des pertes irréversibles quand les vives-eaux coïncident avec une faible demande.

Le barrage, avec sa production discontinue, ne peut offrir aucune puissance garantie ni remplacer aucune thermique, ou plus exactement aucune puissance installée.

Les kWh ajoutés par la marémotrice permettraient d'économiser une certaine quantité de charbon dans les thermiques, soit un million de tonnes par an environ les premières années, 780.000 tonnes plus tard, quand le rendement des centrales serait amélioré; mais ils ne dispenseraient pas de maintenir aucune thermique sous les feux.

Aux prix de la dépense de construction de 73 millions de livres dans les conditions écono-

miques de 1952 (après 47 en août 1944), il apparaît que le coût du charbon des thermiques s'est accru moins vite que celui des travaux.

En sorte qu'on conclut à l'ajournement d'une installation qui serait retenue seulement comme une réserve d'avenir, à moins que des faits nouveaux n'interviennent dans la valeur des travaux de génie civil, des équipements électromécaniques ou du taux de l'intérêt.

Or les études plus récentes, révélant notamment l'intérêt des groupes plus ramassés, ne doivent pas conduire encore à modifier conclusions et évaluations, parce qu'il faut attendre que ces groupes aient fait leurs preuves avant de les faire entrer en ligne de compte.

DÉTROIT DE MENAI

Ce détroit de 12 milles de longueur, de 8 millions de m² de surface, est parcouru par une branche du courant général de marée est-ouest et donne lieu à une différence de marnage entre les extrémités variant de 7 p. 3 à 5 p. 3 selon la lune.

Les niveaux s'équilibrent à basse mer.

Trois barrages déterminant deux bassins presque égaux, avec des vannages fonctionnant dans un seul sens, seraient à établir dans de mauvaises conditions de fondation (à travers 35 à 40 pieds de sable).

Les turbines seraient placées dans le barrage central; elles seraient parcourues par un débit de 11.300 m³ sous 12 pieds de chute, assurant une production de 12.300 à 3.600 kW, ou 70 millions de kWh annuels.

Une production avec un bassin unique élèverait bien ce chiffre à 100 millions de kWh, mais avec une irrégularité beaucoup plus grande.

On a fait le recensement des usines hydroélectriques voisines, donnant ensemble 50.000 kW installés.

On n'économiserait annuellement que 50.000 t de charbon.

Les autres emplacements examinés sont encore moins intéressants.

Seule, la Severn pourrait soutenir la comparaison avec les usines thermiques ou nucléaires.

RAPPORT NÉERLANDAIS

RAISONS POUR LESQUELLES AUCUNE USINE MARÉMOTRICE NE SERA INSÉRÉE DANS LE NOUVEAU PROJET D'ENDIGUEMENT DIT DELTAPLAN

PAR

F. J. DE VOS, *Ing. du Rijkswaterstaat*

On sait que c'est à la suite des ruptures de digues du 1^{er} février 1953 qu'est né le projet de pourvoir à la faiblesse et au lent abaissement de ces ouvrages, parfois vétustes, en enveloppant un certain domaine insulaire de Zélande et Hollande du Sud par un périmètre d'enceinte plus sérieux, barrant quelques estuaires, transformant en réservoir d'eau douce, précieuse pour l'agriculture de l'arrière-pays, une vaste étendue toujours menacée par le sel, actuellement en prise à l'eau de mer.

Le projet, évalué à 2 milliards de florins, est jugé acceptable en raison des avantages à en attendre, dont le moindre n'est pas de donner plus de sécurité à des îles exposées à une nouvelle et lente subsidence...

L'idée de transformer en bassin pour marémotrice, donc en bassin d'eau salée, une partie du réservoir d'eau douce enveloppé dans cette enceinte générale, est venue évidemment à nos

collègues néerlandais, qui ont suivi d'ailleurs depuis longtemps les études françaises en la matière.

L'intérêt de cette station se fût accru, au prix d'une perte admissible sur la réserve d'eau douce, de la possibilité de rétablir des parcs d'huîtres et de moules, sacrifiés par le projet du delta; et la valeur de cette production, dont la mise en parallèle ou en équation avec celle d'une station marémotrice est assez inattendue, est telle qu'on peut porter à son compte toutes les digues secondaires et une partie des pertuis à groupes moteurs (50%), tandis que le projet général garderait de son côté à son passif une notable partie des charges de l'enceinte, toujours si lourdes en matière d'usine à marée.

Il fallait évidemment regarder d'autre part le prix de revient de l'énergie thermique aux Pays-Bas, seule source actuelle; il y est relativement assez faible à cause des facilités offertes par les

nombreux canaux pour le transport du combustible. Le chiffre de 0,040 Fl. par kWh est finalement retenu, dont 60 % pour le charbon.

Mais la marée est faible aux Pays-Bas, même dans la région du Delta (1,35 m à 3,75 m au plus).

Et cependant, on retrouve trace d'une dizaine de moulins à marée dans le pays, ayant servi surtout à la mouture du grain; mais on n'y disposait guère alors d'autres sources d'énergie.

Divers projets ont fleuri au début du xx^e siècle; ils ont été abandonnés, à cause de la faiblesse du marnage et de l'absence d'un réseau de répartition pour y amortir les irrégularités de la production.

Avec le grand programme du Delta, l'idée devait être reprise; elle le fut sous forme de trois usines :

Celle de Veeregat Zandkreek, équipée pour cycle à simple effet, produisant 60 millions de kWh, coûtant 35 ou 45 millions de florins selon que l'on fait intervenir, ou non, le bénéfice de l'ostréiculture et de la mytiliculture, mettant le kWh à 0,04 Fl. ou 0,045 Fl. selon les mêmes hypothèses;

Celle de Grevelingen, équipée pour un cycle à

deux bassins conjugués, produisant 70 millions de kWh, coûtant 35 ou 60 millions de florins, mettant le kWh à 0,03 Fl. ou 0,05 Fl.;

Celle de Veeregat-Zandkreek, Escaut oriental, équipée également pour un cycle à deux bassins conjugués, l'inférieur étant séparé du lac d'eau douce par une digue secondaire dans l'Escaut oriental, produisant 100 millions de kWh à 0,025 Fl. ou à 0,05 Fl.

Même à ces dernières conditions, les plus favorables, il n'y aurait équivalence qu'avec une thermique où le charbon revint à 55 florins la tonne (le prix est voisin de 60 florins la tonne actuellement); l'avantage est trop faible pour justifier un tel investissement, et si, par hasard, les avantages de la production des coquillages ne venaient pas soulager la mise de fonds nécessaire aux marémotrices, celles-ci ne viendraient en concurrence que pour un prix de charbon presque double (110 à 115 florins la tonne).

Il n'y avait donc pas lieu d'insister, et on ne l'a pas fait, malgré l'argument original fourni par la culture des huîtres et moules.

L'énergie est trop diluée dans des marées aussi faibles où les vents gonflant la mer jouent un rôle de même ordre, on l'a bien vu en 1953.

EXEMPLES D'APPLICATION EN PROJET

I. — AMÉNAGEMENT DE LA RANCE

La Rance, qui était le joyau des espoirs en matière de marémotrices au temps où la station d'essai envisagée était l'estuaire de l'Aber Vrac'h (1,1 km² de surface de bassin), n'est plus maintenant que la station d'essai à l'échelle des conceptions d'aujourd'hui, la station appelée à donner confiance avant d'aborder des études détaillées sur un aménagement tel que celui de l'Archipel des Chausey (500 à 700 km²) pour ne pas anticiper encore sur ses au-delà!...

La surface du bassin demeure égale, avec ses 20 km², à celle du bassin actuel.

La marée y joue pratiquement avec une amplitude variant de 3 m à 13,50 m.

Le débit propre de la rivière Rance (0,5 m³ par seconde à 120 m³) est négligeable auprès des 4.000 à 15.000 m³ d'eau échangés à (et par) chaque marée.

Plusieurs projets ont été successivement établis au fur et à mesure des réflexions et des études : l'un, notamment, en mai 1953, avant et pour les enquêtes, l'autre en avril 1955, modifié d'après les résultats des enquêtes.

L'usine sera équipée pour un débit maximum de 5.500 m³/s, une chute moyenne de 5 m, avec 38 groupes de 7.000 kW puis 9.000 kW, après 26 de 8.000 kW (de type différent, à axe vertical).

La production annuelle sera de l'ordre de 750 ou 800 millions de kW, après 550 millions (avec 26 groupes).

La puissance équipée aura passé dans le même temps de 208.000 à 266.000 kVA.

Une des particularités de la marée est de varier beaucoup en énergie possible selon les jours, ou dans le cours d'une semaine, ou plutôt de certaines semaines, beaucoup moins dans le cours d'une quinzaine, ou d'une année.

C'est ainsi que, d'après une série de calculs — on en a fait plusieurs, mais les proportions subsistent — la production quotidienne de la Rance peut varier :

de 50.000 kWh dans une marée de coefficient 20, à 1.450.000 kWh dans une marée de coefficient 120 (par conséquent dans un rapport de 1 à 29);

dans une semaine d'équinoxe : de 145.600 à 1.402.700 kWh (par conséquent dans un rapport de 1 à 9,6);

dans une semaine de solstice (déc. 1950) : de 551.200 à 834.600 kWh (soit un rapport de 1 à 1,5 seulement).

La courbe mensuelle de répartition des coefficients est beaucoup plus étalée, évidemment,

aux équinoxes, beaucoup plus ramassée aux solstices où les coefficients sont plus moyens.

Mais la production semi-mensuelle est presque constante, à 10 % près, variant, pour un mois de 31 jours, de 45.800.000 kWh à 48.600.000 kWh (soit 5 % seulement).

La production pour la marée moyenne de l'année est de 783.233 kWh, dans un cycle qui produirait 552.400.000 kWh, en une année non bissextile. Et la variation serait inférieure à 5 % d'une année à l'autre.

*

Une des grandes innovations dues à la prolongation des études, c'est qu'on ne s'astreindrait plus à rechercher toujours le maximum de rendement à quelque moment qu'il se produise; mais on utiliserait un diagramme plus souple pour s'adapter à la demande du réseau, elle-même variable, on le sait, selon l'heure de la journée, les jours de la semaine, les saisons de l'année.

A condition de ne pas accepter de décalage supérieur à une demi-heure, la perte reste admissible.

On serait même amené, tout en recourant à l'artifice du pompage par moments et selon les marées, selon bien entendu aussi le moment de chaque marée, à fonctionner tantôt en simple effet, tantôt en double effet; et non plus systématiquement selon une seule de ces deux modalités, comme les auteurs de systèmes, depuis l'origine des recherches, opposaient l'une à l'autre sans compromission possible à leurs yeux.

A vrai dire, la Rance a connu ces diverses alternatives sous leur forme absolue, le simple effet ayant paru l'emporter nettement d'abord, à raison du prix supplémentaire d'un équipement à deux sens qui augmentait à peine de 20 % la production globale.

C'est là l'une des récompenses de méditations prolongées sur un problème complexe, ne se satisfaisant pas d'un premier et déjà prometteur résultat, avec aussi la révélation des groupes à bulbe enfermant et noyant, sous une profondeur d'eau réduite, tout l'appareillage hydro-électrique dans une seule enveloppe étanche, bien profilée et jouant aussi le rôle de vanne à débit appréciable; c'est là, disons-nous, la double circonstance matérielle et morale, chef-d'œuvre de la technique et de la persévérance, qui a permis le succès de l'idée intuitive d'une conciliation des avantages de deux systèmes parallèles, mais non rivaux et de leur accouplement selon l'importance des marées :

Les faibles mortes-eaux, vers le coefficient moyen de 45, s'accommoderont mieux du simple effet dit « répété » avec turbinage à la vidange,

pompage peu après la pleine mer pour relever le niveau du bassin unique:

Les marées moyennes, vers le coefficient de 70, utiliseront mieux un double effet répété avec double pompage après le plein pour relever le niveau du bassin, après la basse-mer, et la fin de la vidange pour accentuer la réduction du niveau dans le réservoir qui attendra ainsi plus avantageusement la reprise de la marche en remplissage.

Les marées de vive-eau ordinaires, vers le coefficient moyen de 95, seront très valorisées par l'emploi de deux marches en vidange séparées respectivement par une seule marche en remplissage et une période sans travail pendant un des deux montants quotidiens (dit sesqui-effet), avec un double pompage l'un de surremplissage, l'autre de survidange de part et d'autre d'une seule des deux baissées quotidiennes.

Les marées de grande vive-eau, jusqu'au coefficient de 120 seront exploitées en double effet sans aucun pompage.

Ces solutions, plus parlantes sur schéma qu'en description, démontrent leurs avantages par la considération de l'énergie maxima obtenue dans les diverses périodes ou sur la surface totale enveloppée aux périodes productives). Elles sont surtout avantageuses si l'on suppose constant le prix de l'énergie livrée à tout moment.

Il appartiendra de demander confirmation pratique du bon fonctionnement de tels diagrammes aux premiers temps de marche et de tâtonnements de la station marémotrice.

Mais il n'est nullement invraisemblable qu'en fait, on ait intérêt à tenir compte de la valeur effective du courant livré à tout moment.

On peut alors concentrer la production sur les heures de pointes de la journée, toujours à peu près les mêmes en tout point du globe et réglées par le jour solaire; et l'on conçoit que le diagramme variera selon qu'on est en semaine de vive-eau ou de morte-eau, selon aussi la plus ou moins grande distance horaire entre les heures de grosse demande et les heures de plus grande productivité naturelle; cet écart étant d'ailleurs non seulement prévisible mais à peu près constant par le fait que se répètent aux mêmes heures de la journée les pleins des grands et des petits coefficients.

**

Il est encore assez facile d'embrasser le problème et ses diverses faces en raisonnant sur deux marées consécutives.

Mais l'esprit humain se satisfait rarement d'un raisonnement à la portée du plus grand nombre.

Et la S.E.U.M., qui n'est pas économe de sa substance grise, a voulu laisser apercevoir le nombre et la nature des combinaisons utilisables selon qu'on tente de raisonner pour plus de deux marées, ou jusqu'aux 27 alternances d'une demi-lunaison de 14 jours, car seule une telle période permet d'embrasser à la fois les creux d'un week-end et les variations quotidiennes de production les plus fortes.

Or, les quatre opérations possibles d'une marée, savoir deux turbinages et deux pompages, offrent déjà 16 combinaisons de cycle possibles. Suffisantes si l'on se borne à attacher à l'énergie une valeur constante à quelque heure, à quelque jour qu'elle soit produite, elles ne peuvent tenir compte de la valeur à tout moment de l'énergie que si on les étend à deux marées consécutives, soit à un peu plus de 24 heures; et le nombre de combinaisons s'élève déjà à $16^2 = 256$, ce qui est singulièrement plus difficile, sinon à énumérer — « les usines marémotrices » de septembre 1955 ⁽¹⁾ le font — du moins à dominer et interpréter.

Pour 27 marées, ce nombre s'élèvera à 16^{27} ou 3×10^{32} et ne se prêtera plus à un recensement.

Il faut donc rester pour le moment sur les frontières des extensions, comme il a été fait plus haut.

On espère qu'un dispatcher arrivera à acquérir le sens du problème et réussira par son intuition, appuyée sur quelques diagrammes type, à serrer de près le problème de la meilleure productivité de la station, productivité qualitative plus encore que quantitative.

**

Ces conceptions encore irréelles ont cependant l'avantage de souligner ce qu'il faut demander aux machines des marémotrices pour obtenir la grande souplesse désirable de leur travail, tout en permettant leur insertion en grand nombre dans un barrage de longueur et de tirant d'eau généralement limités.

Evolution, plutôt que création instantanée de toutes pièces serait l'histoire de la machine idéale, depuis :

la roue du moulin de marée,
la turbine étudiée par Escher Wyss vers 1922,
la roue hélice à axe vertical très encuvée et exigeant souvent un fort et coûteux dérochage supplémentaire, éloignée de son alternateur en bout d'arbre, mis ainsi hors des atteintes de l'eau, sinon de ses vapeurs.

l'alternateur en parapluie (au-dessus du pivot).

On est venu ensuite à l'idée de la roue à axe oblique ou mieux horizontal, qui se loge sous une moindre épaisseur d'eau et se prête mieux à un double sens de fonctionnement, grâce à des pales orientables au-delà de 180° . Mais elle entraîne l'alternateur avec elle au-dessous du niveau de l'eau, soit qu'il entoure l'écoulement d'eau, ou qu'il soit contourné par lui, ou se loge dans un bulbe en prolongement de la turbine.

Cette dernière formule exige un cuirassement étanche pour l'alternateur et s'améliore par le recours à l'huile pour le refroidissement intérieur. Les alternateurs sont de 8.500 kVA, le courant triphasé produit est à 10.000 volts.

On trouve déjà dans certaines usines à terre des exemples d'application de l'une ou l'autre de ces idées [(Bavière), Hostin, Argentat, Cambeyrac, Castet]. On provoque délibérément de nouvelles occasions d'essai et de mise au point des plus récentes conceptions.

Parallèlement, il fallait vérifier que ce même type resterait applicable à des usines exposées à l'agitation de la mer, ce qui n'était guère le cas de la Rance en son site reculé et abrité.

Ce qu'on fit à Grenoble, où une agitation artificielle dans une cuve de modèle réduit ne produisait pas d'à-coups inadmissibles ni sur la turbine ni sur l'alternateur dotés d'une inertie relativement considérable.

Chaque groupe est démontable d'un seul bloc et échangeable aisément. Un essai en sera fait en 1957 dans une écluse désaffectée de Saint-Malo.

Les problèmes mécaniques essentiels sont ainsi résolus pour une station comme celle de la Rance. Il reste à envelopper les groupes ainsi définis de cellules jointives en béton plus ou moins armé, ce qui nous amène aux ouvrages de génie civil.

**

La section la plus avantageuse à barrer mesure 700 m entre les pointes de la Brebis et de la Briantais près de la Vicomté. Les largeurs seront de 47 m à la base, une vingtaine de mètres en crête. Les 38 groupes seront encadrés par 10 pertuis de vannage de $7,50 \times 8$ m s'ajoutant aux opercules des groupes. Tous les accessoires (ponts roulants, transfos, postes de commande, ateliers) seront logés dans l'usine.

La traversée servira de pont routier; amélioration très appréciée des riverains et des localités extrêmes de Saint-Malo, Saint-Servan et Dinard, sinon des vedettes et des bacs.

Une écluse à sas de 35 m a été exigée aux enquêtes, mesurant 10 m entre bajoyers, 7,90 m aux pertuis, avec un radier à la cote (+ 2,50), un seuil amont à la cote (+ 4,00), permettant le sassement de bateaux de 4 m de tirant d'eau pendant des périodes suffisantes.

(1) Auteur : M. Robert GIBRAT, Ingénieur Conseil de l'E.D.F.

La seule difficulté véritable du chantier résidera dans la coupure d'un courant assez violent. L'une des solutions pour y parvenir (solution sûre, mais lente) consistera à envelopper, en trois phases successives, un tiers environ du lit de batardeaux (qui seront démontés à chaque reprise) où une tranche d'usine s'exécutera à sec, ce qui ne dispensera pas d'effectuer des déroctages de régularisation du lit sous l'emplacement des batardeaux retirés.

*
**

Le régime du bassin amont de la Rance ne sera pas profondément modifié :

Il n'y aura pas de nouvelle submersion de terrains. Le plein y sera seulement maintenu pendant 3 heures, de la pleine mer à la mi-marée descendante.

Il y aura un retard d'un quart d'heure dans la variation des niveaux d'amont pendant la période de remplissage. Puis la baisse se produira en 6 heures. Il y aura une stagnation de niveau pendant une demi-heure environ.

A l'amont, comme à l'aval du barrage, le courant sera de 2 nœuds au maximum.

*
**

Les prescriptions, d'ailleurs acceptées, qu'a fixées l'enquête concernent la réparation par le concessionnaire de tous dommages qu'il causerait; ceux-ci pourraient avoir à parer à l'humidification plus grande des propriétés et des terres, au drainage et à l'évacuation des eaux usées, aux conditions d'alimentation en eau potable, à la modification de la nappe phréatique, au trouble apporté aux moulins ordinaires ou à marée.

*
**

Il a bien fallu avancer un prix de revient de l'unité d'énergie d'après les prévisions sur le coût de travaux, de l'entretien, de l'amortissement et de l'exploitation; c'est 7,35 F le kWh qui a été indiqué ou 43,50 F par kWh investi.

II. — PROJET DES ILES CHAUSEY

C'est là le grand espoir de l'avenir des marémotrices pour la France, car l'emplacement cumule les avantages de l'immensité de la baie, avec une des plus fortes marées du monde, un sol d'appui assez favorable et une forme en plan assez avantageuse.

L'éloignement des grands centres de consommation n'est plus dirimant aujourd'hui avec les gros voltages de transport, et il est inférieur à ceux des Alpes, du Rhône, du Rhin, du cœur du Massif Central à Paris.

C'est plutôt l'échelle même qui pouvait effrayer au début. Rendons hommage à M. CAQUOT qui, le premier (1942), a prononcé, avec l'autorité entraînant de son nom, le « pourquoi pas? » qui levait l'interdit sur l'engagement des simples études préliminaires.

Depuis, les ambitions ont grandi avec le nombre des études : de 3.000.000 kW installés (en 150 groupes de 20.000 kW régnant sur 3.200 m), on en est venu à 7,5 millions, puis 10 et peut-être 15 millions de kW (en un demi-millier de caissons, comme ordre de grandeur), sans parler de futures extensions dans l'ouest.

L'essentiel est de conserver un bon rapport entre le périmètre et la surface endiguée.

Ce qui est rassurant, c'est qu'avec les nouvelles conceptions en matière de groupes turbo-alternateurs, la cote du rocher est suffisante (— 20,00) sur un développement assez grand, pour loger un nombre de groupes et de vannages

en rapport avec la puissance à capter et aussi avec la nécessité supérieure de l'écoulement des eaux en vue de permettre la fermeture de l'enceinte, commodité que les Néerlandais ne pouvaient trouver au Zuyderzee.

Les ingénieurs qui se sont succédé ou se sont penchés simultanément devant le problème, sous l'orchestration de S.E.U.M., ont fait ressortir un certain nombre de difficultés que d'autres ont écartées, ou de procédés d'exécution dignes d'être, au moins en partie, retenus :

Et d'abord, le tracé général, qu'on a limité en premier jet à la ligne droite ou légèrement incurvée, joignant la pointe de Cancale au rocher de Granville, soit 23 km, avec une transversale intérieure normale à cette ligne, formant deux bassins à peu près égaux et contenant les groupes moteurs ainsi bien abrités, avec, peut-être, des jetées extérieures convergentes formant avant-port pour la protection des pertuis.

Mais on pouvait étreindre plus de kilomètres carrés en s'approchant de l'archipel granitique des Chausey, ou même en l'englobant dans l'enceinte.

Un nouveau jeu de combinaisons s'ouvrirait, qui profiteraient soit de l'abri de l'obstacle pour élonger la batterie de groupes dans son ombre méridionale, soit du détroit séparant Granville de l'archipel, moins exposé aux grandes houles que le flanc ouest du quadrilatère, mais aussi

moins profond, un peu court (1/5 seulement du développement nécessaire) et engagé par des sables (sur 15 à 20 m), dont le retour après dragage préalable serait à craindre.

Pénétré du danger de couler ou foncer les caissons de groupes en eaux agitées, l'un des inventeurs a songé à utiliser l'archipel même, hérisson de têtes émergentes plutôt que plateau continu, pour y foncer l'usine à sec, en s'aidant d'une double enceinte de batardeaux. Mais le grand diamètre du magma insulaire est un peu court (6,300 km) pour loger assez de groupes; les batardeaux sont très onéreux pour de tels développements; qu'il s'agisse aussi bien d'ailleurs des émergences que des passages les séparant de la Normandie ou de la Bretagne.

Alors, on en est venu à affronter le pire pour l'implantation de l'usine, c'est-à-dire le bras de mer nord-sud reliant les Chausey à la pointe du Grouin (près Cancale) et exposé de plein fouet à la houle d'ouest.

On profiterait des profondeurs maxima du rocher qui n'est là que faiblement surmonté de dépôt meubles.

La houle, soigneusement mesurée, ne dépasse guère 3 m de creux; il semble que les groupes à bulbe s'en accommoderaient sous 20 à 30 m d'eau (essais Neyrpic).

Mais il resterait comme risques la grande hauteur des caissons (et leur nombre) à immerger; si on voulait les encastrer quelque peu dans le rocher, solution la plus sûre et la plus classique sans doute, on se heurterait à la difficulté des déblais, du travail des tubistes sous forte pression, même près des basses mers (25 à 30 m), de l'instabilité des caissons au début du fonçage si les tempêtes interviennent; et on ne peut espérer s'en affranchir pour une si longue répétition d'opérations.

Aussi d'aucuns ont-il fait assaut d'ingénieux systèmes pour envelopper les caissons dans un massif à talus, ou pour les faire reposer sur des sacs étanches gonflés d'une matière solidifiable, ce qui supprimerait l'écueil de l'irrégularité du rocher pour l'appui des caissons.

Les opérations se feraient bien si l'on disposait de périodes de 2 h 1/2 de courant inférieur à 1 nœud.

Indiquons tout de suite que les mesures de courant, comme celle des creux de lames et des cotes du plan rocheux sous le sable, ont fait l'objet des préoccupations de S.E.U.M.

On trouverait à l'est de Herpin une anse abritée et de profondeur favorable (— 17.00) pour la construction et le lancement des caissons, en réunissant deux îlots par une digue.

Les caissons provisoirement retenus dont les dimensions varieront encore bien des fois, mesureraient 52 m de longueur, 26 m de largeur,

38 m de hauteur, 23 m de tirant d'eau, 32.000 t de déplacement.

La quantité de béton par 10.000 kW installés a varié de 5.000 à 8.000 m³ selon les évaluations.

Le vannage, confondu en partie avec les groupes à bulbe (comme pour la Rance), exigerait en sus 66 caissons indépendants.

Les 137.000 m³ de puits d'écoulement qui en résulteraient permettraient d'envisager avec sang-froid la fermeture de l'enceinte.

Peut-être sera-t-il prudent de diviser les vannages et même les groupes producteurs pour éviter des concentrations de courant excessives.

Sinon, la plus grande partie de l'énorme intervalle entre les Chausey et la pointe bretonne sera occupée par les caissons.

Et l'enceinte à constituer en nature de digue à talus sera très réduite, si ce n'est pour la fermeture du détroit nord (Normandie-Chausey).

Des études ont été faites sur un type de digue sûr, qu'on réduira au strict minimum de sécurité, vu son coût, et son développement. A une ampleur d'ouvrage exceptionnelle, il faudrait associer des dispositions et procédés d'exécution exceptionnels aussi, qu'autorise cette ampleur même.

L'enceinte à talus demeure, en tout cas, nettement moins chère, en valeur absolue et au mètre courant, que les parties en caissons immergés.

Mais la difficulté peut être grande de trouver des enrochements de qualité, en quantité suffisante pour une grande longueur de digue, sans aller à des distances considérables ou prohibitives.

Le développement total de l'endigage est de l'ordre de 35 km, qu'on incurve ou non la face occidentale pour gagner des profondeurs plus favorables ou quelques kilomètres carrés de surface supplémentaire.

L'impression qu'on vient chercher au mont Saint-Michel n'en sera pas altérée. Mais il faudra longuement le répéter et le prouver pour écarter une obstruction de ce chef.

La survenance de l'équipement en énergie atomique et la difficulté de mettre la nuit les piles en sommeil peut donner un regain d'intérêt à une exploitation de marémotrice susceptible de travailler facilement en pompe à certaines heures.

Un des gros éléments du problème demeure, il ne faut pas se le dissimuler, l'importance des intérêts intercalaires qui devient une fraction appréciable de la dépense, par elle-même déjà très considérable.

Les centaines de milliards qu'ils peuvent représenter conditionnent la rentabilité de la production : aussi serait-il très avantageux de réduire à une quinzaine d'années, plutôt qu'à un quart de siècle, par exemple, la durée des tra-

vaux; car l'idée de mettre une première fraction de l'usine en route pour gager une partie de la trésorerie paraît assez imaginaire dans l'espèce.

Les études continuent et doivent continuer avec l'espoir, après les précédents de la Rance, qu'on tirera du problème la quintessence capable d'en améliorer convenablement l'aspect.

En attendant, on a établi notamment, au Laboratoire de Chatou, un modèle de la Manche destiné à effectuer les études préliminaires de l'usine dans les diverses phases de sa construction et de son exploitation.

Le modèle représente la totalité de la Manche entre une ligne joignant l'extrémité de la Bretagne au cap Lizard et une ligne traversant le Pas de Calais.

La marée est produite par deux générateurs de houle placés à l'entrée de l'Atlantique et au détroit du Pas de Calais et déphasés d'un angle convenable.

Ce premier modèle doit permettre :

- a) de définir les limites d'un modèle d'emprise plus restreinte et à plus grande échelle, destiné à l'étude détaillée de l'usine,
- b) de rechercher l'influence de la force de Coriolis dans la propagation de l'onde marée dans la Manche.

Les échelles de similitude sont :

- 1/50.000 en plan,
- 1/500 en hauteur,
- 1/2230 en temps (la marée semi-diurne dure 20 secondes),
- 1/22,3 en vitesse (2,3 cm/s pour 1 nœud).

Un modèle couvrant un espace plus réduit sera monté ensuite pour examiner de plus près l'action de la marée à l'ouest du Cotentin, en négligeant les phénomènes que le modèle précédent aura révélés de trop faible importance.

LES CALCULS DE LA PRODUCTION D'UNE USINE MARÉMOTRICE

PAR

MM. VOYER ET PÉNEL, *Ingénieurs à l'E.D.F. (DER)*

Dans leur rapport de 15 pages et 16 figures, les auteurs nous font pénétrer davantage dans la pratique des calculs d'une marémotrice, que le rapport précédent sur la Rance n'a fait que laisser entrevoir en leur complexité, calculs partant de divers optima (non seulement le rendement énergétique maximum, l'économie maxima de charbon dans les thermiques, mais le rendement en argent maximum selon la valeur du kWh aux différentes heures de la journée), calculs qui s'imposent maintenant que l'invention de groupes fonctionnant avec bon rendement dans les deux sens d'écoulement et en pompe permet de jouer sur 4 modes d'utilisation des groupes (en turbine ou pompe, directe ou inverse).

Comme premier élément simplificateur de calcul, il est fait d'abord observer que les 705 marées annuelles peuvent se ramener, dans le calcul du maximum d'énergie, à :

- 30 % de marées de coefficient 45,
- 40 % de marées de coefficient 70,
- 30 % de marées de coefficient 95,

ces coefficients étant d'ailleurs généralement considérés comme typiques.

Les autres calculs où le prix de l'énergie in-

tervient se feront sur une succession de marées de 14 jours solaires.

La puissance des turbines est fonction de la chute (H) et du débit (q); elle est donnée par la « colline industrielle de puissance », formée par les projections des courbes à puissance constante sur le plan qH, pour les quatre modes d'utilisation susvisés.

On a adopté dans les calculs, pour rendements des groupes, ceux mesurés sur des roues d'essai de quelques décimètres de diamètre, malgré l'augmentation à attendre du passage à la grandeur réelle.

En effet, les corrections que l'on applique aux modèles des turbines de rivière sont incertaines dans le cas présent, du fait que l'usine marémotrice fonctionne à une puissance souvent différente de la puissance nominale.

Si les équations fondamentales, définissant en marche normale, sans limitations et sans vanage, les conditions de fonctionnement des groupes en fonction du temps, sont relativement simples, même en y introduisant le prix du kWh, la recherche d'un des maxima devient déjà très compliquée, parce que les facteurs qui y entrent (variations de la hauteur de la marée avec le temps, de la surface du bassin

avec son niveau, du rendement d'un groupe avec le débit) n'ont pas de représentation algébrique simple, vu les formes quelconques rencontrées dans la nature. Il faut donc suivre une méthode d'intégration « pas à pas », nécessitant de longs calculs numériques.

La recherche du maximum d'énergie annuelle (avec 3 coefficients de marée seulement) coûte, en simple effet, une semaine de travail à un calculateur; en double effet, six semaines. La recherche du maximum de recette fait encore doubler ces délais, soit respectivement deux et douze semaines.

Et on ne fait pas intervenir le cas du pompage, ni certaines limitations telles que la puissance maximum des alternateurs ou celle des variations de débit.

Une mécanisation des calculs apparaîtrait donc nécessaire; mais il est difficile notamment d'introduire dans la machine la colline des puissances des groupes.

D'autre part, au stade de la recherche, il faut non seulement obtenir un chiffre final, mais surtout sentir l'influence de chaque paramètre, « tâche passionnante et fructueuse ».

Il est donc plus intéressant de ne pas renoncer complètement à la *méthode intuitive*, pourvu que son degré d'exactitude puisse être établi par une confrontation avec le calcul rigoureux sur des exemples précis.

Ce système a permis de fournir assez rapidement des résultats nombreux, nécessités notamment par les hésitations entre les simple et double effets et par l'intervention de nouveaux types de groupes à apprécier.

Les auteurs donnent un exemple de la méthode empirique pure (simple effet au vidage).

Déjà assez approchée (5 % environ), elle ne permet pas cependant d'affirmer la supériorité d'un groupe sur un autre, à cause des croisements possibles des approximations.

Mais elle permet de voir dans quel sens et entre quelles limites se déplace le point figuratif de la marche d'un groupe sur une colline de puissance.

Elle permet plus généralement de se rendre compte de la sensibilité des mécanismes mathématiques utilisés.

La méthode mathématique rigoureuse se simplifie beaucoup lorsque, sur la colline $N(qH)$, la relation $\partial N / \partial H = aq$ peut être satisfaite. On peut, dans ce cas, envisager même une solution graphique très élégante. Une telle solution peut être appliquée dans la pratique, les groupes réels remplissent en général d'assez près la condition ci-dessus.

On se donne, *a priori*, le départ du cycle à un niveau déterminé et l'intervalle de temps de la sommation (10 ou 20 minutes). La colline permet de déterminer le débit moyen dans chaque

intervalle, par conséquent la cote suivante du bassin.

Certaines conditions aux extrémités permettent de découvrir l'extrémité optimum ⁽¹⁾ (celle où la hauteur de la marée est la même au début et à la fin de l'opération).

Mais cette méthode est d'autant plus valable que la colline réelle est plus voisine de la forme théorique qu'on lui impose.

A elle seule, elle n'est pas plus capable de comparer exactement deux groupes. Mais elle est précieuse pour l'étude d'un équipement déterminé.

Le plus intéressant est de combiner les deux méthodes, c'est-à-dire d'appliquer sur la colline *réelle* les tracés graphiques rapidement obtenus pour l'extrémale.

Cela fait penser un peu aux raisonnements subtils de la haute arithmétique par rapport aux raisonnements rigoureux de l'algèbre ou de l'analytique.

Le meilleur cycle est généralement obtenu après deux essais.

Etude a été faite ensuite de quelques autres fonctionnements (limitation de puissance, vannage, pompage, variation du prix de l'énergie en périodes troublées), ce qui montre la richesse ou la puissance de la méthode.

Enfin, on présente une étude de fonctionnement en cycle variable, qui se distingue du fonctionnement en maximum d'énergie où l'on rencontre une succession constante des quatre mêmes opérations : pompage au remplissage, turbinage au vidage, suivi de vannage, pompage au vidage, turbinage au remplissage, suivi de vannage.

Les performances d'une centrale hydraulique classique (puissance de pointe, puissance garantie, énergie annuelle) sont bien connues, tandis que pour une marémotrice beaucoup plus souple, elles dépendent les unes des autres en ce sens qu'on peut augmenter l'une aux dépens d'une autre.

En affectant des valeurs différentes aux énergies de pointe, d'heures pleines ou creuses, on peut faire varier les résultats énergétiques ou de recettes obtenus.

On s'aperçoit d'ailleurs de certaines simplifications (quelques cycles seront nécessairement pauvres et pourront être « escamotés » pour favoriser les cycles suivants).

(1) D'une manière générale, les auteurs appellent « extrémales » les courbes, dans le plan de la cote d'eau du bassin et du temps et dans le plan des débits et de la hauteur de chute, qui sont solutions des équations fondamentales susvisées, étant observé que cette notion comporte un « extremum » pour l'intégrale totale de la recette globale (produit du prix par la puissance des groupes).

L'énergie produite en certains cycles affectés d'un coefficient élevé justifiera des pompages; d'autres cycles, déterminant une énergie de moindre valeur, rendront le pompage inintéressant.

L'opportunité du pompage sera, d'une part, fixée par le prix de l'énergie absorbée lors du pompage, d'autre part, déterminée par celui de l'énergie restituée ultérieurement en turbinant l'eau emmagasinée.

De tels calculs sont simples dans certains cas privilégiés; si l'on en sort, ils peuvent devenir beaucoup plus longs.

Ils ont permis d'étudier le comportement d'une usine marémotrice au cours de périodes où, soit la puissance de pointe, soit l'énergie dite « de garantie » font défaut au réseau général. La grande souplesse de ce nouveau moyen de production a été ainsi mise en évidence, non seulement qualitativement, mais quantitativement.

Les auteurs concluent — et nous avec eux — au grand intérêt non seulement pratique, mais même intellectuel de telles études, où l'on ne perd même pas de vue la réalité physique des phénomènes.

CYCLES D'UTILISATION DE L'ÉNERGIE MARÉMOTRICE

PAR

M. GIBRAT, *Ingénieur-Conseil de l'E.D.F.*

Nous serons assez brefs dans la présentation de ce remarquable rapport, parce que nous avons dû en extraire déjà les plus frappants éléments dans l'application projetée de l'utilisation de la marée à la Rance, dont les conceptions ont tellement bénéficié des études et idées incluses dans ce rapport, de caractère plus général et plus théorique, qu'on n'en pouvait faire abstraction.

M. GIBRAT reprend tout l'historique des cycles auxquels se sont trop exclusivement complu les auteurs d'études antérieures (simple effet, double effet, pompage).

La notion du prix de revient de l'énergie aux diverses heures de la journée solaire étant devenue facteur éminent sinon prédominant, il fallait étendre les cycles, quels qu'ils soient, à plus d'une marée, pour bien faire, à une demi-période lunaire, et l'on arrive alors au chiffre astronomique de $3 \cdot 10^{32}$ cycles différents.

Malgré une notation très ingénieuse des divers moments de l'exploitation et des opérations possibles (travail en vidage, travail en remplissage, pompage en remplissage ou en vidage), l'esprit humain ne peut plus embrasser une telle amplitude de combinaisons.

Il remet à son propre pouvoir d'intuition et à une grosse habitude le soin de s'approcher des solutions les plus avantageuses, ce qui paraît déjà dépasser les capacités ou la responsabilité normale d'un très grand chef d'industrie.

Par contre, le même cerveau saisit fort bien l'intérêt spécial du sesqui-effet où se trouvent combinés les avantages respectifs du simple et du double effet.

Il conçoit très clairement que certaines opé-

rations de pompage sont nuisibles et conduisent à écarter certains cycles.

Il est tout heureux d'entrevoir, dans les marémotrices, un utile complément aux futures centrales atomiques dont l'égalité impitoyable de marche aura peine à trouver un aliment la nuit, à moins du surremplissage par pompage des bassins de marée.

Quelques exemples nous montrent que si l'énergie du matin et de la nuit ne vaut quasi rien, et si celle de l'après-midi est précieuse, il peut être intéressant de pomper à deux pleines mers consécutives avant d'effectuer un vidage.

L'auteur parvient encore à établir le tableau des 256 combinaisons de second ordre (correspondant à deux marées) dont 104 sont des cycles positifs, en les répartissant en :

l'absence de tout turbinage,
le simple effet unique,
le simple effet répété,
le double effet unique,
le sesqui-effet,
le double effet répété,

d'une part,

et dans l'autre entrée :

l'absence de pompage,
et 1, 2, 3 ou 4 pompages.

Et l'on distingue par exemple les cycles négatifs à ce qu'on a deux pompages opposés, ou que des pompages par vidange du bassin n'auraient de l'intérêt que si le prix de l'énergie était négatif.

Et un tableau III, aux mêmes entrées, ne coche que les 104 cycles positifs.

Mais il y a des cycles dits « d'attente », ce sont les cycles d'abord négatifs qui, contrairement aux autres, doués d'une contradiction interne, peuvent devenir positifs par combinaison avec d'autres cycles.

Et l'auteur nous énumère deux sortes de ces cycles en attente.

Il n'hésite pas, après avoir fait remarquer certaines successions de mouvements qui postulent des cycles non négatifs, à aborder l'établissement d'équations plus générales que ces remarques particulières.

Il arrive ainsi à donner une loi de récurrence pour le nombre s_n de cycles non négatifs se terminant dans la $n^{\text{ième}}$ marée avec $s_1 = 12$, $s_2 = 126$, etc.; il serait de 144.768 pour 5 marées.

Un calcul et un tableau rectifiés résultent de l'introduction d'un second membre dans l'équation aux différences secondes, rendue ainsi plus générale :

au lieu de 126 (pour 2 marées) et 144.768 (pour 5), il faut lire 138 et 160.050.

On trouve une expression asymptotique pour le nombre S_n .

Mais l'auteur s'attache surtout au calcul du

nombre des cycles en attente de premier et deuxième ordre et des cycles positifs; il donne des formules en fonction du nombre des marées consécutives englobées, établit une limite asymptotique du rapport entre le nombre de cycles positifs et le nombre total des cycles, rapport qui tend assez vite vers zéro.

On s'en rend compte en voyant le tableau du nombre des cycles de 1 à 5 marées; pour une marée, il y a 8 cycles positifs sur 16; pour 5 marées, il y a 125.888 cycles positifs sur 1.048.576 (dont 888.525 négatifs) et pour 27 marées, il y a un seul cycle positif pour 100.000 cycles négatifs ($3,24 \cdot 10^{32}$ cycles en tout).

Ce résumé, fort imparfait, laissera peut-être entrevoir à la fois la souplesse et les ressources de l'énergie marémotrice, si souple qu'on n'en peut guère demander la pleine domination à un cerveau humain normal dont la faculté d'intuition devra se superposer à l'appareil mathématique théoriquement apporté par le présent rapport; celui-ci montre en tout cas la virtuosité de son auteur et sa capacité probable à s'élever d'un ou plusieurs degrés, c'est-à-dire d'embrasser une ou plusieurs marées de plus, par rapport au dispatcher le plus éminent de la future marémotrice.

L'EXPLOITATION D'UNE USINE MARÉMOTRICE EN RÉGIME D'ÉCONOMIE DE CHARBON

PAR

M. GIBRAT, *Ingénieur-Conseil de l'E.D.F.*

L'auteur a poussé ici ses études antérieures, tout particulièrement dans deux sens nouveaux (la première extension d'ailleurs entraînant la seconde) :

- Valeur de l'unité supplémentaire d'énergie fournie en débit variable non seulement en fonction du temps, mais encore en fonction de la puissance thermique totale qu'il reste nécessaire d'appeler au même instant sur le réseau;
- Nombre des groupes en fonctionnement variable avec le temps.

Il est apparu utile, à la suite des premières études susvisées, de généraliser les équations en vue de la recherche du fonctionnement d'une marémotrice en régime d'économie de charbon (régime qui, en général, ne s'identifie pas avec celui de la production du maximum de kWh).

L'exposé présenté ne fait pas appel aux théories générales du Calcul des Variations, mais utilise la seule équation d'Euler et l'expression de la variation première.

On conçoit vite, en effet, l'intérêt de faire entrer en jeu la variation du prix de l'unité supplémentaire dès lors qu'on cherche à réaliser à chaque instant l'économie maximum de charbon dans l'ensemble du système interconnecté; cette condition suffit d'ailleurs en général à définir l'exploitation pendant la période d'été (mars-novembre) quand les considérations de pointe et de garantie ne jouent plus.

On fait entrer dans le calcul l'économie de charbon des thermiques $c(T) - c(T-P)$ procurée par l'introduction d'une marémotrice de puissance $P(t)$ permettant d'abaisser de T à $T-P$ la puissance totale demandée aux centrales thermiques; on est ainsi amené à définir

la quantité marginale de charbon économisée par chaque unité supplémentaire d'énergie marémotrice. En intégrant de 0 à P , on aboutit à une formule donnant la valeur globale de la puissance de l'usine marémotrice; et l'expression de la variation première de l'intégrale donnant cette valeur par rapport au temps entre les instants $t = t_1$ et $t = t_2$ permettra de résoudre tous les problèmes d'optimum que pose l'exploitation d'une marémotrice.

L'auteur se place d'abord dans le cas d'un départ de fonctionnement à cote fixée et cherche pour une usine monogroupe les conditions à vérifier au début du vidage pour réaliser un optimum; il faut que la variation de la recette à partir du point de fonctionnement choisi soit du second ordre; il convient donc d'annuler l'expression de la variation première. En l'absence de variation du prix, le départ se ferait à rendement maximum; mais cette variation du prix conduit à choisir un débit de départ inférieur.

Un exemple numérique illustre l'application des formules établies.

L'auteur passe ensuite au cas d'une usine à plusieurs groupes. On y glane au passage le résultat important que, si les groupes ne sont pas tous en marche, la valeur marginale de la puissance marémotrice fournie évolue en sens inverse à marée descendante et à marée montante.

Dans le cas où, lors du passage d'heure pleine en heure creuse, par exemple, il y a discontinuité, par rapport à la variable t , de la fonction $p(t, P)$ représentant le prix du kWh, et si tous les groupes ne sont pas en marche, la disconti-

nuité de p doit être compensée par une saute de puissance de P_A à P_B , telle que :

$$p(t - \varepsilon, P_A) = p(t + \varepsilon, P_B).$$

Si, au contraire, tous les groupes sont en marche, c'est la continuité du produit $p(\partial P / \partial q)$ qui doit être assurée.

Toute une série de problèmes se rattachent à l'étude du fonctionnement global d'une usine à plusieurs groupes; la plupart ont déjà été résolus par l'auteur qui en fera l'objet de publications ultérieures, et qui actuellement se borne à énumérer les principaux de ces problèmes:

- conditions de démarrage,
- départ ou arrivée à heure fixe,
- limitations différentielles telles que celles posées par la limitation de puissance de l'alternateur,
- arrivée d'une phase de vidage à simple effet,
- double effet,
- pompage,
- et, problème particulièrement délicat, détermination de la condition définissant le moment de l'abandon du fonctionnement à puissance maximum pour reprendre le fonctionnement optimum.

L'auteur se félicite de l'introduction des notions de prix variable et de colline d'ensemble qui, loin de compliquer les problèmes étudiés, ont au contraire supprimé certaines difficultés de principe apportées par le Calcul des Variations.

ÉVOLUTION CONSTRUCTIVE DES GROUPES DE L'USINE DE LA RANCE

PAR

MM. KAMMERLOCHER ET DUCLOS,

*Chef et Chef-adjoint du Service Électromécanique
de la Région d'Équipement Hydraulique n° 6 de l'E.D.F.*

Après les études particulières sur les cycles applicables à la station marémotrice et les méthodes de calcul plus ou moins créées à cette occasion, doit venir tout naturellement l'histoire de l'évolution des groupes turbo-alternateurs spéciaux, avec fonctionnement en pompe, et destinés à permettre l'équipement optimum de l'estuaire ou l'utilisation aux meilleures conditions de l'énergie disponible.

Cette histoire, pour les auteurs, ne commence qu'avec 1951, bien que, sous des formes beau-

coup moins poussées, elle remonte au moins au début des idées de marémotrices d'essai, c'est-à-dire à 35 ans environ.

L'histoire est donc prise au moment où l'on ne croit encore qu'à l'usine à simple effet (26 groupes verticaux de 8.000 kW), mais où l'évolution des idées vers l'utilisation des groupes dans les deux sens et pour le pompage se prononce.

Aussi, dans l'appel des constructeurs européens à l'étude de groupes spécialement adap-

tés, ce mode multiple d'utilisation était-il imposé, et une demi-douzaine de types furent proposés, savoir :

- groupe vertical avec aspirateurs coudés,
- groupe horizontal en puits,
- ensemble de deux turbines horizontales à roues adjacentes contrarotatives, constituant deux groupes coaxiaux tubulaires opposés avec alternateurs en puits ou en bulbe,
- groupe tubulaire à écoulement axial avec roue polaire autour de la roue de la turbine,
- groupe tubulaire axial avec alternateur en bulbe aval, totalement immergé, la roue de la turbine étant placée entre son distributeur et l'alternateur,
- groupe tubulaire identique au précédent, mais avec turbine à deux roues, pouvant être respectivement distributrice ou motrice, suivant le sens de l'écoulement.

D'une façon générale les roues, du type Kaplan, étaient prévues avec directrices mobiles pour les fonctionnements en turbine et fixes pour les fonctionnements en pompe.

Aucune proposition dérivée des groupes tubulaires avec alternateurs asynchrones dans l'huile, type Castet, n'a été présentée par les constructeurs.

L'année 1952 fut celle d'essais sur modèles de groupes axiaux polyvalents adaptés aux caractéristiques de la chute de Cambeyrac (55 m³ sous 8,25 m de chute, chute variable de 10,75 m à 3 m, différence de rendement d'un sens à l'autre de 30 à 40 %, fonctionnement en pompe dans les deux sens avec des hauteurs de refoulement variables de — 1 m à 3 m et meilleur rendement au pompage dans le sens mer-estuaire).

Il fallut adapter à ces exigences multifactes les méthodes habituelles de recherches sur modèles, et tout le monde s'y est intéressé et déclare y avoir beaucoup appris.

Pour faciliter les comparaisons, des critères conventionnels (quoique rationnels) furent arrêtés.

On retint, à la suite des essais sur modèles :

- 2 groupes de 14.000 kW, l'un en bulbe aval, l'autre en puits axial pour être montés à l'usine d'Argentat, avec fonctionnement en simple effet,
- 2 groupes de 5.000 kW en bulbe aval d'autre conception, pour être montés à l'usine de Cambeyrac avec fonctionnement en double effet.

Et, comme les types très concentrés apparaissent de plus en plus intéressants pour la Rance, on reprit une idée venue (trop tôt) en 1943, la catégorie dite « bulbe amont » (c'est-à-dire avec alternateur à l'amont du distributeur et de la roue de la turbine pour l'écoulement de l'eau en turbinage direct) pour en équiper une passe disponible de l'usine de Beaumont-Montoux sur l'Isère (8.500 kW).

Quelques particularités des trois séries de groupes d'essai sont données au rapport, notamment celle des modes de refroidissement de l'alternateur; à Argentat, circulation d'air en circuit fermé par ventilateur dans la culotte aval du bulbe, ailettes en cuivre soudées sur la tôle de la carcasse; à Cambeyrac, circuit d'air à travers les ailerons horizontaux supportant l'aval du bulbe et dans lesquels sont installés un ventilateur et un réfrigérant à circulation d'eau.

C'est le type monobloc à bulbe amont qui s'affirme préférable; il était facile de l'assembler sur une plage-atelier (poids 300 t); les conditions de visite et de réparation à raison d'un groupe par mois restaient pratiques.

La puissance nominale était fixée à 9 000 kW à 88 tr/m de la turbine, la hauteur de chute maximum de 11 m (variant de 5,50 m à 11 m avec des débits variant de 100 à 270 m³); la hauteur de refoulement maximum était de 6 m.

On songea à faire fonctionner l'alternateur dans de l'air comprimé à 3 ou 4 kg, à lui faire produire le courant à la fréquence de 16 2/3, moyennant des convertisseurs.

En fait, on y renonça plus ou moins; les pertes s'évacueraient seulement par l'enveloppe du bulbe. Et c'est sous ces données qu'on a, en juillet 1955, lancé un appel d'offres pour une nouvelle installation expérimentale en vraie grandeur dans une écluse désaffectée du port de Saint-Malo.

On pourra y essayer successivement, sous une chute maximum de 5 m seulement, deux groupes différant en quelques points, tels que constitution du monobloc, les supports de porte-à-faux de la roue, la construction des paliers porteurs, de la butée, la répartition des paliers.

Une des turbines comporte un distributeur fixe escamotable, symétrique du distributeur mobile placé entre le bulbe et la roue; sur l'autre, un guide-eau spécial réalise la prérotation de la veine liquide.

D'autres problèmes, qu'il ne faut pas qualifier de secondaires, concerneront la déshumidification de l'air de ventilation, la tenue des joints, les raccordements des circuits de contrôle, complétant le tour d'une question en gestation intense depuis quatre ans.

LA TURBINE A ADMISSION CONSTANTE ET VITESSE VARIABLE

PAR

M. LOUIS SCHWOB, *Ingénieur E.P.Z.*

L'auteur avait collaboré avant 1925 avec des demandeurs en concession pour une station marémotrice dans la baie de la Fresnaye (Côtes-du-Nord).

Il avait ainsi été amené à rechercher les instruments mécanique et électrique les plus capables du meilleur rendement à chaque stade de la transformation.

La turbine à admission et vitesse spécifique constante, c'est-à-dire à vitesse effective variable, au rendement constant à toutes les hauteurs de chute, d'autre part, la génératrice à courant continu, à intensité constante et à tension variant selon le cube de la vitesse, grâce à une double excitation (non indispensable) assurant un rendement presque constant, répondent au mieux à ces desiderata.

Cette dernière forme de la livraison du courant n'ayant pas prévalu dans le réseau français, on s'en tire avec des groupes convertisseurs (ou onduleurs transformateurs) pour assurer la liaison avec la distribution alternative.

Les groupes présentés pour La Fresnaye, ressortissant de trois types, comportaient tous l'emploi de turbines à hélice à admission constante, c'est-à-dire à aubes directrices fixes.

Deux de ces types, à axe vertical, avaient des distributeurs en chambres spirales permettant le fonctionnement des turbines dans le même sens au remplissage et à la vidange, ainsi que l'arrêt sans vannage spécial, ou bien des distributeurs en chambre ouverte et tubes d'aspiration en hydrocone.

Le troisième type suggéré avait un axe horizontal, devançant d'assez loin une technique qui s'affirme aujourd'hui.

Conçu pour répondre aux besoins spéciaux d'une marémotrice, il comporte un bloc orientable autour d'un axe vertical, selon les moments d'un cycle; il exclut aussi tout vannage supplémentaire.

Un bulbe amont abrite un engrenage à roues coniques transmettant le mouvement de l'arbre horizontal à l'arbre vertical.

La perte due à l'engrenage est compensée par le moindre poids de la génératrice.

On pensait alors à équiper de deux groupes, l'un classique (Kaplan normal à vitesse constante), l'autre s'inspirant du type 3 à vitesse variable, une petite usine souterraine dans le rocher de la pointe du Châtelet en baie de La Fresnaye.

D'après des calculs de poids et de rendement, les deux turbines devaient s'affronter avec respectivement 85 t (Fresnaye) et 140 t (Kaplan), des rendements pratiquement constants, 87 à 89 % entre 1 et 8 m de chute pour la première, plus variables et inférieurs (78 à 87 %) pour la seconde.

La simplification de la construction et la suppression des organes auxiliaires sont également en faveur de la turbine à vitesse variable.

Un calcul de puissance et de rendement global sous diverses chutes (1 à 8 m) termine le rapport et fournit des chiffres de production aux trois échelles du Châtelet, de La Fresnaye, de la Rance (1.150 millions de kWh pour cette dernière).

SUR LA POSSIBILITÉ D'UTILISER L'ÉNERGIE DES COURANTS MARINS AU MOYEN DE MACHINES ANALOGUES AUX AÉROGÉNÉRATEURS

PAR MM. REMENIERAS,

Chef du Service des Études et recherches Hydrauliques d'Électricité de France,

ET SMAGGHE,

Ingénieur au Service des Études et recherches Hydrauliques d'Électricité de France,

Les auteurs remarquent que les courants marins, malgré leur vitesse beaucoup plus faible que celle des courants aériens (1 à 5 m/s contre 45 m/s par exemple), mais à cause de la beaucoup plus grande masse spécifique de l'eau

(rapport 800 entre l'eau et l'air atmosphérique) peuvent faire produire, à un appareil marin analogue à un aérogénérateur, une énergie, par mètre carré de surface balayée, du même ordre de grandeur, voire même supérieure, et une

énergie *prévisible* liée à la marée infiniment moins capricieuse que le vent et surtout le vent de tempête, cependant le plus rentable.

Cette source d'énergie originale ne peut guère se comparer à d'autres, même à celle de la marée; mais les générateurs correspondants, construits en série, pourraient voir leur prix de revient abaissé; elle est, comme les éoliennes, une manière de doter d'installations de faible puissance certains points isolés de pays sous-développés (placés dans des conditions exceptionnellement avantageuses).

Une même hélice fonctionnant successivement dans l'air et dans une eau animée d'une vitesse 9,3 ($\sqrt{800}$) fois plus faible, ce qui est de l'ordre des phénomènes naturels, tournera 9,3 fois plus lentement et déterminera une poussée axiale et un couple moteur 9,3 fois supérieur dans l'eau que dans l'air.

La marge de sécurité à respecter à cause des vents de tempête (60 à 70 m/s contre les vents usuels les plus pratiques de 12 à 16 m/s) sera beaucoup plus faible dans l'eau que dans l'air, la tempête de mer ne modifiant pas sensiblement les courants, ni les efforts sur les corps immergés au-dessous d'une certaine profondeur.

Un générateur de 500 kW aurait, dans les deux éléments (air le premier), des diamètres respectifs de 26,50 m et de 10,50 m, des vitesses de l'hélice de 55 tr/m et de 27,5 tr/m, il exercerait des poussées respectives P et 5 P, en tournant dans des courants respectifs de 15 m/s et de 3 m/s.

On pourrait concevoir pour lui une transmission par engrenages avec une génératrice asynchrone ou un alternateur immergé dans l'huile, ou une transmission hydrodynamique analogue à celle des éoliennes à dépression pour pallier l'effet de la faible vitesse de l'hélice marine.

Les auteurs se sont appliqués à calculer l'énergie annuelle produite par un groupe générateur dans le raz Blanchart, dans le Morbihan, etc., en sommant les résultats obtenus pour trois marées caractéristiques seulement (coefficients 95,70 et 45) affectés des coefficients multiplicateurs appropriés.

Tandis que l'ordre de grandeur des kWh produits par mètre carré de générateur serait de 58.800 dans le raz Blanchart, on n'arriverait qu'à

6.200 dans le vent exceptionnel du contrefort du cap Béar (P.-O.).

Mais les fleuves rapides et profonds, au courant constant de 3 m/s, tels que le Congo, procureraient jusqu'à 71.000 kWh par m².

Le rendement énergétique global moyen varierait de 0,53 pour $V_n = 5^N$ à 0,38 pour $V_n = 3^{N,5}$; il ne différerait pas sensiblement en ordre de grandeur de celui des sites éoliens (0,4 à 0,5). Il serait meilleur (0,65) pour des sites fluviaux à courants constants.

Les auteurs fournissent (tableau III) la gradation des puissances installées et de l'énergie annuelle avec le diamètre de l'hélice.

De 2 m à 30 m de diamètre, la puissance installée varierait de 8,5 kW à 1.910 kW et l'énergie annuelle de 18.600 à 4.180.000 kWh, en admettant, bien entendu, que ces grands diamètres puissent trouver place dans la nature marine.

A cet égard, les auteurs ont tenu à indiquer au moins un schéma d'implantation de tels générateurs (fig. 1) sur un caisson échoué entre des enrochements. Ils n'en méconnaissent pas les difficultés, la sujétion du recours à des sca-phandriers, du travail à la marée, aux étales de courants. Des endroits semi-abrités seraient moins aventureux, mais correspondraient en général à des courants moindres que des « raz » forains.

Ils recommanderaient quelques installations d'essai, moins coûteuses certainement qu'une station marémotrice.

Nous ajouterons personnellement les deux réflexions suivantes :

Si le vent souffle partout dans une plaine (en Patagonie sur les 1.200 km qui séparent le 42° du 53° sud) et peut desservir au besoin chaque hacienda, il n'en est pas de même des « peignes » de courants marins aussi rarement répartis dans la nature que les pôles de grands marnages.

Il est regrettable que les auteurs n'aient pas essayé de chiffrer d'un ordre de grandeur ce que pourrait être le rendement financier d'un tel générateur marin, même avec de larges et imaginatives hypothèses sur les travaux de génie civil dont on leur aurait volontiers pardonné l'audace et l'imprécision.

C. — ESSAI DE SYNTHÈSE ET RÉFLEXIONS

Ces rapports particuliers, analysés aussi succinctement que possible, sont trop divergents pour qu'on puisse tirer d'eux-mêmes le compendium que vous devrait un rapporteur général valable.

On constatera d'abord que, hors de France,

la connaissance de nos études ne s'est pas convertie en un essai de réalisation. Des projets ont bien été élaborés ou envisagés; mais, soit parce que les données naturelles n'étaient vraiment pas favorables (Pays-Bas), impératif catégorique qui limite l'extension de cette source

d'énergie à quelques points du globe seulement, soit parce qu'on n'aime pas s'aventurer sans des certitudes et des précédents qui ne sont pas encore de mise (Angleterre), ces projets sont demeurés en sommeil définitivement ou temporairement.

En France, on a été dès le début plus hardi; on y pense même à une très vaste entreprise (Chausey) de nature à peser vraiment sur la quantité globale d'énergie disponible pour notre pays; mais on a la sagesse de commencer par un équipement de moindre envergure (la Rance) qui apprendra tout de même quelque chose sur le rendement des groupes auxquels on s'arrête aujourd'hui, sur les facilités pratiques de leur manœuvre et de leur orchestration à leur grande échelle numérique.

La fermeture d'une enceinte soumise à de violents courants figure déjà comme difficulté de génie civil et pourra servir dans une certaine mesure d'enseignement.

Le temps des réalisations ne pouvait guère venir avant que soit créé un réseau interconnecté comme celui que nous commençons de posséder en France et que nous n'avions pas il y a trente ans; le problème de la régularisation de l'énergie sauvage de la marée ou plutôt de son adaptation à la demande s'atténue ainsi; et le défaut de souplesse de cette production irrégulière a cessé d'être un cauchemar pour engendrer au contraire un art véritable de l'orchestration des cycles.

Plusieurs rapports nous montrent le gros travail accompli par nos chercheurs dans ces deux branches de l'adaptation des groupes moteurs aux conditions spéciales de leur fonctionnement et, à l'aide de hautes considérations mathématiques, celle de l'adaptation des cycles possibles à l'objectif du rendement maximum d'abord, puis de l'utilisation optimum, enfin de la valeur la plus grande des unités d'énergie produites d'après le prix variable qu'y attache la consommation.

Nous pouvons encore apprécier à d'autres points de vue, souvent très classiques, le problème de l'utilisation de l'énergie des marées; bien que souvent invoquées, ces vues ne peuvent être, dans un vaste tour d'horizon de la question, passées entièrement sous silence, bien qu'elles aient été reprises çà et là, dans les nouveaux rapports fournis pour les *IV^{èmes} Journées de l'Hydraulique*.

1° En dépit de dénominations trop uniformément chromatiques, la houille bleue, ou plus particulièrement l'énergie des marées, était, jusqu'à la découverte provenant de la fission de l'atome, la seule source qui ne fût pas due plus ou moins directement au rayonnement solaire, comme le charbon, le pétrole, les chutes d'eau,

les thermiques marines, le vent, les vagues, la chaleur de notre astre du jour.

Elle est empruntée en effet à un autre phénomène de l'univers, la force vive de rotation de la terre ou l'attraction variable des astres qui l'entourent de près. A cet égard, elle se rapprocherait plutôt de l'énergie atomique qui rompt l'attraction moléculaire.

La marée reste à peu près indépendante des mouvements atmosphériques (qui peuvent cependant l'influencer avec l'ordre du mètre en nos régions, de plusieurs mètres dans les bouches de l'Elbe ou du Gange), tandis que les marées atmosphériques ne peuvent pratiquement pas se séparer des mouvements beaucoup plus importants engendrés par la chaleur solaire.

2° Mais l'onde marée ne pourrait être directement captée si on devait la prendre telle qu'elle se présenterait en pleine mer ou sur un globe uniquement marin où les courants et la dénivellation sont très faibles. C'est grâce à des réflexions, des gonflements sur les plateaux continentaux, des résonances qu'elle s'amplifie jusqu'à 25 fois, et que se condense un peu une énergie naturellement aussi diluée.

3° Une autre qualité inhérente à la marée, c'est sa fidélité aux prévisions du calcul, aux légers imprévus près des actions atmosphériques susvisées.

On peut connaître son jeu plusieurs années d'avance, ce que ne permettent pas au même degré les débits de nos voies d'eau intérieures.

4° Malgré ce petit nombre d'invariants, les modes d'emploi de la marée ont beaucoup varié depuis le tiers de siècle que nous la voyons étudier. La captation de la marée, qui est entrée dans sa phase administrative au lendemain de la première guerre mondiale, a connu, après son ère héroïque ou imaginative, précurseur de tout progrès humain, une évolution pareille à celle de la machine à vapeur, du moteur électrique, etc.

4° *bis* Au début, il fallait avant tout régulariser cette énergie intermittente, en obturer les vides ou les faiblesses à coup de stations de houille verte, de pompage ou de thermiques.

La hantise des interruptions a fait place à une autre conception, au fur et à mesure, il faut le reconnaître, que se forgeait le réseau français avec ses interconnexions. Les à-coups de la production de la marée pouvaient se noyer dans la masse de la consommation, au moins pour les petites et moyennes stations envisagées alors, et dispenser de ces installations complémentaires qui étaient fort coûteuses et peu instructives.

4° *ter* Une troisième phase s'ouvre avec la recherche de la rentabilité maximum ou du bénéfice optimum en cherchant à adapter la production à la demande du réseau, qui est loin

d'être constante. Et il se révèle que les marémotrices n'y sont pas plus impropres que d'autres.

Le problème plus général de l'orchestration des diverses sources d'énergie se posait.

4° *quater* Il semble que ces trente années d'efforts et de recherches n'ont pas été dépensées en vain et qu'il n'y a pas trop à regretter de n'avoir pas réalisé la Rance dès le temps de l'Aber Vrac'h; car, sans doute, n'en eût-on pas tiré alors la quintessence.

Mais cette constatation constante n'est pas un motif de nouvelle abstention. Nous avons été, en France, les premiers à retourner le problème sous ses faces multiples. Nous sommes encore en tête des chercheurs; il serait désirable de le rester aussi parmi les réalisateurs.

D'autant plus qu'on trouve maintenant à cette forme d'énergie un rôle éminent à tenir dans le concert des énergies rivales avec les thermiques, les usines au fil de l'eau, les usines atomiques.

5° On n'a guère parlé de prix de revient de l'unité de l'énergie dans les divers rapports français, considération qui peut retenir les hommes d'affaires sérieux et les Etats, comme elle paraît l'avoir fait en Angleterre et aux Pays-Bas.

C'est seulement pour la Rance, où le projet a été suffisamment poussé, qu'il serait possible d'avancer un chiffre; et ce chiffre, quel qu'il soit, serait certainement plus favorable qu'avant les dernières recherches de S.E.U.M. Jusque-là, et à raison des dépenses très considérables de génie civil, les prix ne venaient en compétition qu'avec des centrales hydrauliques assez onéreuses, celles sans doute qui resteraient à équiper maintenant.

Mais précisément ces recherches ont eu pour effet de donner un sens très relatif au prix de revient du kWh, selon qu'on le compte en énergie courante ou en énergie de pointe appréciée. Il paraît donc assez vain de pousser plus loin notre curiosité.

6° L'inventaire a, bien entendu, été fait et renouvelé des ressources françaises et mondiales en matière d'utilisation des marées. Et un impératif s'est dégagé dès le stade initial des études, c'est le petit nombre des privilégiés susceptibles de bénéficier de l'énergie des marées, surtout si l'on en élimine les points où derrière ces gros bombements de la mer règnent des déserts humains et économiques.

L'utilisation de la marée ne bouleversera donc pas la face du monde, pas plus qu'elle ne l'empêchera littéralement de tourner.

C'est toujours en glanant dans les études anciennes qu'on a pu faire ressortir les causes quasi mathématiques de la rareté des sites favorables.

On est d'abord parti de la formule très simple qui donne à 10 % près le nombre de millions de kWh d'énergie naturelle annuelle ⁽¹⁾ en multipliant par 0,7 la surface du bassin à haute mer en km² et le carré de l'amplitude en mètres de la marée de coefficient 100 (ou le double de l'unité de hauteur).

Mais on n'a pas oublié d'autres critères importants comme le rapport de la section d'ouverture à la surface du bassin, les dimensions en valeur absolue, la profondeur minimum de celui-ci et de son pertuis, ses formes plus ou moins évasées, la qualité du sol de fondation sous le barrage et la cote de la couche résistante, la plus ou moins grande menace d'apports.

Et voilà pourquoi les emplacements favorables sont si rares.

La relation entre la longueur du barrage usine, l'ouvrage éminemment coûteux à construire, et le nombre de kWh annuel théorique, qui n'est pas un critérium absolu mais une indication, varie en France de 0,36 au barrage de la Rance comme à l'enceinte des Chauses, à 4,6 à l'Aber Vrac'h qui n'avait jamais que la valeur d'une station joujou, mais à 3,2 à Lorient, à 2,5 environ aux baies des Côtes-du-Nord, quelque temps prises en considération comme complètement de la Rance, 1,7 à la Somme où le sol de fondation est incertain et les mouvements de sable certains, 0,87 à la Severn moins avantageuse par conséquent que nos propres projets, à cause surtout d'un barrage plus long (3,5 km) qu'à la Rance.

Nous ne nous étendrons pas sur les études un moment effectuées sur les stations françaises comme Arcachon, La Rochelle, Le Croisic, le Morbihan, les Abers du Finistère, la baie de Terrénès, les fjords de Tréguier et du Trieux, les baies de Lanceloux, de l'Arguenon, de la Fresnaye, le havre de Rothéneuf (comme station d'essai), l'utilisation du décalage des marées de part et d'autre de la presqu'île du Cotentin (comme à travers la presqu'île de Rhuyss fermant le Morbihan, comme en Argentine à la péninsule de Valdès), la Seine, la Somme, et nous ajouterons, comme moins connue et oubliée, la première idée, assez ingrate en dépit du fort marnage, que nous ayons eu à étudier (en 1918), celle du littoral quasi rectiligne de Barneville à Port-Bail (Cotentin) où aucune anfractuosité n'amorçait un bassin naturel.

Mais ne méprisons aucun de ces balbutiements, car chacun a peut-être apporté sa pierre à l'édifice dont on croit pouvoir enfin essayer d'entreprendre la réalisation aujourd'hui.

(1) C'est-à-dire produite par turbinage instantané à la dénivellation maximum et en double effet, au remplissage et à la vidange, tous les coefficients de rendement étant égaux à l'unité.

De tout l'énorme travail de pensée qu'aura provoqué le sujet aujourd'hui soumis à vos méditations et à vos critiques, pensée non dépourvue de support puisqu'elle se sera au moins contrôlée à la petite échelle des modèles, que subsistera-t-il pour l'histoire et la satisfaction intellectuelle des générations futures?

Si même aucune réalisation ne venait dans ce siècle en vérifier la valeur et en tirer le bénéfice d'une création industrielle, bien souhaitable comme enjeu de nos longs espoirs, comme récompense des longues cogitations de maint grand chercheur, il en restera, croyons-nous, notamment d'avoir reculé les bornes de la connaissance humaine sur quelques points de la technique des groupes moteurs à fins multiples.

Il en restera plus encore la brillante et philosophique perception de la quasi-infinité des solutions possibles dans le choix des combinaisons et manœuvres d'une centrale marémotrice associée

à un réseau où se marient des énergies thermiques, hydrauliques et peut être atomiques, infini qui masque un peu la solution la plus avantageuse aux regards d'un dispatcher d'intelligence normale, mais où les raisonnements que vous avez entendus et sans doute appréciés auront permis de débrouiller un peu l'écheveau des mouvements imaginables auprès duquel la plus complexe cabine d'aiguillage n'est que jeu d'enfant, où ces raisonnements auront permis de laisser entrevoir quelques fils d'Ariane pour le chef d'un si bel orchestre; et il semble que, sur ce terrain aussi, les bornes de l'entendement humain auront été quelque peu reculées, ce dont nous devons être reconnaissants au sujet lui-même et à la S.H.F. d'avoir valu cet anoblissement et cette élévation, cette marée de la pensée humaine à partir d'une source de prime abord et, en apparence d'ailleurs trompeuse, assez simple à exploiter.

LES ÉNERGIES DE LA MER

Compte rendu intégral des QUATRIÈMES JOURNÉES DE L'HYDRAULIQUE.
de la Société Hydrotechnique de France

DEUX VOLUMES, brochés. 8 000 F

DISCUSSION

Personne n'ayant demandé à intervenir sur les rapports 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, M. LEGROS (Jeumont) prend la parole sur le rapport de M. SCHWOB : « La turbine à admission constante et vitesse variable dans l'utilisation de l'énergie des marées. »

M. LEGROS rappelle que, parmi les projets antérieurs, comme celui de M. SCHWOB, à l'étude de la Rance, Jeumont a étudié, à cette époque, pour l'Aver-Brach, un projet conçu suivant les mêmes principes (admission constante, vitesse variable), mais au lieu de machines à courant continu, il avait prévu une génératrice asynchrone liée à un changeur de fréquence à double jeu de balais, qui permettait de renvoyer l'énergie sur le réseau, quelle que soit la vitesse. Il ne semble pas que l'on revienne, pour des marémotrices, à l'idée de remplacer la variable « angle d'orientation des pales », par celle de la vitesse, car si cette idée a été adoptée à l'époque, c'est parce que la roue Kaplan était à ses débuts. On peut voir, en effet, que le système à admission constante et à vitesse variable donnerait une productibilité moindre, malgré un rendement supérieur, à puissance d'installation égale.

On pourrait imaginer que l'on dispose de la vitesse avec une roue Kaplan : ceci ne pourrait qu'augmenter la productibilité de la turbine, mais pas nécessairement la productibilité globale ; en effet, il faut toujours un appareil supplémentaire (onduleur ou changeur de fréquence) qui prélève quelques points de rendement.

De plus, si on examine les courbes $\partial N / \partial q = 0$.

$$\partial N / \partial q = 0 \quad N = C^{\text{te}}$$

on s'aperçoit que la puissance reçue pendant les grandes marées serait plus faible à vitesse variable, car c'est le couple qui limite les possibilités d'une machine électrique, et non la puissance. Or, dans ces groupes bulbes, on ne peut surdimensionner la machine électrique, car il faut respecter un certain rapport avec les dimensions de la roue.

Pour surdimensionner la machine électrique, et c'est la seule éclaircie que l'on peut voir dans la solution à vitesse variable, il faudrait arriver, pour les grosses puissances, à une solution simple de la multiplication de la vitesse entre turbines et alternateurs, mais il est à craindre que, de toutes façons, cette solution soit toujours trop onéreuse eu égard aux avantages limités que l'on peut en espérer.

A son tour, M. DUPORT apporte sa contribution à la discussion.

L'étude de turbines à vitesse continuellement variable a été poursuivie très activement au cours de recherches entreprises depuis de nombreuses années par Neyrpic, au sujet des usines marémotrices. Le fait de disposer de la vitesse n'apporte, si l'on conserve la mobilité du distributeur et des pales (Kaplan à vitesse continuellement variable), qu'un faible gain d'énergie.

Les turbines à pales fixes, ou à distributeur fixe, mais à vitesse variable, sont moins intéressantes, du point de vue production d'énergie, que les Kaplan à vitesse constante. Ce fait, surprenant *a priori*, paraît tenir au fait que si la réduction de vitesse, au moment des très basses chutes, permet d'améliorer le rendement, elle réduit, par contre, le débit et la puissance spécifique.

La variabilité de la vitesse, ainsi que M. SCHWOB l'a indiqué, semble rendre possible l'adoption de turbines

plus simples que les Kaplan : distributeur ou pales fixes, voire distributeur et pales fixes. En dehors des inconvénients énergétiques mentionnés, cela conduit à des difficultés quasi insurmontables, concernant la cavitation et le surcroît de puissance lors des plus hautes chutes.

M. DUPORT signale les études entreprises en collaboration avec l'E.D.F. pour l'application des procédés imaginés par M. le Professeur BRUN (Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines).

Il lui semble que les procédés préconisés par M. SCHWOB, pour adapter la turbine au fonctionnement à double effet et au fonctionnement en orifice, soient dépassés par les procédés actuellement retenus pour la Rance (mise en drapeau des pales et du distributeur).

Sur l'invitation du Président, M. SCHWOB prend la parole et remercie MM. LEGROS et DUPORT de leur intervention.

Il s'engage entre M. SCHWOB et M. DUPORT une discussion sur les phénomènes de cavitation et les influences des hélices à pales fixes ou mobiles.

M. DUPORT spécifie que, dans le cas des pales fixes, la cavitation est beaucoup plus importante, ainsi que l'altération des performances et, par conséquent, la chute du rendement est très nette.

Aux observations de M. DUPORT, M. SCHWOB fait remarquer que si la variation du débit de la turbine est de 33 %, celle de la puissance n'est que de 10 %. Et qu'il y aura tout de même un gain d'encombrement et de poids, qui n'est pas négligeable.

M. le Président remercie M. SCHWOB. Il se déclare persuadé que les idées rappelées au cours de ce débat permettront de soumettre un certain nombre d'études à un nouvel examen. En raison du temps limité, il invite M. SCHWOB et M. DUPORT à rédiger d'un commun accord le compte rendu de leurs réponses.

La séance est levée à 16 h 40.

RÉSUMÉ DES INTERVENTIONS DE MM. LEGROS ET DUPORT CONCERNANT LA TURBINE A ADMISSION CONSTANTE ET VITESSE VARIABLE DANS L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE DES MARÉES.

1. Les caractéristiques des génératrices directement accouplées aux turbines à vitesse variable s'accommodent mal de ces variations. Elles conduisent à la nécessité de surdimensionner les génératrices, ce qui, dans les groupes bulbes notamment, se révèle impossible.

2. Nécessité d'introduire un organe de transformation supplémentaire pour passer des groupes à vitesse variable à une production de courant alternatif sous tension et fréquence constantes.

3. Dans les turbines à aubes directrices mobiles et à rotor à pales orientables, la manœuvre des aubes ou des pales permet de fermer ou d'ouvrir l'admission des turbines. Dans les turbines à aubes et pales fixes, la fermeture ou l'ouverture de l'admission doit s'opérer par des vannes spéciales.

4. Les turbines à admission constante et vitesse variable ont effectivement un rendement sensiblement constant très voisin du rendement maximum sous toutes les hauteurs de chute. Mais la capacité de débit de ces turbines diminue assez rapidement avec la hauteur de

chute, ce qui est défavorable au cycle d'utilisation de la marée.

5. Phénomènes de cavitation nuisibles au rendement des turbines à pales fixes.

RÉPONSES

1. Si l'on adopte une commande par engrenages telle que celle prévue dans le projet des turbines axiales orientables, rien n'empêche de faire varier le rapport des engrenages au mieux des caractéristiques et des dimensions de la génératrice.

2. Un organe de transformation spécial est effectivement nécessaire si le courant produit à la sortie de l'usine doit être du type triphasé à tension et fréquence constantes. Cet organe peut être constitué par exemple par un onduleur type extérieur qui reste par conséquent en dehors de l'équipement de l'usine marémotrice proprement dite. Mais la condition de produire du courant alternatif à tension et fréquence constantes n'est elle-même nullement impérative. Nous ne l'avons admise qu'à titre provisoire et comme un pis-aller. La vraie solution est celle d'une distribution système Thury dont la ou les boucles pourraient embrocher toutes les usines marémotrices. Dans ce mode de distribution, aucun organe de transformation n'est plus nécessaire, pas même le transformateur-élévateur de tension classique au départ des usines produisant du courant alternatif. La liaison de la boucle Thury avec les réseaux existants se ferait aux centres principaux de consommation. Rappelons que le rendement d'une boucle Thury est d'autant meilleur que la charge est plus grande, ce qui est extrêmement favorable.

3. On peut, sans renoncer au fonctionnement à admission constante des turbines, prévoir des aubes directrices ou des pales de rotor mobiles jouant alors simplement le rôle de vannes entre deux positions extrêmes (fermeture totale ou ouverture maxima). Cette disposition, toutefois, supprimerait une partie des avantages de robustesse et de simplicité qu'offre la turbine à aubes directrices fixes et hélice à pales fixes.

Au surplus, les vannes d'admission des turbines servent en même temps de vannes de passage pour accélérer les débits d'écoulement en fin de période de vidange ou de remplissage, évitant ainsi la nécessité de prévoir en dehors des turbines une série de pertuis supplémentaires avec leurs propres vannages (voir projet de la Frénaye type I et II, fig. 3 et 4 du rapport). Enfin, dans le cas de turbines axiales orientables, ces dernières jouent elles-mêmes le rôle de vannes permettant la fermeture ou l'ouverture de l'admission et le libre écoulement des débits en fin de période de vidange ou de remplissage.

4. La remarque est pertinente. Il suffit d'ailleurs de se reporter aux tableaux figurant dans notre rapport et donnant les caractéristiques de la turbine à vitesse variable du type Frénaye et de la turbine à vitesse constante normale du type Kaplan pour constater que sous la chute nette de 2 m par exemple, la première ne débite plus que 31.600 l/s contre 40.600 l/s pour la deuxième (1). Si l'on s'impose de rétablir à peu près l'égalité des débits sous la hauteur de chute de 2 m, il faudra prévoir par exemple 5 turbines du type Frénaye contre 4 turbines du type Kaplan normales. Le bilan général s'établit alors comme l'indique le tableau ci-dessous :

	5 turbines à vit. variable (Type Frénaye)	4 turbines à vit. constante (Type Kaplan)
Sous 1 m :		
Débit.	111.000 l/s	pas de
Puissance.	1.300 ch	puissance utile
		sous 1 m
		de chute!
Sous 2 m :		
Débit.	158.000 l/s	162.000 l/s
Puissance.	3.700 ch	3.480 ch
Sous 8 m :		
Débit.	316.000 l/s	258.000 l/s
Puissance.	30.000 ch	24.000 ch
Poids total	425 t	560 t
Encombrement	98 m ²	92 m ²
(turbines seules.)		

On voit que ce bilan est sur tous les points en faveur de la turbine du type Frénaye, sauf un très léger avantage relatif à l'encombrement des turbines Kaplan. Mais ce n'est là encore qu'une apparence car, en fait, il faut ajouter à l'encombrement propre de la turbine du type Kaplan celui des appareils de régulation qui n'existent pas dans la turbine type Frénaye.

5. Les phénomènes de cavitation sont la bête noire des constructeurs de turbines. Ils doivent faire l'objet pour chaque type de turbine d'études spéciales contrôlées par des essais sur modèle réduit. Il est possible que le problème soit plus difficile à résoudre pour une turbine à vitesse variable que pour une turbine à vitesse constante. Toutefois le fonctionnement à vitesse spécifique constante devrait être plutôt favorable. D'autre part la turbine à pales fixes ne doit pas être constituée comme une turbine à pales orientables qui exige un moyeu de très fort diamètre destiné à contenir les organes mécaniques de commande des pales. Il ne suffit pas, par conséquent, de comparer entre eux du point de vue de la cavitation deux modèles identiques en faisant fonctionner l'un à vitesse constante, l'autre à vitesse variable. Le problème a d'ailleurs été étudié en son temps par les éminents constructeurs que les auteurs des projets de la Frénaye et du Châtelet avaient consultés. Il n'est pas apparu insoluble. A titre indicatif, les vitesses spécifiques admises à l'époque (1923 pour la Frénaye, 1945 pour le Châtelet) étaient de l'ordre de 800 à 1.000 tr/mn.

CONCLUSION

On croit pouvoir conclure de ce débat, comme a bien voulu le déclarer M. le Président, que les questions soulevées par l'utilisation de la turbine à vitesse variable méritent encore d'être approfondies. L'objection la plus sérieuse reste celle de la cavitation. Elle nécessiterait une étude systématique qui conduirait vraisemblablement à une confrontation optimale du moyeu et des pales du rotor correspondant à une vitesse spécifique déterminée (la plus favorable n'étant pas forcément la vitesse spécifique maxima).

De même, la question de la distribution courant continu série haute tension conserve encore d'éminents partisans qui y voient l'avenir des transports de force à très longue distance.

(1) Remarquons en passant que sous la chute de 1 m, la turbine Kaplan ne fournit pour ainsi dire plus de travail utile, alors que la turbine type Frénaye conserve encore un rendement de 87 % sous un débit de 22 330 l/s.