

# LES FORCES HYDRAULIQUES

## Note sur l'Utilisation des Marées.

Par G. BOISNIER, *Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.*

(SUITE ET FIN)

### CHAPITRE V

#### La Solution du Problème des Marées est-elle dans la continuité ?

Quoi qu'on fasse, avons-nous dit, il demeure impossible sans le secours d'usines étrangères, non seulement de rendre la puissance constante dans le cours d'une lunaison, mais même d'atténuer les variations moyennes qui sont considérables, — de 1 à 10 en chiffres ronds.

Par conséquent il faudra en tout état de cause avoir recours à des usines complémentaires étrangères, — nous dirons plus loin comment ces usines peuvent être conçues.

Dans ces conditions l'on peut se demander si, au lieu de se donner tant de peine pour améliorer le régime dans le cours de la demi-marée, il ne serait pas préférable de recourir à ces usines étrangères également pour la régularisation quotidienne.

Voyons donc ce qu'on pourrait faire dans cet ordre d'idées.

Si l'on se reporte au schéma du cycle « bassins associés », en s'en tenant toujours au bassin inférieur, puisque ce que l'on dira pour celui-ci s'appliquera de plano au bassin supérieur, on remarque que c'est entre 20 h. et 21 h. à l'origine et entre 1 h. et 2 h. à la fin du cycle que la chute s'abaisse rapidement ; on est donc ainsi conduit à rechercher une amélioration du régime en diminuant la durée, par suppression des régions à mauvais rendement, et par exemple à étudier ce qui se passerait si l'on commençait le remplissage aux environs de 21 h. pour le terminer vers 1 h.

En l'espèce pour que la chute au commencement et à la fin soit la même et qu'on ait pour la durée un nombre rond, le régime irait de 20 h. 45 m. à 1 h. 15 m. et durerait 4 heures et demie.

Toutefois pour les petites marées jusqu'à 5 m, 00, peut-être même 5 m, 50 d'amplitude, il y aurait dans le même ordre d'idées avantage à raccourcir à quatre heures la durée de marche, de 21 h. à 1 h.

Voyons ce que va nous donner cette solution avec le même type de turbine déjà envisagé.

A remarquer d'abord qu'en raison du fait que les minima de chute vont être augmentés, l'on pourra même pour les petites marées utiliser le volume du bassin jusqu'au niveau de la mi-marée.

A = 4 m. 4 heures de marche de 21 h. à 1 h.

$h$  min. = 1,73

$h$  moy. = 2,40

$h$  max. = 2,70

33 turbines en action.

Puissance instantanée W min. = 17.200 HP.

— W max. = 39.400

Puissance moyenne rapportée au cycle de 6 heures 22.400 HP.

A = 4 m, 60 (minimum pratique, en moyenne 350 jours par an)  
4 heures de marche, de 21 h. à 1 h.

$h$  min. = 2 m, 00

$h$  moy. = 2 m, 75

$h$  max. = 3 m, 10

36 turbines en action.

Puissance instantanée W min. = 27.000 HP

W max. = 58.000 HP

Puissance moyenne rapportée au cycle de 6 heures 31.000 HP.

A = 8 m. 4 heures 1/2 de marche de 20 h. 45 m. à 1 h. 15 m,

$h$  min. = 3 m, 17

$h$  moy. = 4 m, 75

$h$  max. = 5 m, 35

Nombre de turbines en action : 45

Puissance instantanée W min. = 72.000 HP

— W max. = 148.000 HP

Puissance moyenne rapportée au cycle de 6 heures 93.000 HP.

A = 11 m. 4 h. 1/2 de marche de 20 h. 45 m. à 1 h. 15 m. (1)

$h$  min. = 4 m, 90

$h$  moy. = 6 m, 50

$h$  max. = 7 m, 40

Nombre de turbines : 53.

Puissance instantanée W min. = 135.000 HP

— W max. = 252.000 HP

Puissance moyenne rapportée au cycle de 6 heures 161.000 HP.

Au point de vue purement hydraulique, la situation est considérablement améliorée.

D'abord les rendements en énergie sont meilleurs :

pour la marée de 4 m., 22.400 HP au lieu de 16.500, soit 35 %  
pour la marée moyenne de 8 m. 93.000 au lieu de 82.000, soit 13 %.

Ensuite la puissance instantanée ne variant que de 1 à 2, il est plus facile, si on le veut, de la rendre constante dans le cours d'une demi-marée, en faisant varier le nombre de turbines en action ; toutefois à moins d'augmenter très notablement leur nombre il faudrait encore admettre un certain fléchissement de la puissance au commencement et à la fin du cycle, du moins dans les marées de plus de 7 m, 00.

D'ailleurs du moment qu'en tout état de cause on est obligé de recourir à des usines étrangères, point n'est besoin de rechercher une régularisation parfaite par les seuls moyens hydrauliques.

La turbine Leflaive de 2500 HP sous 4 m, 30 de chute avec  $n = 55$  t. 1/2 serait évidemment mieux appropriée à ce cycle qu'au précédent, puisque les hauteurs de chute se trouvent en fait très notablement augmentées ; il est cependant probable que même avec ces nouvelles conditions il y aurait avantage à abaisser vers 3 m, 50 le maximum de rendement.

Si l'on renonce à la continuité l'on peut se demander s'il est toujours utile d'avoir un bassin inférieur, et si l'on ne ferait pas aussi bien de se borner à un seul bassin fonctionnant comme bassin supérieur pendant une durée de 4 à 6 heures suivant l'amplitude des marées.

Si tous les kilowattheures avaient la même valeur, la réponse à la question qui vient d'être posée serait évidemment affirmative.

(1) En fait on marcherait : 5 heures avec A = 10 m.  
5 heures 1/2 avec A = 11 m.  
6 heures avec A = 12 m.

En effet si au lieu d'être aménagée en bassin inférieur la Rance l'était en bassin supérieur, d'abord il ne serait pas nécessaire pour la navigation de faire un barrage à Port-Saint-Jean, le bassin se trouverait agrandi de 320 hectares à la cote des hautes mers moyennes et les puissances rapportées à la durée de 6 heures — seraient :

Marée de 4 m, 00	31.000 HP
— 4 m, 60	41.000 HP
— 8 m, 20 (1)	160.000 HP
— 11 m,00	264.000 HP

On récolterait donc 70 % de plus d'énergie avec la Rance aménagée en bassin supérieur qu'avec la Rance en bassin inférieur, mais si l'on aménageait en même temps les baies de Lancieux et de l'Arguenon, qui dans le régime continu forment le bassin supérieur associé à la Rance, on se trouverait avoir deux usines énormes fonctionnant en même temps, et qu'il faudrait équilibrer par des usines étrangères d'importance analogue.

C'est là un problème dont la solution ne saurait être improvisée.

<i>Barrage supérieur limité par le barrage ABCD</i>	<i>Barrage inférieur limité en amont à Port St-Jean en aval au barrage Pointe de la Licorne</i>
<i>Volume utile par marée moyenne A. B. 00</i>	<i>Volume utile A. B. 00</i>
54 000 000 m <sup>3</sup>	47 000 000 m <sup>3</sup>
<i>Volume utile moyen = 50 000 000 m<sup>3</sup></i>	
<i>Puissance moyenne = 93 000 HP</i>	
<i>Energie annuelle = 600 000 000 kWh</i>	

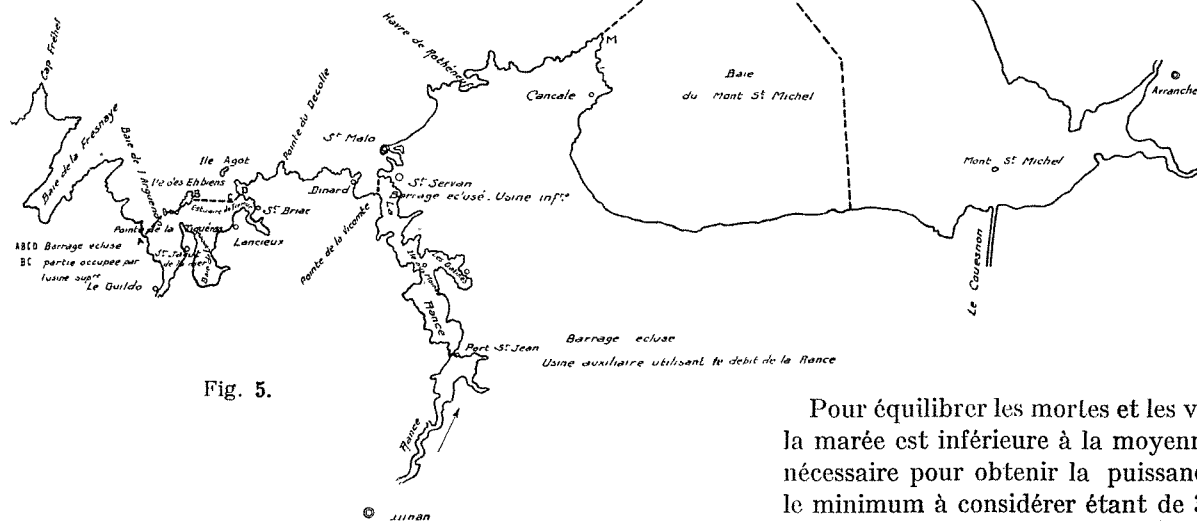


Fig. 5.

Tout ce qu'on peut dire c'est qu'il est probable que dans l'avenir la solution serait d'aménager même la Rance comme bassin supérieur, mais que pour le moment la solution la plus rationnelle paraît être celle que j'ai préconisée : association de la Rance « bassin inférieur » avec les baies de Langieux et de l'Arguenon aménagées « en bassin supérieur » et dont la carte, figure 5, donne tous les éléments.

## CHAPITRE VI

### Comment équilibrer la Puissance ?

Si l'on veut équilibrer la puissance, d'abord dans le cours d'une demi-marée, ensuite dans le cours d'une lunaison, il faut avoir recours à des usines étrangères.

Ce qu'on doit se demander tout d'abord, c'est si ces usines ne peuvent pas être alimentées par l'usine marémotrice elle-même, qui, d'abord dans le cours du cycle, accumulerait au moment où il y a excès de puissance l'énergie dans l'usine étrangère, pour

(1) Pour le bassin supérieur, la moyenne efficace est 8 m. 20 au lieu de 8 m. pour le bassin inférieur.

la rendre aux heures où chôme l'usine marémotrice, et ensuite et surtout accumulerait les gros excédents produits par les marées de vive eau pour les reprendre au moment des mortes-eaux.

Donc deux choses distinctes :

a) accumulation en quelque sorte horaire, et reprise presque immédiate, une sorte de volant pour ainsi dire :

b) accumulation continue pendant trois ou quatre jours pour reprise au bout de la semaine pendant également trois ou quatre jours.

La première solution qui se présente à l'esprit, c'est d'employer les excédents de puissance à pomper de l'eau, à l'accumuler dans un réservoir surélevé, pour ensuite la faire tomber au moment où elle sera nécessaire.

Supposons qu'on ait dans le rayon d'action de l'usine marémotrice une montagne de 500 m. d'élévation au pied de laquelle se trouve un lac (si les côtes de Bretagne étaient abruptes comme celles que forme la côte ouest de l'Amérique, on aurait la solution sous la main), il suffira après avoir construit un bassin sur cette montagne d'y monter l'eau au moyen d'une pompe mue électriquement, puis de la faire retomber dans le lac en passant sur une turbine.

Notre usine marémotrice ayant une puissance moyenne de 93.000 HP, c'est là la puissance qu'il convient de chercher à rendre constante.

Dans le cours d'une marée il faut monter de quoi donner 93.000 HP pendant le chômage de 1 h. 1/2.

Sous une chute de 500 m. le débit nécessaire est de 18 m<sup>3</sup> 6, et pour 5400 secondes c'est un volume total de 96.000 mètres cubes qu'il faut avoir à sa disposition.

Pour équilibrer les mortes et les vives-eaux, il faut pendant que la marée est inférieure à la moyenne de 8 m. ajouter ce qui est nécessaire pour obtenir la puissance moyenne de 93.000 HP ; le minimum à considérer étant de 31.000 ce sera environ les 2/3 de la différence, soit 40.000 HP en moyenne pendant 4 jours.

Le volume à accumuler pendant les quatre jours de marée abondante, sera :

$$8 \text{ m}^3 \times 4 \text{ j} \times 86.400^s = 2.760.000 \text{ m}^3.$$

Bref avec une montagne de 500 m. à sa disposition et un lac ou la mer au pied, il faudrait un réservoir d'environ 3 millions de mètres cubes pour tenir compte des pertes et des très petites marées et naturellement une conduite forcée et des pompes susceptibles de porter environ 25 mètres cubes à la seconde, enfin il faut, en turbines et alternateurs, une usine spéciale de haute chute de 93.000 HP.

Si au lieu d'avoir 500 mètres la montagne n'en a que 50, on peut dire que l'accumulation par ce moyen n'est plus réalisable à cause de la dépense qu'il faudrait faire pour créer le réservoir et établir des pompes et des conduites forcées portant 250 m<sup>3</sup> à la seconde, — deux fois le débit moyen de la Seine.

Il est évident qu'il n'y a là rien d'absolu, et que toute installation qui permettra d'accumuler de l'énergie en quantité quelconque sera utile pourvu que la dépense d'installation ne soit pas hors de proportion avec les résultats à en attendre.

Ce qu'il importe de noter, c'est que si l'on veut faire une accumulation qui ne soit pas insignifiante par rapport à l'importance de l'usine, — et dans le cas qui nous occupe on devrait considérer comme telle toute disposition qui ne permet pas d'accomplir de quoi donner un supplément d'au moins 10.000 HP pendant deux jours, — on serait conduit, même dans cette hypothèse limite, si l'on ne pouvait élever l'eau que de 50 m., à avoir des pompes et une conduite forcée d'un débit de 20 m<sup>3</sup>/seconde ; enfin le réservoir serait de 3.500.000 m<sup>3</sup>.

Je n'ai pas étudié ce que coûterait une telle installation, mais même si le réservoir pouvait être fait sans creusement, c'est-à-dire en se bornant à fermer une vallée, il semble à priori qu'on arriverait néanmoins à des dépenses énormes par rapport aux résultats.

On a parlé aussi d'utiliser l'excédent d'énergie à chauffer les chaudières d'une usine thermique.

Malheureusement si le rendement par l'effet Joule est excellent, c'est-à-dire si les calories emmagasinées dans l'eau correspondent presque intégralement à l'énergie dépensée, c'est le rendement de cette chaleur en travail mécanique qui est très mauvais, — de l'ordre 10 à 15 %.

Ce procédé ne paraît donc pas être à retenir.

En fait il semble que la solution de l'avenir consistera sans doute à ne rien équilibrer du tout par la puissance elle-même des marées, et à laisser à l'ensemble des usines de la région le soin de le faire d'une façon pour ainsi dire automatique.

Je m'explique.

Chacun sait qu'on parle de plus en plus de la création de vastes réseaux de distribution, — on a même forgé le mot de « *super-réseaux* », — où les diverses usines thermiques ou hydrauliques déverseraient à chaque instant leurs produits.

Quand cette idée sera réalisée, il est évident que le problème des marées pourra l'être également d'une façon très simple, puisque les quelques centaines de mille chevaux qu'on pourrait, par l'aménagement des baies ou estuaires qui s'y prêtent, récupérer dans la zone où les marées sont intéressantes, c'est-à-dire de Cancale à Bréhat, seraient ainsi jetés dans le réseau au fur et à mesure de leur production.

Point ne serait besoin de marier des bassins supérieurs avec des bassins inférieurs équivalents, point de nécessité non plus pour obtenir la continuité de s'astreindre à marcher sous des chutes trop faibles.

Tous les points favorables, y compris la Rance, seraient aménagés en bassins supérieurs, et fonctionneraient de 8 à 10 heures (1) par jour suivant l'amplitude de la marée.

## CHAPITRE VII

### A propos d'un Projet d'Aménagement de la Baie du Mont-Saint-Michel.

Un projet infiniment plus grandiose que celui dont j'ai exposé les lignes générales dans ma note aux Annales, — dont la carte figure 5 donne les éléments, — a été présenté à l'Administration supérieure.

Ce projet consisterait à fermer la baie du Mont-Saint-Michel par un barrage de 21 km de long allant de la pointe du Grouin, près de Cancale, à Granville.

La solution présentée par un ingénieur américain, M. de Coriolis, utiliserait ce bassin par le cycle de double effet.

J'ai dit ce que je pensais de ce cycle, j'ajouterai que surtout dans une usine de cette importance il doit être écarté à priori.

(1) En réalité, comme sur les côtes de la région de Saint-Malo, la durée du jusant est de 7 heures (tandis que celle du flot n'est que de 5 h. 1/2), les durées devraient être multipliées par  $\frac{7}{6}$ .

La seconde solution, présentée par M. Maire, ingénieur civil à Paris, serait l'application du cycle des bassins associés, et pour cela l'immense bassin isolé de la mer par le barrage frontal de 21 km serait divisé en deux par un barrage transversal.

L'ensemble des deux bassins aurait une superficie de plus de 400 kil. carrés.

Par les petites mortes eaux on pourrait réaliser une puissance minimum instantanée de quelque chose comme 300.000 chevaux ; par marée moyenne on aurait un million de chevaux.

Le barrage frontal serait, sur une longueur de 5 km, établi par des fonds de 15 à 20 m., non compris l'épaisseur à déblayer pour atteindre le rocher.

L'auteur du projet, M. Maire, évalue la dépense à 2 milliards et demi, mais il est bien difficile de dire si ce chiffre est trop faible ou trop fort et dans quelle proportion.

De tels ouvrages dépassent en effet tout ce qui s'est fait jusqu'ici, et lors même que l'on serait fixé sur la profondeur qu'il faudra réellement atteindre, on ne serait pas encore en mesure de faire une évaluation, puisqu'aucune comparaison n'est possible avec les plus grands travaux maritimes existants.

## CHAPITRE VIII

### Résumé sur l'Utilisation des Marées.

La puissance des marées varie dans de grandes proportions suivant les phases de la lune, de plus la hauteur de chute change incessamment dans le cours d'une marée et si l'on veut réaliser une marche continue il faut, même aux grandes marées, accepter des chutes relativement faibles.

Frappée de ces deux tares indélébiles, l'énergie des marées est une énergie dégradée dont la récupération est forcément plus coûteuse, — toutes choses égales d'ailleurs — que l'énergie des hautes chutes ou des cours d'eau à forte pente.

Le coût de l'énergie des marées variera d'ailleurs considérablement suivant les conditions.

Ce qui est particulièrement onéreux dans une usine de cette nature, ce sont les barrages ; or la dépense relative sera d'autant moindre qu'on aura affaire à un bassin plus grand. Dans deux bassins semblables, les surfaces et par suite les puissances sont entre elles comme les carrés des longueurs des barrages qui fermeront les entrées.

L'utilisation du havre de Roténeuf reviendrait beaucoup plus cher par cheval installé que la Rance, et de son côté la Rance serait plus coûteuse que la baie du Mont-Saint-Michel, — si toutefois l'établissement d'un grand barrage en pleine mer ne donne pas lieu à des difficultés insurmontables.

Dans le même ordre d'idées les puissances croissant comme les carrés des amplitudes, il y a le plus grand intérêt à choisir des bassins situés dans la région de Saint-Malo, où les marées ont deux fois plus d'amplitude, — c'est-à-dire énergie quadruple, — qu'à Brest ou à La Rochelle.

En matière de marées il ne faut envisager que de grandes usines, et celles qu'on établira ainsi seront comparables non pas aux anciennes usines de cours d'eau ou de montagne qui « écrémaient » en quelque sorte l'énergie disponible, mais aux usines nouvelles qui, pour tirer parti de tout, prévoient la construction de réservoirs formidables de 100, 200, 300 millions de mètres cubes, capables d'emmagasiner l'eau des crues pour la distribuer ensuite au fur et à mesure des besoins, mais qui par contre nécessitent des dépenses considérables grevant lourdement l'entreprise.

Il y a trente ans c'eût été folie de créer une usine marémotrice, aujourd'hui la question doit être étudiée complètement, il faut s'occuper des projets, car demain la réalisation sera devenue une nécessité pour le pays.