LES FORCES HYDRAULIQUES

Note sur l'Utilisation des Marées.

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

Dans une note publiée par les Annales des Ponts et Chaussées (1921-III), j'ai étudié la question de l'utilisation de l'énergie des marées, exposé quelles étaient les difficultés du problème, et recherché les moyens de le résoudre.

Puisque la Houille Blanche m'a fait l'honneur de me demander d'écrire un article sur le même sujet, je voudrais non pas me borner à un simple résumé de l'étude déjà faite, mais serrer la question de plus près, et bien montrer comment et à quelles conditions la solution peut être obtenue.

CHAPITRE I

Considérations générales.

La mer monte et s'abaisse par la marée, et d'autre part quand elle remplit ou vide des estuaires ou des golfes à entrée rétrécie il se produit des courants qui peuvent être assez violents.

Partant de ces deux faits d'observation l'on a proposé de récupérer soit la force ascensionnelle par un flotteur actionnant un moteur au moyen d'engrenages, soit la force cinétique par des roues à aubes immergées dans le courant.

Cette dernière solution peut être écartée a priori, si en effet elle était pratique, il y a longtemps qu'on l'aurait appliquée dans les fleuves qui, comme le Rhin ou le Rhône ont des courants aussi forts que ceux qu'on observe sur les côtes de la Manche par les marées de vive eau, — environ 2 à 3 mètres à la seconde, — et qui ont sur ceux-ci l'avantage d'être constants.

Si cette solution n'a jamais été cherchée c'est que des courants de cette vitesse n'ont en fait qu'une énergie cinétique insignifiante et qu'il faudrait des roues formidables pour récupérer quelques centaines de chevaux.

La force ascensionnelle ne donnerait pas de meilleurs résultats ; un flotteur de 20.000 tonnes, — un cuirassé, — ne produirait pas en moyenne plus de 80 chevaux, et cela avec quatre arrêts par jour.

Pour récupérer l'énergie des cours d'eau on crée des chutes, pour utiliser les marées il faut également une chute, et pour l'obtenir le seul moyen c'est d'avoir un bassin séparé de la mer par un barrage et communiquant avec elle par des vannes, de façon qu'on puisse, soit, s'il a été maintenu vide, le remplir quand la mer est haute, soit au contraire, s'il a été rempli à marée haute, le vider quand la mer est basse, en faisant dans les deux cas passer l'eau par des turbines.

Les « moulins à marée » qu'on rencontre un peu partout sur les côtes de Bretagne fonctionnent de cette façon.

Mais, dira-t-on, si l'on doit se borner à refaire des « moulins à marée » l'entreprise n'est pas viable, puisque les moulins actuels dont les frais d'installation sont pourtant amortis depuis des siècles, disparaissent peu à peu incapables qu'ils sont de soutenir la concurrence avec les grandes minoteries marchant à la vapeur.

À cette objection la réponse est facile.

Les moulins à marée sont comparables à tous les petits moulins de cours d'eau ; ni les uns ni les autres ne peuvent lutter contre les usines bien outillées et au fur et à mesure que les communications deviennent plus faciles le rayon d'action des grandes usines s'étend et celui des petits moulins diminue.

Le fait que les petits moulins des cours d'eau périssent de plus en plus n'empêche point les grandes usines hydrauliques d'être prospères, de même on arrivera, peut-être plus tôt qu'on ne pense, à réaliser des usines marémotrices donnant un rende-

ment industriel alors que les moulins à marée continueront à disparaître les uns après les autres.

La différence essentielle entre l'énergie des marées et celle des cours d'eau c'est que tandis que celle-ci ne varie que lentement et reste en quelque sorte constante pendant de longues périodes, l'autre est au contraire incessamment variable ; non seulement l'énergie moyenne récupérable varie de 1 à 5 en huit jours, suivant qu'on est en morte ou en vive eau, mais encore on ne peut empêcher que, dans le cours d'une même marée, la hauteur de chute ne soit également incessamment variable.

Les vieux moulins à marée s'accommodent tant bien que mal de ces conditions parce qu'ils ne marchent qu'au moment des fortes marées et seulement quelques heures par jour ; les variations peuvent ainsi être beaucoup moindres et d'autre part comme on se borne à moudre du blé, la vitesse des meules et par suite celle des moteurs peut varier sans qu'il en résulte d'inconvénient sérieux.

CHAPITRE II

Moyens de récupérer l'Énergie des Marées.

Pour récupérer l'énergie des marées, il faut avoir un vaste bassin séparé de la mer par un barrage muni de vannes et de turbines.

Le moyen qui se présente tout de suite à l'esprit c'est d'utiliser le bassin dans les deux sens, de la façon suivante :

a) Le bassin vient de terminer sa vidange et la mer est à son niveau inférieur ; on ferme les vannes et l'on attend que la mer montante ait atteint par exemple le quart de son amplitude, — soit 2 m. si c'est une marée de 8 m., — alors on ouvre les turbines et l'eau pénètre dans le bassin en travaillant ; rien n'empêche d'ailleurs de régler le débit de façon que le niveau du bassin monte aussi vite que la mer, maintenant ainsi la chute constante.

b) Une demi-heure avant le plein, on arrête les turbines, on ouvre en grand les vannes, pour que le bassin achève son remplissage avant que la mer n'ait sensiblement baissé.

c) Le remplissage terminé et le bassin étant ainsi au niveau de la pleine mer, — à quelque chose près, — on ferme les vannes et l'on attend que la mer ait baissé du quart de son amplitude — de 2 m. 00 — ; on ouvre les turbines qui, par un jeu de vannes facile à imaginer, — mais plus difficile à réaliser, — peuvent fonctionner quel que soit le côté d'où vient l'eau, et le bassin se vide en travaillant ; comme tout à l'heure la chute peut être maintenue constante.

d) Une demi-heure avant la basse mer, on arrête les turbines et l'on ouvre les vannes de façon que le bassin puisse achever de se vider avant que la mer n'ait commencé à remonter.

C'est là le cycle dit « à double effet » dont le schéma est indiqué figure 1.

Comme on le voit il y a à chaque marée deux interruptions,

Fig. 1.

Cycle du bassin à double effet. Remplissage et vidange sous charge constante.

h constant	remplissage	$\frac{A}{4}$	MN	Bassin vide.....	2 h.
			NP	Bassin travaille au remplissage.....	3 h. 30
			PQ	Bassin achève de se remplir sans travail.....	8 h. 30
	vidange	$\frac{A}{3}$	QR	Bassin plein.....	2 h. 20
			RS	Bassin travaille en se vidant.....	3 h. 10
			ST	Bassin achève de se vider sans travail.....	0 h. 30

Fig. 2. — Cycle du bassin à simple effet.

h minimum admis PP_1, NN_1 .

MN Bassin plein. NP Bassin travaille en se vidant. PQ Bassin à son niveau minimum. QR Bassin se remplit sans travailler.

Fig. 3. — Cycle des bassins associés.

Bassin supérieur B. — Bassin inférieur A.

UV Bassin B stationnaire (niveau le plus bas).
VS Bassin B se remplit sans travailler.
ST Bassin B stationnaire au plein.
TU Bassin B se vide en travaillant.

MN Bassin A stationnaire vide.
NP Bassin A se remplit en travaillant.
PQ Bassin A stationnaire (niveau le plus haut).
QR Bassin A se vide sans travailler.

Fig. 4. — Cycle des bassins conjugués.

Traits pleins. Cas des bassins équivalents.
Tirés : Bassin B plus petit que Bassin A.

$JP = UI$ = hauteur minimum à la fin du travail des bassins = KA , K étant la caractéristique du cycle.

OG Barrages pourvus de vannes.
OF Barrage portant l'usine.

RI Les deux bassins isolés de la mer ;
MU B se déverse dans A par les turbines.

IL B communique avec la mer, se remplit ;
US Mer se déverse dans A par les turbines.

LP Les deux bassins isolés de la mer ;
SS B se déverse dans A par les turbines.

PR B isolé, se déverse dans A qui est en communication avec la mer.
JM

l'une au moment du plein jusqu'à ce que la mer ait descendu de la hauteur voulue pour mettre en action les turbines, l'autre à la basse mer et jusqu'à ce que celle-ci ait remonté suffisamment.

Ainsi qu'on le montrera plus loin le cycle à double effet présente de très graves défauts et dans la plupart des cas, — on pourrait même dire dans tous les cas, — il y a intérêt, si l'on ne dispose que d'un seul réservoir à ne le faire fonctionner que dans un seul sens, — à la vidange.

Dans ce cas tout en commençant le travail lorsque la mer a baissé du quart de son amplitude, on s'arrange, en diminuant le débit des turbines, pour que le bassin mette environ 6 heures (une demi-marée) à se vider jusqu'au niveau de la mi-marée ; à ce moment-là la mer a remonté du quart de son amplitude, et la chute finale est encore de 2 m 00 comme au début du travail.

On arrête alors les turbines, le bassin est mis en communication avec la mer dès qu'elle est à son niveau moyen, le bassin se remplit et est prêt à recommencer le cycle quand la mer ayant passé par son plein a de nouveau baissé de 2 m. 00.

C'est là le cycle à « simple effet » dont le schéma est indiqué figure 2.

Dans le cycle à « simple effet » le bassin fonctionne six heures de suite, et s'arrête six heures, tandis qu'avec le cycle à double effet il y avait pendant la marée deux marches d'environ trois heures et deux arrêts de même durée.

Avec un seul bassin il est absolument impossible d'obtenir la continuité du travail, il y a forcément deux interruptions par marées si l'on marche à double effet, et une seule, mais plus longue, si l'on est à simple effet.

Pour réaliser la continuité il est indispensable d'avoir deux bassins, et alors le moyen le

plus simple consiste à les faire fonctionner chacun à simple effet, l'un marchant au remplissage pendant que se repose celui qui marche à la vidange.

Ce cycle, indiqué par la figure 3, je l'ai appelé « *cycle des bassins associés* » pour marquer qu'il s'agissait d'une liaison susceptible d'être rompue, sans que rien ne fût modifié au régime de chacun d'eux.

Ce sont là en effet deux usines isolées fonctionnant alternativement, l'une cessant il est vrai quand l'autre commence, mais qui, à part cela, pourraient tout aussi bien être complètement indépendantes et soit marcher seules, soit être associées chacune à une thermique complémentaire.

Les « *bassins associés* », et c'est là un avantage sérieux, peuvent être éloignés l'un de l'autre, il suffit qu'ils soient tous les deux branchés sur le même réseau de distribution.

Quand on dispose de deux bassins d'importance à peu près égale, et contigus, comme il est indiqué à la figure 4, on peut réaliser la continuité de fonctionnement au moyen d'une seule usine, en plaçant celle-ci sur un barrage intermédiaire O H. Les deux bassins communiquent chacun avec la mer par des vannes placées dans les barrages O G et O F.

Le cycle est indiqué par le schéma figure 4 ; et l'on a de plus indiqué en tirets comment le régime doit être modifié si le bassin B est un peu plus petit que le bassin A.

Ce cycle peut être appelé « *cycle des bassins conjugués* » pour marquer qu'une fois ainsi organisés les deux bassins, — comme deux bœufs liés par le joug, — ne peuvent travailler qu'ensemble et ne sauraient rompre leur liaison.

Ce cycle a été présenté en 1890 par M. Decœur, Ingénieur des Ponts et Chaussées, inventeur d'un type de béliet.

En fait ce cycle avait, déjà au XVIII^e siècle, fait l'objet d'un mémoire de Belidor, professeur à l'Ecole d'artillerie de La Fère

CHAPITRE III

Comparaison des divers Systèmes.

La solution du problème de récupération de l'énergie des marées a sollicité beaucoup d'inventeurs, et de nombreux systèmes ont été mis en avant et même brevetés ; quand on regarde les choses de près on s'aperçoit qu'ils se rattachent tous aux cycles que je viens de décrire.

Quelle est la valeur de ces divers systèmes et comment les comparer ?

Si l'on se borne à assimiler les bassins de la nature à des réservoirs cylindriques on ne peut tirer aucun enseignement, car les résultats sont si éloignés de la vérité qu'ils n'ont presque plus aucun sens.

Soit par exemple le cycle à double effet ; si l'on avait affaire à un bassin cylindrique dont le fond fût au-dessous du niveau des basses mers, il est évident que le travail au remplissage serait égal et symétrique au travail à la vidange, et c'est parce que l'on est, malgré soi, porté à simplifier les choses, que beaucoup de bons esprits ont préconisé ce système et le préconisent encore, sans se rendre compte que ce n'est que dans des cas tout à fait exceptionnels que le travail au remplissage dépasse la moitié du travail à la vidange, que dans les cas ordinaires il n'en est guère que le quart, ou le cinquième, et qu'en outre, par suite de la diminution du rendement des turbines sous les faibles chutes, cette infériorité est encore augmentée.

Un bassin naturel n'est point cylindrique, c'est certain, mais est-il possible d'exprimer son volume en fonction du niveau de l'eau qui y est contenue ? Eh bien ! quoique la chose puisse paraître singulière a priori, c'est cependant chose facile.

Les levés topographiques que nous avons faits dans les baies de Roténeuf et de St-Briac, le mesurage des surfaces de niveau

dans la Rance d'après la carte très précise du service hydrographique montrent que dans les limites de la marée, les surfaces couvertes aux cotes — 1, — 2, — 3, etc... 0, + 1 + 2, etc... croissent en progression arithmétique et par conséquent proportionnellement aux hauteurs.

Ainsi dans un bassin donné la surface couverte au niveau y peut être mise sous la forme :

$$(1) \quad S = S_m + ay \quad (S_m \text{ surface couverte à mi-marée, cote } 0).$$

Le volume du bassin entre les niveaux y_2 et y_1 sera :

$$V = S_m (y_2 - y_1) + \frac{1}{2} a (y_2^2 - y_1^2)$$

J'ai dit que l'expérience montrait le bien fondé de la formule (1).

Or si l'on veut bien regarder la question de près, on peut se rendre compte que ce n'est point par hasard que cette formule linéaire se vérifie en pratique, mais qu'il doit en être ainsi théoriquement.

Du moment en effet que la portion du volume que l'on considère, ne forme qu'une tranche insignifiante, 10 à 12 m. au maximum, par rapport à la surface, qui, même pour des bassins relativement petits comme Roténeuf ou Saint-Briac, mesure toujours une cinquantaine d'hectares, la fonction S qui représente la surface peut, quelle que soit sa complexité réelle, être réduite à ses deux premiers termes : $S_m + ay$ pour la faible variation de y que comporte la marée.

D'autre part, la variation du niveau de la mer peut être mise sous la forme sinusoïdale simple :

$$z = \frac{A}{2} \cos \frac{2\pi t}{\tau}$$

ou plus généralement sous une formule plus complexe :

$$z = M \cos \frac{2\pi t}{\tau} + N \sin 2 \cdot \frac{2\pi t}{\tau} + P \cos 3 \cdot \frac{2\pi t}{\tau} + \dots$$

La chute est à chaque instant exprimée par la différence de deux expressions algébriques fonctions du temps :

$$h = y - z$$

et le travail, qui dans le temps dt est le produit de la chute par le volume d'eau tombé :

$$dT = h dV$$

sera exprimé par :

$$dT = (y - z) (S_m + ay) dy$$

S_m et a sont les caractéristiques du bassin qu'on a à étudier, la fonction y , qui exprime le niveau du bassin, sera connue si l'on se donne la loi de variation.

Par exemple si le débit demeure constant on aura :

$$dV = K dt.$$

K étant déterminé par le fait que tout le volume du bassin, lequel est connu, doit s'écouler dans un temps déterminé.

Si l'on s'impose l'obligation que la puissance soit constante on aura :

$$(y - z) dV = l dt$$

l se déterminant comme il l'aurait été pour K dans l'exemple précédent.

On peut aussi adopter l'hypothèse simple que le niveau varie linéairement, c'est-à-dire que :

$$y = b + mt$$

Ainsi donc, grâce à l'hypothèse initiale faite sur l'expression algébrique du volume des bassins naturels, on peut calculer les rendements en énergie d'un bassin donné pour les différents cycles et réciproquement comparer les cycles entre eux.

Je n'entrerai pas dans le détail des calculs et me bornerai à en donner les résultats les plus importants, laissant aux lecteurs le soin de se reporter à la note parue aux Annales des Ponts et Chaussées.

Si A est l'amplitude de la marée considérée, et V le volume dont un bassin se remplit naturellement par cette marée, si de plus les étales étaient suffisants pour que ces opérations se terminent avant que la mer n'ait commencé à remonter ou à redescendre, l'énergie qu'on pourrait retirer (sauf à tenir compte du rendement des appareils) tant au remplissage qu'à la vidange, serait, montée et descente comprises :

V. A

et cela quelle que soit la forme du bassin.

Comme ni le remplissage ni la vidange ne peuvent se faire pendant l'étalement, et que d'autre part le travail des turbines doit être arrêté dès que la chute tombe au-dessous d'un certain minimum, c'est-à-dire avant que le bassin ne soit ni complètement rempli, ni complètement vidé, le travail total récupéré dans le cycle à double effet est loin d'atteindre ce maximum : V. A.

Les résultats sont d'ailleurs bien différents selon qu'on s'impose l'obligation de marcher sous chute constante, — et dans ce cas, ils varient avec la chute admise, — ou qu'on laisse la chute varier dans le cours de la marée.

Les résultats varient également, et d'une façon considérable, suivant la cote du fond du bassin par rapport à la basse mer.

Je vais indiquer ce qu'on obtiendrait dans deux cas caractéristiques.

Le premier c'est la Rance limitée à l'aval aux environs de Saint-Servan, à l'amont au passage très rétréci qui se trouve entre Port-Saint-Jean et Port-Saint-Hubert, et qu'il est nécessaire, à cause de la navigation, de fermer par un barrage éclusé, sauf dans le cas où la Rance serait utilisée uniquement à la vidange.

Ainsi limitée, la Rance forme le seul bassin important ⁽¹⁾ qui, sur les côtes de France, soit susceptible de fonctionner au remplissage avec un rendement admissible ; ce bassin conserve en effet une superficie d'environ 600 hectares couverte aux plus basses mers, et cela avec une entrée qui n'a que 900 mètres de largeur.

Le second cas sera celui du havre de Rôténeuf, caractéristique lui aussi parce qu'il est en quelque sorte le type le meilleur des bassins moyens qu'on trouve sur les côtes de Bretagne.

Si l'on veut bien faire abstraction du coefficient de rendement des turbines, c'est-à-dire qu'on supposera des moteurs hydrauliques de rendement égal à l'unité, on trouverait les résultats suivants pour une marée de 8 m. d'amplitude, c'est-à-dire pour la marée d'efficacité moyenne.

A « double effet » la Rance fonctionnant avec une chute égale au quart ⁽¹⁾ de l'amplitude donnerait pendant le cycle (remplissage et vidange) 290.000.000 Tm. ⁽³⁾

A « simple effet » au remplissage (en « association » avec un bassin supérieur situé ailleurs) on aurait 195.000.000 Tm.

A « simple effet » à la vidange on aurait.. 270.000.000 Tm.

⁽¹⁾ En divisant une grande baie, par exemple, celle du Mont St-Michel comme l'a proposé M. Maire, ingénieur civil, en deux bassins accolés, au moyen d'un long barrage de front, et d'un barrage séparatif, on peut évidemment créer de toutes pièces des bassins équivalents comme rendement, mais ce sont là des entreprises tellement formidables que leur exécution a besoin d'être étudiée d'une façon toute spéciale.

⁽²⁾ C'est là un maximum qui ne peut être dépassé sans quoi il faudrait des surfaces de vannages considérables et, par suite, un barrage extrêmement long pour pouvoir évacuer en 30 ou 40 minutes ce qui restera dans le bassin après arrêt des turbines, ou inversement pour le remplir.

⁽³⁾ Tm = tonne-mètre.

Ainsi donc l'organisation à « simple effet » à la vidange permet de récolter 93 % (270 millions au lieu de 290) de l'énergie qu'on obtiendrait avec le cycle à « double effet » ; fonctionnant comme bassin inférieur la Rance donnerait encore 67 % (195 millions au lieu de 290).

A quoi cela tient-il ?

A ce que la chute moyenne sur les turbines est beaucoup plus grande dans un cas que dans l'autre.

Dans le cycle à double effet, on est obligé, sous peine de ne faire fonctionner les turbines que trop peu de temps et surtout pour ne pas se heurter à l'impossibilité d'achever le remplissage ou la vidange, on est obligé, dis-je, de limiter la chute constante à 2 m. 00 environ pour A = 8 m. ; tandis que dans le cycle à « simple effet » la chute moyenne pour la même amplitude sera de 4 m. 25, tout en laissant 3 heures, au lieu de 30 à 40 minutes, pour achever le remplissage et la vidange.

Or, ainsi que je l'ai dit, la Rance est un cas tout à fait exceptionnel, absolument unique sur les côtes de Bretagne ; dans les cas ordinaires, — tels que le havre de Roténeuf, — le travail au remplissage cesse complètement d'être intéressant à cause du volume relativement faible qui intervient.

Le fond du havre de Roténeuf étant à la cote des basses mers de morte eau, on trouverait que dans le cycle « double effet » le travail au remplissage n'est plus que le 1/5 du travail total ; c'est presque négligeable, et dans ce cas-là en adoptant le cycle « simple effet » fonctionnant à la vidange, on récoltera plus d'énergie qu'on n'en aurait avec le cycle « double effet ».

En fait, le cycle double effet conduit non pas seulement à des difficultés, mais à des impossibilités, à cause des volumes qu'il faut faire passer par les vannes pour achever le remplissage ou la vidange.

Revenons au cas de la Rance :

Si l'on fonctionne à double effet, on aurait pour achever le remplissage après l'arrêt des turbines, à faire passer par les vannes les volumes suivants, selon qu'on adoptera telle ou telle chute, selon qu'on voudra pousser l'utilisation jusqu'à la marée de 10 m. ou celle de 11 m.

$$\text{Chute } \frac{A}{4}$$

Marée de 10 m. (petite vive eau), volume de remplissage	38.500.000 m ³
Marée de 11 m. (vive eau moyenne), volume de remplissage	40.700.000 m ³

$$\text{Chute } \frac{A}{3}$$

Marée de 10 m., volume de remplissage	50.000.000 m ³
Marée de 11 m., volume de remplissage	56.500.000 m ³

Tels sont les volumes qu'il faut faire passer par les turbines dans un temps très court, une demi-heure environ, en tout cas moins d'une heure.

Admettons 45 minutes, on voit que si le coefficient de réduction pour grandes vannes est 0,70 et que l'on envisage une vitesse moyenne de 3 m. 00 (correspondant à une charge de 0 m. 50), la surface nécessaire des vannages oscillera suivant les hypothèses entre 6.800 et 10.000 mètres carrés.

En somme, même dans l'hypothèse la plus modérée on se heurtera pour le remplissage, sinon à une impossibilité mathématique, du moins à des dépenses énormes, car la longueur du barrage devra être considérablement augmentée pour y loger les vannages nécessaires.

D'autre part, l'installation des turbines sera également très coûteuse, parce que la chute moyenne étant moindre il faudra des unités soit plus grosses, soit plus nombreuses.

Tel type de turbine capable de faire 2.500 HP sous 4 m. 30 ne donnera que 1300 HP pour chute $\frac{A}{3} = 2$ m. 70 et 1100 seulement si l'on adoptait $\frac{A}{4}$ comme chute constante dans la marée de 8 m.

En raison des difficultés et des dépenses considérables qu'entraînerait l'aménagement dans le barrage de la surface de vanage nécessaire pour fonctionner à double effet sous la chute $\frac{A}{3}$, je n'ai point indiqué plus haut quelle serait dans ce cas la récolte d'énergie ; en fait elle serait de 345.000.000 Tm (1).

Il est bien évident que quelle que soit l'hypothèse qu'on envisage pour le cycle à double effet, ce système ne saurait prévaloir et que même dans la Rance, où pourtant il se présente dans des conditions qu'on ne retrouve nulle part ailleurs, on doit lui préférer le cycle à « simple effet », — même le « simple effet » au remplissage, — qui permettra de réaliser des économies très importantes sur la construction du barrage et l'aménagement de l'usine, tout en produisant une quantité d'énergie qui ne sera pas beaucoup moindre.

Avant d'examiner en détail le cycle des « bassins associés », je vais dire un mot de celui des « bassins conjugués ».

Comme il est facile de s'en rendre compte, il faut que les deux bassins soient à peu près égaux ; s'ils sont inégaux, la puissance est limitée par le plus petit, car sauf l'amélioration relativement faible qu'on peut obtenir par décalage, tout se passera comme si l'on avait deux bassins égaux au plus petit.

Dans le cycle « bassins conjugués » la hauteur moyenne de chute est à peu près la même que dans les « bassins associés », et d'autre part la durée de remplissage (ou de vidange) d'un bassin est de 9 heures au lieu de 6 heures ; on récoltera dans les deux cas la même quantité d'énergie, mais comme avec les « bassins conjugués » on fera la récolte en 9 heures tandis que dans le cycle bassins associés on la fait en 6 heures, la puissance des « bassins conjugués » sera les $\frac{2}{3}$ seulement de la puissance qu'on aurait en « associant » seulement les mêmes bassins.

Avec les bassins conjugués il suffit d'un seul jeu de turbines, ce qui est un avantage sérieux, mais par contre il faut deux jeux de vannes, et surtout un développement de barrages beaucoup plus grand que si les deux bassins, quoique contigus, fonctionnaient comme associés.

En fait il est à présumer que, pour ces motifs, le cycle « bassins conjugués » serait à puissance égale plus coûteux comme installation que le cycle « bassins associés » tout en tirant un moindre parti des conditions naturelles.

CHAPITRE IV

Étude détaillée des « bassins associés ».

Théoriquement, rien n'est plus simple que de réaliser le travail continu, puisqu'il suffit, si l'on dispose de deux bassins à peu près égaux, éloignés ou non l'un de l'autre, de faire fonctionner l'un par vidange et l'autre par remplissage, et de commencer le travail du second précisément quand se terminera celui du premier.

Le bassin qui travaille en se vidant s'appellera bassin supérieur, l'autre bassin inférieur.

Une des premières difficultés du problème c'est de trouver un « bassin inférieur », c'est-à-dire un bassin qui à mer basse ait une étendue couverte suffisante pour emmagasiner aussitôt que la mer aura remonté du $\frac{1}{4}$ de son amplitude.

La Rance est le seul bassin qui, dans la zone où les marées ont une grande amplitude, remplisse à peu près cette condition.

Mais là n'est pas la seule difficulté.

Examinons les choses en détail.

Le schéma, figure 3, suppose que la soudure se fait au moment où la hauteur sur les turbines est $\frac{A}{4}$ et alors le bassin inférieur se remplit depuis le niveau de basse mer jusqu'à mi-marée, tandis que dans les six heures suivantes (1) le bassin supérieur se vide depuis le niveau de la haute mer précédente jusqu'au niveau moyen.

On pourrait concevoir que le fonctionnement de chaque bassin commence et se termine quand la charge est non plus $\frac{A}{4}$, mais $\frac{A}{3}$, ou $\frac{A}{5}$.

En prenant $\frac{A}{3}$, le minimum de charge se trouverait augmenté d'autant, de plus la charge moyenne serait également plus considérable, mais les volumes mis en jeu seraient notablement moindres, puisque les bassins ne se rempliraient et se videraient que sur une hauteur $\frac{A}{3}$ au lieu de $\frac{A}{2}$, aussi malgré l'augmentation de la charge moyenne, le travail produit serait moindre.

En commençant et finissant au moment où la charge est $\frac{A}{5}$ on aurait l'effet inverse : diminution et de la charge minimum et de la charge moyenne, et augmentation du volume mis en jeu ; le résultat serait une augmentation de l'énergie récoltée ; mais cette augmentation serait chèrement payée car la charge minimum étant sensiblement diminuée, les rendements seraient moins bons, les installations plus difficiles et plus coûteuses.

Pour ne pas compliquer la question, je demanderai au lecteur d'admettre, ce qui du reste est à peu près exact, que pour réaliser le travail continu le régime optimum est celui qui correspond au cas simple où le commencement et la fin du fonctionnement de chacun des bassins correspond au point où la chute est égale à $\frac{A}{4}$.

Au cours d'une marée de 8 m. 00 la chute varie de 2 m. 00 à 5 m. 50, presque de 1 à 3, mais en fait si l'on veut utiliser les marées depuis $A = 4$ m. jusqu'à $A = 11$ m. (2) on voit qu'en adoptant toujours le même régime la hauteur de chute variera depuis 1 m. 00, minimum aux marées de 4 m. 00, jusqu'à 7 m. 60, maximum pendant les marées de 11 m., soit une variation de 1 à 7 $\frac{1}{2}$.

Dans le cours d'une marée, en dépensant trois fois plus d'eau quand la chute est minimum qu'au moment où elle est maximum, on peut, théoriquement, réaliser une puissance constante, mais celle constante variera forcément d'une marée à la suivante, elle variera même d'une façon importante, — de 8.000 HP en moyenne, — et cela sans qu'il puisse y être obvié autrement que par le secours d'usines étrangères.

Voyons les choses de près.

La maison Leflaive, de Saint-Etienne, — dont les projets ont été primés au concours ouvert en 1920 par l'Administration supérieure pour le choix d'un type de turbines adéquat au régime des marées, — vient de proposer pour une usine marémotrice une turbine dont quatre exemplaires sont d'ailleurs en service à

(1) Pour la facilité du langage, je suppose que la marée dure exactement 12 heures, au lieu de 12 h. 25, et que la durée du flot est égale à celle du jusant.

(2) En fait, le minimum utile serait de 4 m. 60, car il n'y a pas par an plus de 25 à 30 marées en moyenne qui soient moindres, néanmoins très exceptionnellement, il y a même à Saint-Malo des marées de 2 m. 50 à 3 m. (le minimum serait, paraît-il, de 2 m.). L'amplitude de 11 m. est celle de vive eau moyenne.

(1) Chiffre théorique avec rendement égal à l'unité.

l'usine de Mauzac et dont les caractéristiques sont les suivantes
2.500 HP sous 4 m. 30 de chute avec rendement 0,80 et 55 tours 1/2 par minute.

D'après la courbe de rendement donnée par la maison Leflaive, j'ai cherché quels résultats donnerait la turbine en question pour les diverses hypothèses possibles.

Pour les marées de moins de 5 m. 50 on ne pourrait avec cette turbine conserver le cycle où le travail commence et finit quand la chute $h = \frac{A}{4}$, car la limite de charge au dessous de laquelle on ne saurait descendre paraît être de 1 m. 30 à 1 m. 50, on devrait donc pour les petites marées commencer le travail quand $h = \frac{A}{3}$.

Puisque, sans le secours d'usines étrangères, il est impossible d'obtenir d'un jour à l'autre une puissance constante, l'on peut se demander s'il est nécessaire de réaliser cette constance dans le cours d'une marée, et si l'on ne s'y astreint pas, la solution la plus simple est d'utiliser les turbines suivant le régime le plus favorable à l'accouplement des alternateurs, c'est-à-dire tournant à vitesse constante quelle que soit la chute.

Dans ce cas le débit augmente avec la chute, la puissance croît plus vite encore, et, pour revenir à la turbine en question, on trouve, d'après les courbes données par M. Leflaive, que l'on a pour les diverses hauteurs de chute :

n/minute	h	Q	W	ξ
55,5 tours	1 m, 50	33 m ³ ,6	350 HP	52 %
	2 m, 00	44 m ³	750 —	64 %
	3 m, 00	48 m ³ ,8	1500 —	77 %
	4 m, 30	55 m ³	2500 —	80 %
	5 m, 00	56 m ³ ,3	2990 —	79,5 %
	6 m, 00	59 m ³ ,8	3730 —	78 %
	7 m, 00	62 m ³	4450 —	77 %
	8 m, 00	65 m ³ ,7	5180 —	74 %

En faisant application à la Rance fonctionnant comme bassin inférieur pendant six heures de suite, et en admettant que dans le cours d'une même marée le nombre de turbines en action ne change pas et qu'on les laisse donner la puissance correspondant à la chute on aurait les résultats suivants :

$$A = 11 \text{ m. } \left\{ \begin{array}{l} h \text{ min.} = 2 \text{ m, } 75 \\ h \text{ moy.} = 5 \text{ m, } 75 \\ h \text{ max.} = 7 \text{ m, } 50 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Volume total passant} \\ \text{par les turbines :} \\ V = 52.000.000 \text{ m}^3. \end{array}$$

Nombre de turbines nécessaires : 41.

$$\left. \begin{array}{l} W \text{ min. } 41 \times 1300 = 53.300 \text{ HP} \\ W \text{ max. } 41 \times 4800 = 197.000 \text{ HP} \\ W \text{ moy. } 41 \times 3500 = 143.000 \text{ HP} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Volume à évacuer par} \\ \text{les vannes à la fin du} \\ \text{travail par seconde :} \\ \frac{52.000.000}{10.800^s} = 4.800 \text{ m}^3 \end{array}$$

$$A = 8 \text{ m. } \left\{ \begin{array}{l} h \text{ min.} = 2 \text{ m, } 00 \\ h \text{ moy.} = 4 \text{ m, } 20 \\ h \text{ max.} = 5 \text{ m, } 50 \end{array} \right\} V = 41.000.000 \text{ m}^3$$

$$\left. \begin{array}{l} W \text{ min.} \quad 26.000 \text{ HP} \\ W \text{ max.} \quad 117.000 \text{ HP} \\ W \text{ moy.} \quad 82.000 \text{ HP} \end{array} \right\} 35 \text{ turbines en action.}$$

$$A = 4 \text{ m. } \left\{ \begin{array}{l} h \text{ min.} = 1 \text{ m, } 33 \\ h \text{ moy.} = 2 \text{ m, } 50 \\ h \text{ max.} = 3 \text{ m, } 20 \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} W \text{ min. } 4.000 \text{ à } 4.500 \text{ HP} \\ W \text{ max. } 24.000 \text{ HP} \\ W \text{ moy. } 16.500 \text{ HP} \end{array} \right\} 15 \text{ turbines en action.}$$

Ainsi qu'on le voit la puissance varie considérablement dans le cours d'une marée, et varie d'autant plus que la marée est plus

petite ; il est évident qu'un régime aussi instable ne saurait être favorable.

Voyons par contre si l'on peut dans le cours d'une marée obtenir l'uniformité, et examinons le cas de la marée moyenne $A = 8 \text{ m.}$

D'abord, comme il est facile de la prévoir puisque l'on est obligé de dépenser plus d'eau au moment où la chute est moindre, la puissance moyenne va diminuer, elle ne sera plus que de 73.000 HP au lieu de 82.000, mais ce qui est plus fâcheux encore c'est que, à l'origine et à la fin, quand la chute n'est que de 2 m, 00 et que chaque turbine ne fournit que 750 HP, il en faudra 97, c'est-à-dire plus du double du nombre qui suffisait tout à l'heure même pour la marée de 11 m.

Au milieu du cycle 22 turbines suffiraient à donner la puissance.

Dans le premier cas c'était la puissance instantanée qui dans le cours d'une demi-marée variait de 1 à 5, maintenant ce serait le nombre de turbines qui dans le même intervalle varierait à peu près dans la même amplitude.

Il est certain qu'entre ces deux solutions extrêmes il y aurait à chercher un régime intermédiaire où dans le cours de la demi-marée varieraient à la fois la puissance instantanée totale et le nombre des turbines en action.

Néanmoins quel que soit le régime adopté, on ne peut empêcher qu'il n'y ait non seulement des variations considérables d'un jour à l'autre, — en moyenne 16.000 HP. — mais encore d'un moment à l'autre du cycle.

En fait, en adoptant un régime mixte, comme il vient d'être dit, la puissance instantanée pourraient varier seulement de 1 à 2 dans le cours d'une demi-marée, de plus le minimum instantané en petite morte eau, au lieu de descendre à 4.000 ou 4.500 HP pourrait se tenir à 10 ou 12.000 chevaux.

Mais d'un bout à l'autre d'une semaine, de la marée de 4 m. 60 (minimum pratique) à celle de 11 m., la puissance instantanée varierait cependant de 15 à 18.000 HP, comme minimum, à 150.000 HP. c'est-à-dire de 1 à 10.

On peut concevoir des dispositions qui amélioreront le régime, non pas pour mieux l'équilibrer d'un bout à l'autre de la lunaison, — ce n'est possible qu'avec le secours d'usines étrangères, — mais dans le cours de la demi-marée.

D'abord sans sortir du principe de la vitesse de rotation constante, principe auquel paraissent tenir essentiellement les fabricants de turbines et les électriciens, il y aurait sans doute intérêt à chercher un type donnant son maximum de rendement sous une chute de 2 m, 00 à 2 m, 50 (au lieu de 4 m, 30) de façon à mieux tirer parti des basses chutes de 1 à 2 m, 00, sauf à sacrifier davantage les chutes dépassant 5 m, 00, en raison de ce que les excédents d'énergie n'auront qu'une valeur plus faible.

Je sais bien qu'il y a là un autre écueil ; une turbine comme celle-là tournera moins vite encore, — 40 tours à peine, — et les constructeurs d'alternateurs s'en accommoderont peut-être difficilement.

En somme dans le cas où l'on tient au régime continu, et où par conséquent les hauteurs de chute devront descendre à 2 m, 00, 1 m, 50, voire même 1 m, 30, il semble, — comme je l'ai exposé plus longuement dans ma note aux Annales des Ponts et Chaussées, — qu'il est nécessaire que la vitesse de rotation des turbines puisse varier, deux vitesses suffiraient d'ailleurs très probablement, et par conséquent qu'on trouve un moyen d'accouplement avec les alternateurs tel que la vitesse de ceux-ci demeure cependant constante (1).

(A. suivre).

(1) Il est bien évident que si l'on produisait du courant continu cette constance, dans la vitesse de rotation, ne serait aucunement nécessaire.