

Le Problème d'Hydraulique de l'Escaut Maritime.

R. HAENECOUR,

Inspecteur général honoraire des Ponts et Chaussées.

Préface.

La période d'après guerre (1) sera vraisemblablement riche en bouleversements de toutes sortes ; les ports de mer, notamment, verront, pour la plupart, leurs conditions d'existence profondément modifiées ; les origines du trafic et l'hinterland seront changés, d'où prospérité pour les uns et décadence pour les autres, et lutte acharnée pour la conservation de leur prépondérance ou pour l'obtention de celle-ci.

D'autre part, nul ne peut prévoir les destructions que subiront encore les ports et leurs voies d'accès.

De nombreux travaux de restauration, de modification et d'amélioration seront en conséquence à étudier et à exécuter de toute urgence à ces installations ; l'Escaut Maritime n'échappera pas sans doute à ces impérieuses nécessités.

Il convient donc de ne pas être pris au dépourvu, et l'après-guerre doit trouver les ingénieurs prêts à indiquer aux pouvoirs compétents des solutions *pratiques et immédiates* aux problèmes qui seront posés par les nouvelles exigences de la navigation.

Comme nous l'avons déjà exposé dans des études antérieures, la théorie semble encore impuissante à fournir une solution aux problèmes du mouvement ondulatoire dans les fleuves et les estuaires.

(1) Le présent mémoire a été terminé en août 1944.

Il y a bien eu le cas de la fermeture du Zuiderzee, où les savants physiciens et ingénieurs des Pays-Bas qui s'occupèrent de la question parvinrent à déterminer à l'avance, avec une exactitude suffisante, mais après de longues études et des calculs minutieux, les amplitudes de marée qui se produiraient dans le Waddensee, partie non endiguée du Zuiderzee, immédiatement après l'endiguement de celui-ci; mais le problème n'était pas le même que celui qui se pose pour les fleuves à marée. Il s'appliquait plutôt à un vaste réservoir régulateur de marée. et de plus, le nouveau régime des marées que ces savants calculateurs avaient réussi à déterminer à l'avance ne constituait pas une situation d'équilibre; celle-ci exige une adaptation du lit au nouveau régime des marées qui ne se réalisera pas de sitôt (1).

Nous avons donc cru nécessaire de rassembler, dans une note succincte, les enseignements pratiques et théoriques que nous croyons d'application à l'Escaut Maritime, et qui pourront former la base de l'étude et de l'examen des nouveaux projets à examiner.

CHAPITRE PREMIER.

Considérations diverses sur l'onde marée fluviale.

I. — SITUATION D'ÉQUILIBRE DU FLEUVE.

Nous avons exposé dans des études antérieures comment, sur la côte méridionale de la Mer du Nord, les fleuves à marée peuvent prendre naissance, se développer et disparaître, à la suite d'accidents tels que ruptures des dunes, modifications dans les circonstances d'aval (amplitude de la marée) et dans celles d'amont (débit supérieur), le tout occasionné vraisemblablement par des affaissements du sol et des variations dans les précipitations atmosphériques.

Pour l'Escaut Maritime, et nous envisageons évidemment le bras occidental qui est le plus récent de tous les fleuves à marée de la côte considérée, le problème d'hydraulique soulevé par la création de cet estuaire et par l'approfondissement consécutif de l'Escaut fluvial plus en amont, peut se poser de la façon suivante, comme nous l'avons

(1) Le gouvernement néerlandais institua en 1918 une commission pour l'examen du projet de fermeture du Zuiderzee; celle-ci fut présidée par le Dr. Lorentz, professeur à l'Université de Leyden, Prix Nobel pour les sciences physiques en 1902, et publia son rapport en 1926. La méthode de calcul qui fut appliquée était due au Dr. Lorentz et à M. Thyse, Ingénieur en Chef des Travaux du Zuiderzee, Directeur du Laboratoire hydro-technique de l'Université de Delft.

exposé dans le par. 1 du chapitre III de la première des études rappelées ci-dessus (1) :

« *Etant donné qu'au XII^e siècle environ il se créa une communication entre Bath, sur l'Escaut Oriental, et un point de la côte où l'amplitude de marée devait dépasser 5 mètres, alors qu'à l'embouchure existante elle n'atteignait que 2,50 mètres environ, sachant de plus que les eaux, à fur et à mesure qu'elles s'élevèrent dans le fleuve et que le terrain s'abaissa, furent contenues latéralement par des digues établies aussi près que possible des rives, déterminer la situation d'équilibre vers laquelle le fleuve va tendre, tant en ce qui concerne le fond de celui-ci que la surface des eaux.* »

Nous avons montré dans un deuxième mémoire (2) que cette communication s'est créée par rupture des dunes dans la région des Wierlingen, et que le flot a ensuite suivi le lit d'un méandre néolithique de la lagune côtière, émissaire de celle-ci se jetant à Bath dans l'Escaut Oriental; cet émissaire fut connu de tout temps sous le nom générique de « Hont », auquel la toponymie assigne une origine incontestablement celtique. Au delà de Bath, la majeure partie du flot remonta le cours de l'Escaut déjà existant, creusant son lit et rectifiant les boucles néolithiques encore subsistantes depuis la première invasion de la marée; celle-ci datait de la formation de l'Escaut Oriental. Une minime partie du flot se déversa toutefois dans celui-ci dans la direction opposée, vers l'aval donc, puisque telle était encore la situation en 1867, lors du barrage de la branche orientale de ce fleuve.

La formation de l'Escaut Occidental débuta donc vers le XII^e siècle, et ce fleuve semble actuellement approcher de sa situation d'équilibre. A propos de cette dernière nous avons écrit au par. 3 du chapitre III du premier mémoire déjà cité :

« *Quand un fleuve tel que l'Escaut Maritime, approche de sa situation d'équilibre, son tracé, ses passes, ses chenaux, ses profondeurs et largeurs, l'amplitude de la marée, en un mot toutes les caractéristiques du lit et du cours d'eau se régularisent, c'est-à-dire qu'un régime s'établit et que le cours d'eau, de sauvage qu'il était ou plutôt apparaissait auparavant, devient plus régulier et semble obéir dorénavant à des lois déterminées.* »

(1) Etude sur la Formation de l'Escaut Maritime, *Annales des Travaux Publics de Belgique*, 1927.

(2) Formation de la côte et des fleuves à marée de Belgique — Projet d'avant-port pour Anvers, *Annales des Travaux Publics de Belgique*, 1944, fascicules d'août, octobre et décembre.

Dans cette situation d'équilibre, et pour une marée moyenne hypothétique toujours la même et un débit d'amont moyen constant, l'énergie cédée au fleuve n'est plus perdue en partie par un travail de creusement et de transport général de matériaux vers la mer comme auparavant, mais se consomme entièrement en frottements des molécules d'eau entre elles et contre les parois dans toute l'étendue du fleuve et de ses affluents soumis à la marée. Nous faisons évidemment abstraction ici du défaut de parallélisme des tranches, très sensible dans les fleuves à marée, mais non des transports locaux et temporaires de matériaux, dus à l'antagonisme du flot et du jusant dans la partie moyenne ou saumâtre du fleuve, qui continuent à absorber une partie, assez notable sans doute, de l'énergie cédée.

II. — DÉFINITION DES ÉNERGIES CINÉTIQUE ET POTENTIELLE.

Quand on s'occupe du mouvement varié des eaux dans la partie maritime d'un fleuve, on est généralement amené à suivre la méthode énergétique, qui semble conduire le plus facilement à un résultat pratique; il convient cependant de s'entendre avant tout au sujet de la valeur et de la signification des termes que l'on emploie, car la voie est dangereuse et semée d'embûches, comme nous aurons l'occasion de le signaler ci-après.

Si nous considérons premièrement un volume de liquide de masse m , son énergie est par définition le travail qu'il peut fournir en revenant au repos; cette énergie comprend une partie cinétique, due à la vitesse dont il est animé, et une partie potentielle, qui résulte de la position qu'il occupe. Si v est la vitesse moyenne des molécules de ce volume, son énergie cinétique sera égale à sa demi-force vive $\frac{mv^2}{2}$, et son énergie

potentielle devra être établie par rapport à la surface de repos.

Pour les eaux courantes se déversant en mer, la surface de repos finale est le niveau moyen de la mer; ce niveau, imparfaitement défini et mal déterminé, peut être remplacé par le niveau de mi-marée à l'embouchure correspondant à la marée moyenne hypothétique envisagée, qui diffère très peu du premier, comme nous l'avons montré dans notre second mémoire précité.

Dans les cours d'eau à marée, les sections mouillées comprennent généralement une partie située en dessous de la mi-marée à l'embouchure, et la surface des eaux s'abaisse même temporairement en dessous de ce niveau sur presque tout le parcours du fleuve. Comment faut-il dès lors déterminer l'énergie potentielle des eaux du fleuve ?

A première vue, il semble que l'on puisse calculer cette énergie, en attribuant à une tranche liquide d'épaisseur égale à l'unité, de largeur moyenne l et s'élevant d'une hauteur h au-dessus de mi-marée, une énergie potentielle égale à $\frac{lh^2}{2}$ qui correspond

au travail de la pesanteur nécessaire pour amener toutes les molécules de la masse lh dans le plan de repos. Mais, dans le fleuve à marée, le mouvement des eaux ne s'effectue pas d'une manière aussi simple; pendant le flot les eaux sont com-

primées dans le fleuve, et toutes les molécules de la tranche s'élèvent en position et acquièrent une énergie potentielle plus grande; l'inverse se produit pendant le jusan. L'énergie doit en conséquence être calculée comme suit :

1° *Tranche de largeur l, d'épaisseur égale à l'unité et de hauteur (H + h), H étant la profondeur moyenne à mi-marée.*

La tranche, en descendant à mi-marée, acquiert une largeur x donnée par l'équation $l(H + h) = l H x$; nous avons donc $x = \frac{H + h}{H}$.

Il est facile de démontrer que le travail moteur de la pesanteur est théoriquement égal à $lh\left(\frac{h+H}{2}\right)$, qui représente donc l'énergie potentielle, dépassant de $\frac{lhH}{2}$ la quantité $\frac{lh^2}{2}$ donnée ci-dessus.

Pour l'Escaut, où h ne dépasse guère 2 mètres alors que H à l'embouchure atteint 13 mètres, la différence est donc énorme.

2° *Tranche de largeur l, d'épaisseur égale à l'unité et de hauteur (H — h').*

La tranche, en remontant à mi-marée, acquiert une largeur x donnée par l'équation $l(H - h') = l H x$, d'où $x = \frac{H - h'}{H}$.

On démontre encore facilement que le travail résistant de la pesanteur est théoriquement égal à $\frac{lh'(H - h')}{2}$ et l'énergie potentielle de la tranche devient $-\frac{lh'(H - h')}{2}$.

Enfin, si nous envisageons une tranche d'unité de largeur et de hauteur (H — h'), passant à la hauteur (H + h), ou inversement, il est facile de vérifier que le travail de la pesanteur est théoriquement égal à la différence des énergies potentielles calculées suivant les formules que nous venons d'établir. Il convient évidemment de donner à H et à l une valeur moyenne correspondante à la zone dans laquelle la tranche du fleuve se déplace, soit pendant le flot, soit pendant le jusan, soit pendant tout autre intervalle considéré.

Au sujet de l'étendue de cette zone, nous ne pouvons que renvoyer le lecteur à la « Note sur les étales de courant dans l'onde marée et sur leurs lieux géométriques » par Léon Van Brabandt, Ingénieur des Ponts et Chaussées, 2° fascicule des *Annales des Travaux Publics de Belgique*, avril 1908.

Le déplacement pendant le flot atteint 14,4 km. à l'embouchure et reste à peu près constant dans toute la partie aval et moyenne du fleuve; à Wetteren il se réduit à 2200 m. Pendant le jusan, les molécules dépassent leur position initiale d'une longueur

atteignant 6400 m. à Wetteren et se réduisant progressivement à 100 m. à l'embouchure.

Il est indispensable pour le surplus, pour pouvoir suivre nos raisonnements, de consulter la planche II de cette note qui constitue une image frappante du mouvement des eaux dans le fleuve.

En résumé, pour que le travail de la pesanteur soit représenté par la différence des énergies, il faut attribuer à l'énergie potentielle une valeur qui dépend de la position longitudinale dans le fleuve de la tranche que l'on considère; l'énergie potentielle d'une tranche est donc fonction, non seulement de la position que sa surface occupe vis-à-vis du plan de repos, mais également de sa profondeur en dessous de celui-ci.

La méthode énergétique est donc d'une complexité peu ordinaire, et il faut à chaque pas se méfier pour ne pas tomber dans l'erreur.

Dans les calculs qui suivent, nous avons établi séparément les valeurs des énergies cinétique et potentielle des tranches considérées, mais nous ne donnons que les sommes algébriques de celles-ci comme résultats; les énergies potentielles sont d'ailleurs de loin prépondérantes, le maximum de l'énergie cinétique est atteint à l'embouchure vers l'heure du maximum de vitesse, 11 h. 1/4 environ, où il comprend à peine 20 p. c. de l'énergie potentielle de la tranche. Nous verrons par ces calculs que l'énergie introduite par l'amont est quasi négligeable, que celle introduite par l'aval est peu importante vis-à-vis de l'énergie correspondant au travail des forces extérieures, et que toute l'énergie du fleuve est pour ainsi dire localisée dans l'estuaire, en aval de Bath.

Bien entendu, ces formules supposent que le parallélisme des tranches soit admissible dans l'onde marée fluviale; comme en réalité nous sommes très loin de cette hypothèse, par suite notamment de la différence de densité de l'eau dans une même section, les calculs pourront donner des résultats qui ne concordent pas avec ceux de nos formules théoriques; nous signalerons les divergences en temps voulu.

III. — CALCUL DES ÉNERGIES ET DE LA PUISSANCE HYDRAULIQUE DU FLEUVE.

Nous allons essayer maintenant, par des calculs approximatifs, de déterminer l'énergie communiquée au fleuve et celle restituée à la mer pendant une marée, dont la différence, c'est-à-dire l'énergie cédée et consommée par les frottements, constitue par définition la puissance hydraulique du fleuve.

Quand, dans le mouvement uniforme des eaux courantes, on isole pendant un certain temps un tronçon de cours d'eau entre deux sections déterminées, l'accroissement de force vive est nul, le travail des forces extérieures s'équilibre, et le travail moteur de la pesanteur est consommé par le travail résistant des parois. En d'autres termes, l'énergie des eaux contenues dans ce tronçon est constante, la différence entre l'énergie introduite par l'amont et celle évacuée par l'aval est consommée par le travail des frottements.

Dans le mouvement permanent, où l'énergie des eaux contenues dans un tronçon de cours d'eau est également constante, le travail moteur des forces extérieures augmenté de l'énergie introduite, est égal au travail des frottements augmenté de l'énergie évacuée.

Pour le mouvement varié périodique de l'onde marée fluviale, nous isolerons tout le fleuve entre les barrages d'amont et la section d'embouchure, où nous introduirons les forces extérieures. Outre la variation d'énergie que subit le volume contenu dans le fleuve par suite de l'introduction des eaux de flot et d'amont et de l'évacuation des eaux de jusant, ce volume est comprimé puis détendu respectivement pendant le flot et le jusant, par l'action des forces extérieures agissant sur la section d'embouchure, et gagne puis perd ainsi une énergie correspondant au travail de ces forces. Une partie de l'énergie totale communiquée est cédée au fleuve et consommée en frottements, l'autre est emmagasinée temporairement et restituée à la mer; l'énergie du fleuve est donc variable.

L'énergie des eaux de mer introduites, et celle des eaux supérieures introduites pendant la période de flot à l'embouchure, augmentées du travail moteur des forces extérieures pendant le flot, sont ici égales au travail des frottements dans tout le fleuve pendant cette durée, augmenté de la différence entre l'énergie du volume d'eau contenu dans le fleuve et ses affluents à marée au moment de l'étalement de flot et celle du volume contenu au moment de l'étalement de jusant; nous pouvons ainsi écrire, en désignant par :

- E_o l'énergie introduite par le flot à l'embouchure,
- E_a l'énergie introduite par l'amont pendant la durée du flot à l'embouchure,
- T_{pf} le travail moteur des forces extérieures pendant le flot,
- TF_f le travail des frottements dans tout le fleuve pendant ce même temps,
- E_f l'énergie du volume contenu dans le fleuve au moment de l'étalement de flot,
- E_j l'énergie du volume contenu au moment de l'étalement de jusant,

$$(E_o + E_a) + T_{pf} = TF_f + (E_f - E_j) \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

En réalité, il faut comprendre dans le travail des frottements celui résultant des transports locaux et temporaires de matériaux, peu importants dans l'estuaire et dans la partie amont du fleuve, mais cependant assez intenses dans la région moyenne ou saumâtre. Nous avons montré dans notre première étude que dans cette dernière région, où existe le mouvement dit « secondaire », dû à la différence de densité de l'eau dans une même section, la turbulence de l'eau qui ailleurs régularise les vitesses est inexistante, et qu'il y a dans cette région antagonisme complet entre le flot et le jusant; ce phénomène provoque un transport notable de matériaux dans les deux sens à chaque marée, particulièrement intense dans le coude de Bath.

Si nous considérons maintenant la durée du jusan, pendant lequel les eaux du flot et celles d'amont introduites pendant toute une marée dans le fleuve sont expulsées de celui-ci, nous pouvons écrire de la même façon, en désignant par :

E'_o l'énergie des eaux expulsées,

E'_a l'énergie introduite par l'amont pendant le jusan à l'embouchure,

T_{pj} le travail résistant des forces extérieures pendant ce temps,

TF_j le travail des frottements pendant cette même durée,

$$(E'_a - E'_o) - T_{pj} = TF_j - (E_f - E_j) \quad . \quad . \quad (2)$$

En ajoutant membre à membre les égalités (1) et (2) et en désignant par TF le travail des frottements pendant toute une marée, on trouve

$$(E_o - E'_o) + (E_a + E'_a) + (T_{pj} - T_{nj}) = TF \quad . \quad . \quad (3)$$

La partie de l'énergie de l'onde marée cédée au fleuve augmentée de l'énergie introduite par l'amont et du travail moteur des forces extérieures, est donc égale au travail des frottements, *ce qui était d'ailleurs évident à priori, puisque nous avons supposé le fleuve en état d'équilibre et que nous considérons une marée moyenne hypothétique constante.*

Nous calculerons premièrement d'une façon approximative les valeurs des différents termes du premier membre de l'équation (3), en supposant l'onde marée fluviale constituée par l'onde moyenne envisagée par M. Van Brabandt pour la période de 1888-1895, et utilisée dans sa note déjà citée; cette onde est figurée sur la planche II de cette note. Pour plus de facilité, nous exprimerons ces valeurs en fonction d'un élément connu des circonstances d'aval, ω_o ou l_o , c'est-à-dire la section ou la largeur moyenne à mi-marée à l'embouchure, et nous prendrons $\omega_o = 13 l_o$; nous pourrons donc comparer ainsi ces différentes valeurs. Rappelons enfin que l'énergie cinétique est toujours positive quel que soit le sens du mouvement, et que l'énergie totale d'une molécule ou d'un volume peut être positive ou négative.

Dans les calculs, nous supposerons la vitesse des courants de flot et de jusan variable suivant les courbes indiquées par M. Van Brabandt (1), et nous conserverons l'origine des temps à marée haute à l'embouchure, comme l'a fait cet auteur; nous placerons pour le surplus l'étale de jusan à 7 h. 1/2 et l'étale de flot à 1 h., moments qui diffèrent très peu de la réalité, et nous estimerons la durée de la marée à 12 h. 1/2.

(1) Voir recueil de documents relatifs à l'Escaut Maritime, 1907. (Ministère des Travaux Publics.)

En divisant ensuite la marée en intervalles d'une heure, sauf de 7 h. à 7 h. 1/2 à la fin du jusan, de 7 h. 1/2 à 8 h. au commencement du flot et de 12 h. à 12 h. 1/2 ou 0 h., moment de la marée haute, et en supposant les vitesses moyennes v dans ces intervalles constantes pendant la durée de ceux-ci, nous pouvons faire les calculs de la façon suivante :

1° *Valeur de E_o en tonnes-mètres.*

Les énergies cinétique et potentielle introduites par heure sont données par les formules suivantes, en désignant par ω les sections moyennes dans les intervalles, et par h les distances des milieux des intervalles à la mi-marée (+ 2,20) :

$$E_{oc} = \frac{60 \times 60}{2 \times 9,81} \times \omega v^3 = \frac{60 \times 60}{2 \times 9,81} \times \omega_o \left(1 + \frac{h}{13}\right) v^3$$

$$E_{op} = \frac{60 \times 60}{2 \times 13} \times \omega_o h (13 + h) v.$$

Il convient de ne pas perdre de vue que pour les points milieux des intervalles situés en dessous de mi-marée, h est négatif, et que E_{op} est alors affecté du signe moins.

On trouve ainsi que

$$E_o = (-116 - 712 - 541 + 1061 + 3270 + 1726 + 1040) \omega_o$$

ou bien
$$E_o = (-1369 + 7097) \omega_o = 5728 \omega_o \text{ tm.}$$

Il y a donc restitution d'énergie à la mer au commencement du flot.

2° *Valeur de E'_o .*

On trouve de la même façon que

$$E'_o = (521 + 770 - 167 - 1419 - 2279 - 1372 - 132) \omega_o$$

ou bien
$$E'_o = (1291 - 5369) \omega_o = -4078 \omega_o \text{ tm.}$$

Il y a donc communication d'énergie au fleuve à la fin du jusan, et l'énergie communiquée dépasse même celle restituée à la mer.

3° *Valeur de $(E_a + E'_a)$.*

Nous négligerons l'énergie cinétique des eaux supérieures, elle est d'ailleurs nulle dans le cas d'un déversoir, et de très peu d'importance en tout cas vis-à-vis de l'énergie de l'onde marée fluviale et du travail des forces extérieures, comme nous le verrons ci-après.

Pour pouvoir comparer cette valeur avec les autres, il faut l'exprimer également en fonction de ω_o . Nous utiliserons dans ce but la propriété signalée par M. Van Brabandt dans sa note déjà citée, que les eaux de jusan s'avancent de près de 100 m. au delà de l'embouchure.

Nous avons donc approximativement :

$$\text{Débit total d'amont} = 100 (\omega_o - 1,58 l_o) = 100 \left(1 - \frac{1,58}{13}\right) \omega_o,$$

soit, $87,8 \omega_o m^3.$

En supposant maintenant que les volumes des différents débits d'amont soient tous introduits à la cote (+ 3,50) de la mi-marée à Gentbrugge, dans des lits tous à la cote (+ 0,70) du fond du fleuve en cet endroit, la partie du débit total située au-dessus de la mi-marée à l'embouchure est égale à

$$87,8 \omega_o \frac{3,50 - 2,20}{3,50 - 0,70} = 40 \omega_o m^3.$$

La cote du fond du fleuve à Gentbrugge étant (+ 0,70), H est égal à (2,20 — 0,70) ou 1,50 et l'énergie communiquée par l'amont est donc de

$$40 \omega_o \frac{1,5 + 0,7}{2} = 56 \omega_o tm.,$$

dont $\frac{56 \times 6}{12,5}$ ou 27 ω_o pendant le flot et 29 ω_o pendant le jusant.

4° Valeur de (Tpf — Tpj).

En opérant comme pour le calcul des énergies introduites à l'embouchure, c'est-à-dire en supposant les pressions constantes pendant les intervalles horaires et égales à celles des points milieux de ceux-ci, nous trouvons comme valeur approximative

$$\text{de Tpf, } 101520 \omega_o tm. \text{ et de Tpj, } 90900 \omega_o tm.;$$

nous avons donc $Tpf - Tpj = 10620 \omega_o tm.$

5° Puissance hydraulique.

En remplaçant maintenant dans l'équation (3) ci-dessus nous obtenons :

$$9806 \omega_o + 56 \omega_o + 10620 \omega_o = TF$$

ou bien $TF = 20482 \omega_o tm. \text{ par marée.}$

Ce nombre doit être considéré comme une valeur approchée de la puissance hydraulique du fleuve pour la marée moyenne de la période 1888-1895. L'onde marée et le débit d'amont interviennent donc pour 48 p. c. dans cette valeur.

En prenant pour ω_o la valeur 75400 m³, nous obtenons par seconde une puissance moyenne égale à $\frac{20482 \times 75400}{12,5 \times 60 \times 60}$ ou 34320 tm., soit

environ 457000 chevaux-vapeur; cette énorme puissance est fournie par l'onde marée de la mer du Nord, sauf l'infime partie due au débit supérieur.

Faisons observer immédiatement que ce serait une erreur de croire que la puissance hydraulique est uniquement fonction de la section à mi-marée à l'embouchure, car le multiplicateur 20482 de ω_0 est fonction de toutes les circonstances d'aval et d'amont et de toutes celles du lit de la situation d'équilibre.

Il convient aussi de faire remarquer que les énergies communiquées par les forces extérieures, le débit supérieur et par le flot et le jusan sont confondues dans le fleuve, et que la distinction faite dans leurs origines ne sert qu'à permettre le calcul de ces énergies.

Les énergies communiquées au fleuve par le flot et le jusan, par le débit supérieur, et par le travail des forces extérieures pendant le flot, s'élèvent à :

$$(7097 + 5369) \omega_0 + 56 \omega_0 + 101520 \omega_0 \text{ ou } 114042 \omega_0 \text{ tm.};$$

celles restituées par le flot et le jusan et par le travail des forces extérieures pendant le jusan, à :

$$(1369 + 1291) \omega_0 + 90900 \omega_0 \text{ ou } 93560 \omega_0 \text{ tm.}$$

La différence ou la puissance hydraulique, soit 20482 ω_0 tm. s'élève donc à environ 18 p. c. seulement de l'énergie communiquée; l'onde marée ne restitue que 21 p. c. environ de l'énergie qu'elle a communiquée au fleuve avec les eaux d'amont, tandis que l'énergie restituée par le travail des forces extérieures pendant le jusan s'élève à environ 90 p. c. de l'énergie communiquée par ces mêmes forces pendant le flot.

Le rendement du travail des forces extérieures au bénéfice de la puissance hydraulique est donc faible.

Pour continuer le problème que nous nous sommes posé, il faudrait encore à l'aide des équations (1) et (2) déterminer TFf et TFj en calculant ($E_f - E_j$), car il n'est pas possible de calculer même approximativement le travail des frottements, qui doit comprendre celui nécessaire au déplacement local des matériaux dans le fleuve, assez notable dans la zone moyenne comme nous l'avons déjà exposé. Nous pouvons évidemment calculer séparément les valeurs de E_f et de E_j à l'aide des formules que nous avons établies, mais nous n'obtenons ainsi, et c'est là un des pièges de la méthode énergétique, que le travail théorique de la pesanteur, basé sur un parallélisme rigoureux des tranches.

Ainsi, en calculant les énergies par unité de longueur dans le fleuve, aux différents postes marégraphiques, où les variables v et h sont connues, pour les axes instantanés à l'étale de flot et de jusan à l'embouchure, et en prenant des énergies moyennes pour chaque intervalle entre les différents postes, nous obtenons :

$$E_f = 42720 \omega_0 \text{ tm.}, \quad E_j = -26300 \omega_0 \text{ tm.},$$

d'où

$$(E_f - E_j) = 69020 \omega_0 \text{ tm.}$$

Il est facile de voir que cette valeur théorique est trop faible, car en la substituant à l'expression $(E_f - E_j)$ dans les équations (1) et (2), la première donne TFf plus grand que TF , et la seconde TFj plus petit que zéro, ce qui est absurde.

Nous serions arrêtés dans nos calculs si une particularité heureuse dans ces formules ne nous serait pas venue en aide; en effet, nous montrerons plus loin que TFf est sensiblement égal à TFj , ce qui permet d'éliminer ces deux inconnues par soustraction des équations (1) et (2) et de déterminer la valeur approximative de $(E_f - E_j)$.

Nous obtenons ainsi :

$$(E_o + E_a) + Tpf - (E'_a - E'_o) + Tpj = 2(E_f - E_j) \quad (4)$$

$$\text{c.-à-d. } 5755 + 101520 - 4107 + 90900 \text{ ou } 194068 \omega_o = 2(E_f - E_j)$$

$$\text{d'où} \quad (E_f - E_j) = 97034 \omega_o \text{ tm.};$$

l'équation (3) donne d'ailleurs directement :

$$TFf = TFj = \frac{TF}{2} = 10241 \omega_o \text{ tm.}$$

La valeur réelle approximative de $(E_f - E_j)$ dépasse donc de 40 p. c. environ sa valeur théorique, et les valeurs de E_f et de E_j établies ci-dessus doivent en conséquence être considérées comme étant inférieures d'environ 40 p. c. à la réalité. Bien qu'il soit sans utilité pour le but que nous poursuivons de nous engager plus loin dans cette dangereuse voie du calcul énergétique, nous croyons cependant devoir signaler que le calcul de l'énergie contenue dans le fleuve montre que celle-ci est localisée en grande partie en aval de Bath. Ainsi, le calcul de E_f donne pour l'énergie en aval de cet endroit 36670 ω_o tm. et 6050 ω_o tm. en amont; au delà d'Anvers, l'énergie du fleuve en amont est quasi nulle vis-à-vis de celle en aval.

Il est d'autre part évident que les valeurs que nous avons calculées pour les énergies introduites sont aussi sujettes à caution et qu'elles devraient être modifiées également de façon notable par un coefficient de correction approprié, ce qui augmenterait légèrement la puissance hydraulique déjà indiquée.

IV. — ENERGIE LATENTE ET DIAGRAMME ÉNERGÉTIQUE DU FLEUVE.

L'énergie des eaux contenues dans le fleuve est donc variable, mais passe périodiquement par les mêmes valeurs, bien entendu toujours pour l'onde marée moyenne et constante considérée. Nous désignerons cette énergie sous le nom de « *latente* »; nous avons vu qu'elle est positive à l'étalement de flot à l'embouchure, négative à l'étalement de jusant au

même endroit, elle passe donc deux fois par zéro dans l'intervalle d'une marée.

Pour montrer clairement le processus de la transmission de l'énergie au fleuve, nous avons premièrement construit le diagramme des énergies introduites dans le fleuve (fig. 1 ci-après).

Avec le temps comme abscisse à partir de l'étale de jusant (7 h. 1/2), nous avons porté en ordonnée l'énergie par seconde fournie par l'onde marée et le débit supérieur ou bien celle restituée à la mer, calculées comme indiqué ci-dessus au milieu de chaque intervalle horaire; nous obtenons ainsi la courbe de l'énergie introduite par seconde, dont les ordonnées positives représentent les énergies communiquées et les négatives les énergies restituées.

Nous avons ensuite porté en ordonnée, à la fin de chaque intervalle horaire, l'énergie totale cédée au fleuve par l'onde marée et le débit d'amont; nous obtenons ainsi la courbe OABCD présentant une partie négative au commencement du flot jusque peu après 11 heures, et des parties décroissantes là où les énergies introduites par seconde sont négatives. Cette courbe a une tangente horizontale au droit des instants où l'énergie par seconde est nulle, c'est-à-dire à 0 h., peu avant 10 h., à 1 h., vers 3 h. 1/2 et à 7 h. 1/2.

Ces deux courbes constituent le *diagramme des énergies introduites dans le fleuve par les débits d'aval et d'amont*.

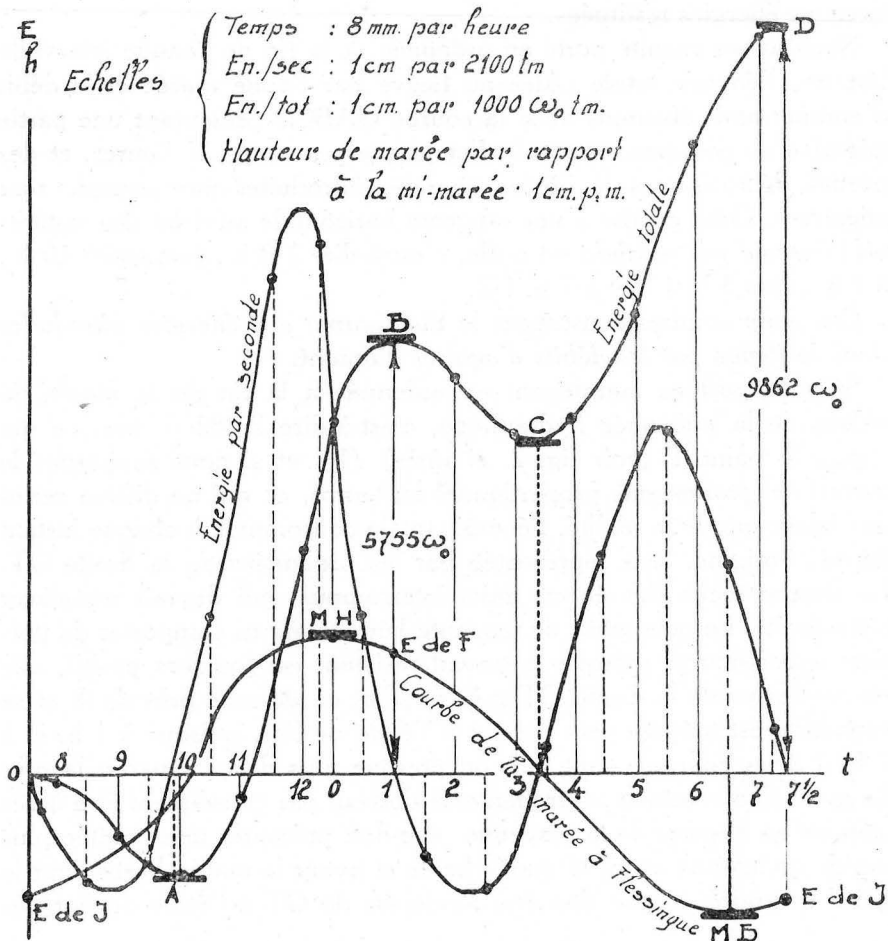
Si nous portons maintenant en ordonnée à la fin de la marée, la valeur de la puissance hydraulique, c'est-à-dire 20482 ω tm., ce qui donne le point T (voir fig. 2. ci-après) (1), et si nous supposons le travail des frottements proportionnel au temps, ce qui ne diffère certes pas beaucoup de la réalité, l'énergie totale consommée à chaque instant depuis l'origine, sera représentée par les ordonnées de la droite OT. La courbe réelle figurée en traits interrompus, qui devrait remplacer cette droite, ne peut avoir de tangente horizontale ni comporter de parties décroissantes, puisque le travail résistant est toujours positif, elle est au-dessus de la droite OT près de T et en dessous près de 0, et sa convexité est tournée vers le haut à l'étale de flot, puisque à 1 h. et à 7 h. 1/2 les courants sont nuls ou presque nuls dans la partie la plus large du fleuve et que les frottements doivent par conséquent être à ces instants en dessous de la moyenne, elle doit présenter une montée plus rapide qu'ailleurs avant la marée haute et avant la marée basse pour le motif contraire, et elle doit être au-dessus de OT à l'étale de flot, les

(1) L'échelle des énergies de la fig. 1 a dû être fortement réduite dans la fig. 2 à cause de la disproportion existant entre le travail des forces extérieures et l'énergie introduite.

FIG. 1 DIAGRAMME

DES

ENERGIES INTRODUITES DANS LE FLEUVE
PAR LES DEBITS D'AVAL ET D'AMONT
(Marée moyenne de la période 1888-1895)



ESCAUT MARITIME

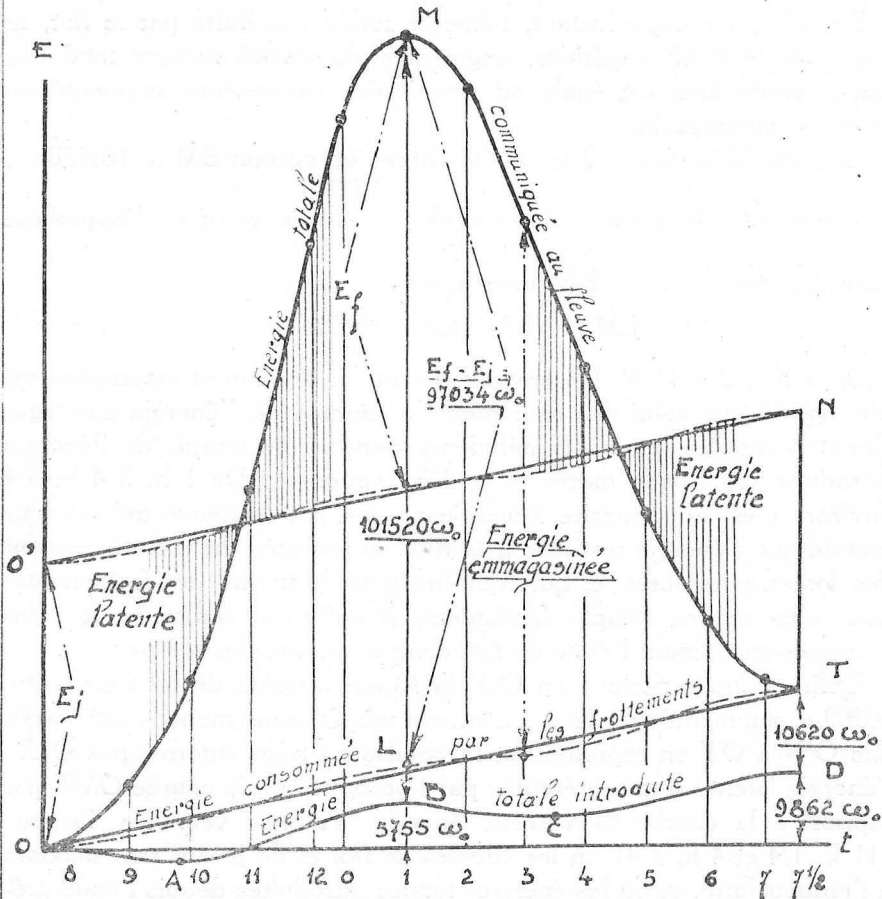
R. HAENECOUR

FIG. 2

DIAGRAMME ENERGETIQUE DU FLEUVE

(Marée moyenne de la période 1888-1895)

Echelles { Temps · 8mm. par heure
En./tot · 1mm. par 1000 ω_0 1m.



sections mouillées étant plus grandes pendant le flot que pendant le jusant; cette courbe OLT ne peut donc différer de beaucoup de la droite OT.

Toutes ces conditions ne peuvent être remplies que par une courbe telle que celle indiquée en traits interrompus et il est visible que TF_i est sensiblement égal à TF_j comme nous l'avons avancé plus haut.

Si nous portons en outre en ordonnée, au bout des intervalles, au-dessus de la courbe OABCD, la valeur du travail moteur des forces extérieures, calculée comme nous l'avons fait pour T_{pf} et T_{pj} , nous obtenons la courbe OMT, dont les ordonnées par rapport à la courbe OLT représentent l'énergie emmagasinée dans le fleuve depuis l'étalement de jusant.

En effet, à chaque instant, l'énergie totale introduite par le flot, le jusant et le débit supérieur, augmentée du travail moteur total des forces extérieures est égale au travail des frottements augmenté de l'énergie emmagasinée.

Le point M de la fig. 2 ayant été obtenu en portant $BM = 101520 \omega_0$, et l'ordonnée du point L étant égale à $\frac{TF}{2}$ en vertu de l'hypothèse faite plus haut ($TF_i = E_j$), nous aurons :

$$LM = (E_f - E_j) = 97034 \omega_0.$$

De 7 h. 1/2 à 11 h. 1/4 environ, le travail des forces extérieures est plus grand que celui des frottements augmenté de l'énergie emmagasinée; il supplée ainsi à la déficience pendant ce temps, de l'énergie introduite par l'onde marée et le débit supérieur. De 1 h. à 4 h. 3/4 environ, c'est au contraire l'énergie perdue par le fleuve qui est plus grande que l'énergie restituée à la mer, augmentée du travail résistant des forces extérieures, et qui équilibre ainsi le travail des frottements; pour s'en rendre compte facilement, il suffit de construire les diagrammes en prenant l'étalement de flot comme origine des temps.

Enfin, si nous portons en OO' la valeur absolue de E_j c'est-à-dire $26300 \omega_0$ augmentée de 40 p. c., et que par O' nous menons une parallèle $O'N$ à OT en reproduisant la courbe en traits interrompus OLT, l'énergie latente sera représentée par l'ordonnée de la courbe OMT par rapport à la courbe $O'N$; cette énergie s'annule vers les instants (11 h. 1/4 et 4 h. 3/4) où les vitesses de flot et de jusant sont maximales à l'embouchure, et où les énergies totales introduites depuis l'étalement précédente deviennent positives. Malgré l'incertitude qui règne sur l'approximation des calculs, ces coïncidences sont troublantes et décèlent peut-être une loi du mouvement des eaux.

La figure que nous avons obtenue ainsi constitue ce que nous appellerons le *diagramme énergétique du fleuve*.

La part de l'énergie introduite par l'onde et le débit supérieur dans la puissance hydraulique, en supposant applicable le coefficient de correction de 40 p. c. trouvé pour tout le fleuve, s'élève à 56 p. c. environ, au lieu de 48 p. c. déjà indiqué; nous sommes donc loin en tout cas des conceptions d'il y a vingt ans à peine, qui faisaient encore de l'énergie introduite par l'onde marée le facteur unique du mouvement des eaux dans le fleuve. (Voir chapitre III.)

La notion de l'énergie latente, telle que nous l'avons exposée ci-dessus, et du diagramme énergétique, ainsi que la détermination de la puissance hydraulique, ont été obtenues par des méthodes basées sur l'observation directe des phénomènes de la marée, à l'exclusion de toute analyse théorique; *ce n'est pour le surplus pas la première fois que l'expérimentation devance ainsi la théorie, qui n'intervient alors que plus tard pour confirmer et expliquer les résultats obtenus.*

Nous croyons nécessaire à ce sujet de soumettre au lecteur les lignes suivantes, écrites en 1935 par un ingénieur parlant de la brèche faite par les théoriciens dans le mystère du phénomène des marées fluviales, et faisant allusion au jour, proche suivant lui, où tous les problèmes de la marée seront traités avec le même souci scientifique que les autres questions de l'hydraulique fluviale. « *On pourra alors remiser définitivement au musée du souvenir les méthodes empiriques basées sur les lois incertaines de l'observation directe des faits. Cette heure sonnera la retraite définitive des défaitistes de la science qui avancent à tout propos que la marée fluviale est un problème insoluble.* »

Cette prophétie est pour le moins inexacte, car un musée du souvenir ne pourrait guère contenir actuellement que des méthodes pseudo-scientifiques, et encore serait-il utile quelquefois de les en extraire pour les commenter dans l'intérêt de la science; une erreur, en effet, quoique toujours néfaste dans ses applications, ne se révèle pas toujours stérile à un examen minutieux; nous aurons l'occasion de le montrer au chapitre III. Les chercheurs qui s'appuient sur l'observation des faits n'ont d'ailleurs rien de commun avec les défaitistes de la science.

L'énergie latente a été acquise graduellement pendant la formation du fleuve, et sa distribution à l'intérieur du fleuve varie avec le temps.

Si, par la pensée, nous supprimons la marée et que nous remplaçons donc la mer par un réservoir de capacité infinie à la cote constante de mi-marée, le mouvement ondulatoire dans le fleuve se changerait en mouvement permanent, et l'énergie en question se transformerait et deviendrait constante et positive, mais infiniment petite vis-à-vis de la valeur énorme qu'elle pouvait atteindre auparavant.

Pour nous rendre compte du degré d'approximation des calculs que nous avons effectués, par suite de la substitution à l'embouchure pendant les intervalles d'un mouvement permanent au mouvement varié, nous avons évalué les débits de flot et de jusant par la même méthode.

Nous avons trouvé :

pour le débit du flot, 13924,4 ω_0	ou 1.045.000.000 m ³
alors que M. Van Brabandt indique	1.176.000.000 m ³ ,
et pour le débit du jusan, 14547,6 ω_0	ou 1.091.000.000 m ³
au lieu de	1.182.000.000 m ³ .

Nos chiffres sont donc inférieurs de dix pour cent environ à ceux de M. Van Brabandt obtenus par une méthode dont l'approximation est peut-être plus grande que celle de la nôtre.

Nous avons, en effet, attribué à la vitesse moyenne dans les intervalles, la valeur correspondant à celle du milieu de ces intervalles; la marée n'atteint pas ce point milieu au temps milieu de l'intervalle, elle est en retard quand la montée ou la descente des eaux devient plus rapide, en avance dans le cas contraire; nous ne connaissons donc pas le sens de l'erreur commise. D'un autre côté, l'erreur peut évidemment être diminuée à volonté en prenant des axes instantanés plus nombreux, c'est-à-dire en diminuant la durée des intervalles. Inutile de dire que cette tâche est au-dessus de nos moyens et que seul un bureau d'études bien documenté pourrait la mener à bonne fin.

La vitesse, qui intervient à l'embouchure à la première puissance dans le calcul du débit, du travail des forces extérieures et de l'énergie potentielle, est au cube dans l'expression de l'énergie cinétique, tandis qu'elle n'intervient pas dans le calcul de l'énergie potentielle et qu'elle est au carré seulement dans l'énergie cinétique quand on détermine l'énergie des eaux contenues dans le fleuve.

Il est difficile dans ces conditions de conclure quant à l'approximation générale de ces calculs; il nous suffit de savoir que l'erreur commise ne peut être grande et que nous pouvons la réduire à volonté.

Il ne faut d'ailleurs pas confondre cette erreur que l'on commet dans tous les calculs en substituant le mouvement permanent au mouvement varié, avec l'erreur déjà signalée auparavant dans le calcul du travail de la pesanteur, qui ne porte que sur les énergies, et non sur le travail des forces extérieures. Cette dernière erreur, si l'on pouvait la rectifier, se traduirait dans le diagramme énergétique par un relèvement du point D de l'ordre de 40 p. c., entraînant avec lui toute la partie supérieure du diagramme; elle augmenterait la puissance hydraulique d'environ 19 p. c. seulement, mais laisserait intacte la valeur de $(T_{pf} - T_{pj}) = 10620 \omega_0$ tout en ne modifiant que fort peu les énergies latentes, puisque l'influence de la correction sur la valeur de $(E_f - E_j)$ est négligeable comme le montre l'équation (4).

Nous signalons également que l'énergie non-utilisée, restituée à la mer, se consomme là en partie en frottements et en travail de relèvement des eaux expulsées jusqu'au niveau moyen de la mer, qui est plus élevé, nous l'avons montré dans notre deuxième mémoire prérappelé, que le niveau moyen à l'embouchure. La nature, qui par le jeu des marées et au détriment de leur énergie facilite l'écoulement des fleuves avec un niveau moyen inférieur à celui de la mer, permet ainsi à l'homme de laisser écouler les eaux

poldériennes à l'aide d'écluses, à des niveaux inférieurs de plusieurs mètres à ce niveau moyen. L'enchaînement des phénomènes est complet : la formation des fleuves à marée, due à l'affaissement du sol, permet ensuite l'assèchement des terrains abaissés en dessous du niveau moyen de la mer.

Enfin, la possibilité de calculer la puissance hydraulique fournit une méthode d'investigation dans la question de savoir si réellement le fleuve approche de sa situation d'équilibre comme nous l'avons affirmé antérieurement ; le débit moyen d'amont du fleuve croissant cependant d'une façon notable depuis au moins deux siècles, nous l'avons montré dans notre deuxième mémoire, il doit en résulter avons-nous dit une progression dans le creusement du fleuve. En appliquant ce calcul à des périodes successives, nous devrions donc trouver pour la puissance hydraulique, des valeurs oscillant autour d'une valeur moyenne croissante. Les récapitulations décennales de la marée peuvent servir de base à un calcul de l'espèce, mais cette tâche est évidemment aussi au-dessus de nos forces.

Nous devons faire remarquer au sujet de cette progression du fleuve, que les calculs que nous avons effectués montrent que l'énergie fournie par le débit supérieur supposé constant est négligeable vis-à-vis de celle fournie par la mer. Il n'en est plus de même toutefois pour l'action des variations de ce débit sur la tenue du lit du fleuve et sur les répercussions qui en résultent dans les circonstances d'aval. L'augmentation du débit moyen supérieur accentuant ces variations ainsi que leur action bienfaisante sur le lit et les conditions de la marée à l'embouchure, il se conçoit facilement que la puissance hydraulique puisse augmenter ainsi d'une façon sensible.

En conclusion, nous croyons avoir échappé aux embûches de la méthode énergétique et avoir soulevé au moins un coin du voile qui recouvre le mystère du mouvement des eaux dans les fleuves à marée.

V. — POSITION DU PROBLÈME DE L'ESCAUT MARITIME.

Nous supposons le lit du fleuve, abstraction faite du coude de Bath, adapté aux circonstances d'aval, celles-ci ayant d'ailleurs subi la réaction résultant du creusement du fleuve.

Dans le paragraphe I du chapitre III de notre première étude nous avons écrit :

« Il convient également de ne pas perdre de vue que la situation
» d'équilibre ne peut être atteinte par une marche toujours croissante
» du phénomène de creusement du fleuve ; il y aura vraisemblablement
» vers la fin de cette période des régressions partielles du fleuve suivies

» de progressions analogues d'amplitude décroissante, oscillant autour
 » de la position d'équilibre.

» Notre maître Massau, dans des pages inoubliables (Mémoire sur
 » l'intégration graphique des équations aux dérivées partielles, avant-
 » propos, *Annales de l'Association des Ingénieurs sortis des Ecoles*
 » *Spéciales de Gand*, tome XXIII, 2^e livraison 1900) a fait allusion à
 » la façon dont une telle situation d'équilibre peut être atteinte :

» *Il n'y a jamais de tâtonnements que quand il s'agit de trouver une*
 » *position d'équilibre, un mouvement uniforme, un mouvement per-*
 » *manent, parce que la nature elle-même n'atteint ces solutions parti-*
 » *culières qu'après des espèces d'hésitations : oscillations ou conver-*
 » *gences.* »

Il est donc vraisemblable que le problème tel que nous l'avons soulevé ne trouverait pas de solution mathématique directe, et qu'il faudrait agir par tâtonnements pour le résoudre.

Il convient pour le surplus de tenir compte de ce que l'équilibre vers lequel tend le fleuve est lui-même variable, par suite du fait que l'amplitude de la marée en mer devant l'embouchure diminue lentement et que le lit s'abaisse de la même façon ; le tassement du sol est la cause de ces deux phénomènes. En outre, les précipitations atmosphériques sur le bassin de l'Escaut augmentant depuis plusieurs siècles d'une façon notable, le débit supérieur moyen va en croissant. Il est impossible de dire à priori si ces modifications dans les circonstances d'aval et d'amont et dans celles du lit sont de nature à abréger la tendance du fleuve vers sa situation d'équilibre ou à éloigner celle-ci temporairement ou indéfiniment.

Comme nous supposons la situation d'équilibre réalisée actuellement, la forme, c'est-à-dire les largeurs et profondeurs du lit, devient une donnée du problème, et celui-ci se ramène désormais au suivant :

Etant donné les circonstances d'amont et d'aval, ainsi que la forme du lit, déterminer les axes instantanés.

Si l'on parvient à établir dans ces conditions, d'une façon scientifique, les lois du mouvement des eaux qui est varié mais périodique, et si les calculs effectués en se basant sur les formules analytiques exprimant ces lois donnent des résultats qui ne concordent pas complètement avec les données de l'observation directe, on devra en conclure que la situation d'équilibre n'est pas encore réalisée, et non que ces lois sont incorrectes. De telles formules peuvent servir à déterminer les conséquences immédiates d'une modification artificielle apportée au fleuve, mais, l'équilibre étant rompu, tout le lit doit se réadapter

et réagir sur le nouveau régime des marées qui serait déterminé par ces formules, c'est-à-dire que finalement celles-ci ne donneraient qu'une solution approchée aux problèmes pratiques qui se posent.

La complexité de la question est donc extrême.

La forme générale en plan du lit est pour le surplus fixée arbitrairement par le tracé des digues, et la courbure des chenaux est déterminée en majeure partie, surtout dans la section moyenne du fleuve, par la constitution géologique du sous-sol. C'est donc à tort que certains auteurs, séduits par la belle régularité des courbes de la section moyenne du fleuve entre Anvers et Bath, ont voulu appliquer à cette courbure des formules analytiques en considérant celles-ci comme l'expression d'une loi qui régit le tracé du fleuve.

L'analyse systématique du mouvement des eaux dans l'Escaut Maritime, telle que nous l'avons entamée ci-dessus, est basée sur les propriétés géométriques des axes instantanés, des lieux géométriques des marées hautes, des marées basses et des étales, telles qu'elles ont été exposées notamment par l'Ingénieur L. Van Brabandt dans sa note précitée.

Cette analyse peut conduire à des conclusions fort intéressantes pour le régime du fleuve et rien n'empêche de poursuivre son étude aussi loin que possible, sans attendre la solution mathématique du problème.

Pendant la période de creusement du fleuve, l'énergie cédée à celui-ci est allée en croissant, probablement jusqu'au moment du maximum de l'intensité du creusement, pour diminuer lentement et osciller ensuite autour d'une valeur moyenne correspondant à toutes les circonstances qui régissent actuellement le fleuve et à la situation présente de son lit; cette valeur moyenne semble devoir être croissante depuis deux siècles, comme nous l'avons indiqué plus haut. C'est donc une erreur de croire que cette énergie ne dépend que des circonstances d'aval et de prétendre que l'énergie actuelle est trop grande pour le fleuve, puisque toute l'énergie cédée à celui-ci est utilisée à vaincre les frottements et à déplacer des matériaux.

On peut évidemment se demander si, par une modification judicieuse apportée au fleuve, on ne pourrait, soit utiliser d'une façon plus parfaite l'énergie disponible en diminuant notamment celle consommée par des transports inutiles de matériaux, soit augmenter l'énergie cédée, et améliorer ainsi les conditions de navigation; cette question sera examinée plus loin.

Il convient de faire remarquer pour le surplus, que le lit ne s'est pas seulement adapté aux circonstances d'aval, mais qu'il a réagi constamment sur l'onde marée en diminuant progressivement son amplitude à

l'embouchure, déjà décroissante par le fait de l'affaissement du sol.

Une des données du problème est la forme du lit en plan délimité par ses digues; nous la considérons comme désormais invariable, ces digues étant à l'abri des accidents et des catastrophes anciennes grâce aux progrès de la science et à la puissance des moyens financiers dont on dispose actuellement. Nous rappellerons à ce sujet que parmi les grandes catastrophes que le fleuve a connues, et dont les effets subsistent encore, il faut avant tout citer la submersion du polder de Saeftingen en 1530 et 1570, et de celui du polder de Namur, y attendant, en 1715; ces terres ne furent jamais réendiguées et forment actuellement la région dénommée « terres submergées de Saeftingen ».

Enfin nous signalerons qu'un fleuve maritime, arrivé dans sa situation d'équilibre, est théoriquement viable d'une façon indéfinie; pratiquement il est indispensable qu'il y ait une certaine variation dans le débit d'amont pour empêcher l'engraissement continu des rives dans leur partie supérieure, c'est-à-dire l'envasement final du fleuve; nous avons démontré cette nécessité dans notre deuxième mémoire précité. Il est probable que le cycle par lequel passe l'amplitude de la marée à l'embouchure est également favorable, si pas indispensable, au bon maintien du fleuve.

En conclusion, le problème général de l'Escaut possède une solution; c'est celle que la nature lui a donnée et que nous avons sous les yeux sous forme d'un puissant fleuve, faisant la fortune du port d'Anvers et contribuant pour une large part à la prospérité du pays; il n'est pas nécessaire de résoudre scientifiquement ce problème puisque nous l'avons ramené à un autre beaucoup plus simple, s'appliquant à la situation d'équilibre du fleuve, et qui doit être susceptible de recevoir une solution par des méthodes scientifiques qui ne doivent plus nécessairement comporter des tâtonnements. La tâche ne semble toutefois pas devoir être aisée.

CHAPITRE II.

Adaptation de l'onde marée fluviale et du lit actuels aux variations et perturbations dans les circonstances d'aval et d'amont et aux modifications locales apportées au fleuve.

I. — MARÉE-TEMPÊTE.

Envisageons premièrement une tempête soufflant sur la mer du Nord; nous constatons que l'onde marée fluviale est immédiatement influencée par la perturbation et qu'elle s'engouffre dans le fleuve en faisant sentir ses effets jusqu'à l'extrémité du lit; dès la tempête finie, il ne faut guère plus d'une marée pour ramener l'onde à sa valeur normale. L'adaptation de l'onde et son retour à la situation d'équilibre sont donc immédiats.

Les vitesses des courants pendant les marées-tempête sont fortement augmentées et le lit subit dans toute son étendue des modifications

passagères; on a constaté notamment des déplacements très appréciables de bancs dans l'estuaire après les tempêtes, mais le phénomène est évidemment trop brusque pour que le lit du fleuve puisse s'adapter.

II. — VARIATIONS PÉRIODIQUES OU RÉGULIÈRES DE LA MARÉE.

L'onde marée réelle qui anime le fleuve et dont l'amplitude à l'embouchure parcourt un cycle régulier oscillant autour de l'amplitude de l'onde marée hypothétique moyenne considérée, peut être considérée comme le résultat des perturbations apportées à cette dernière par l'attraction variable des astres. Ces perturbations provoquent dans le fleuve des transports locaux et intermittents qui changent de sens et se neutralisent plus ou moins au bout d'un cycle de la marée. La puissance hydraulique du fleuve varie donc en réalité avec la marée, et la puissance déjà calculée peut être considérée comme une moyenne.

Si l'amplitude moyenne à l'embouchure varie lentement, l'adaptation de l'onde marée se fait immédiatement et celle du lit suit progressivement.

III. — SÉCHERESSES ET CRUES.

Si nous envisageons maintenant une période de sécheresse pendant laquelle l'équilibre existant est détruit, l'influence du flot devient prépondérante, et un transport général de matériaux s'effectue dans le fleuve, de l'aval vers l'amont; les seuils notamment se déplacent dans le même sens et la partie supérieure des rives s'encombre visiblement de dépôts, les « schaars » (1) avancent vers l'amont, la profondeur des mouilles augmente, sauf dans leur partie aval où la pointe rétrograde. Nous avons constaté tous ces phénomènes pendant la grande sécheresse de 1921, alors que nous avions la charge de la direction du Service Spécial de l'Escaut Maritime.

Quand ensuite une crue ou une période humide survient, un balayage général du fleuve s'effectue; les dépôts de la période de sécheresse s'acheminent vers l'aval, les seuils s'obstruent en se déplaçant dans le même sens, les schaars reculent et les pointes aval des mouilles avancent, tandis que les profondeurs de ces mouilles diminuent. Ces phénomènes ont été particulièrement intenses après la sécheresse précitée et ont même provoqué en 1923 et 1924 une situation assez inquiétante pour le port d'Anvers, à cause du grand relèvement du seuil de Bath.

(1) On désigne par « schaar » la pointe amont des mouilles dans les sections aval et moyenne du fleuve.

Si les théories que nous avons émises à ce sujet en 1922, publiées en 1927 dans notre premier mémoire, et uniquement fondées sur l'observation directe des phénomènes, avaient été admises, beaucoup d'ennuis auraient été évités. Mais on était à cette époque sous l'impression de certaines études qui, bien que ne donnant aucune solution au problème posé par le relèvement du seuil de Bath et déclarant celui-ci un mal nécessaire, ont influencé les esprits et fait écarter des interventions qui auraient pu être efficaces.

En résumé, l'adaptation du lit aux perturbations dans les circonstances d'amont se fait progressivement dans toute l'étendue du fleuve; quant à l'onde marée elle-même, elle s'adapte immédiatement à la nouvelle situation. Il n'est donc pas vrai que le débit supérieur n'a plus d'influence dans la partie aval du fleuve, comme le proclament à l'égal d'un dogme, certains ingénieurs qui se sont occupé de la question.

Quand feu Canter-Cremers, l'éminent Ingénieur néerlandais, fit connaître en 1921 sa théorie sur le mouvement secondaire observé dans le Nieuwe Waterweg, joignant Rotterdam à la mer, les partisans de ce dogme déclarèrent que cette nouvelle théorie n'était pas applicable à l'Escaut Maritime, celui-ci ayant un débit d'amont trop faible vis-à-vis de celui du flot.

Nous avons démontré dans nos études antérieures qu'il n'en était pas ainsi; Canter-Cremers lui-même, quand il exposa sa théorie au Kon. Instituut van Ingenieurs, le 3 juin 1921 déclara textuellement (voir *De Ingenieur* du 17 septembre 1921, page 748) : « *De in het voorafgaande beschreven verschijnselen doen zich ook voor in het brakwatergebied van estuaires, waarin de aanvoer van bovenwater een zeer bescheiden rol speelt* (1). »

Enfin, si le débit moyen supérieur varie lentement, l'onde marée et le lit s'adaptent progressivement.

IV. — MODIFICATIONS APPORTÉES, OU PROJETÉES AU FLEUVE.

A. — Barrage de l'Escaut Oriental en 1867.

Avant 1867, l'Escaut Occidental était réputé déverser pendant le flot dans la branche orientale environ 32 millions de mètres cubes, dont 11,5 millions lui étaient restitués pendant le jusant.

Les partisans et adversaires de ce barrage étaient d'accord pour admettre que cet ouvrage d'art devait améliorer le régime du fleuve en

(1) Les phénomènes décrits ci-dessus se manifestent également dans la section des eaux saumâtres des estuaires, où l'apport des eaux supérieures joue un rôle très effacé.

amont de Bath, mais différaient de vue quant à son influence sur l'estuaire proprement dit. Les arguments produits de part et d'autre, en rapport avec les faibles connaissances hydrauliques de l'époque, semblent aujourd'hui assez pauvres.

Le barrage ainsi que celui du Sloc effectué, on ne put déceler aucune influence marquante sur le régime du fleuve.

Dans nos études antérieures nous avons montré, en nous basant sur la loi du déplacement vers l'ouest des embouchures des fleuves à marée sur notre côte, que l'on pouvait admettre à priori que le barrage serait favorable à l'ensemble du fleuve.

En lisant les arguments développés anciennement à ce sujet, on s'aperçoit tout de suite que tous les raisonnements se font sous l'empire de l'idée que l'onde marée est indépendante du lit, et que par conséquent elle ne varie pas par suite de l'établissement du barrage, alors qu'au contraire l'onde a dû s'adapter immédiatement à cette modification. Bien entendu, le lit devait s'approprier également à la nouvelle situation, et une modification générale s'effectuer partout, peu importante il est vrai, et dont la durée ne peut être précisée; cette modification a dû réagir en outre sur l'onde marée, mais l'on ne peut dire à priori, quelle est l'importance et le sens de la réaction ainsi subie. L'argumentation dont question ne pouvait donc être pertinente.

Il est probable que les résultats de l'opération de 1867 n'ont pu être décelés sur l'onde marée parce que celle-ci se trouvait, et se trouve encore d'ailleurs, dans la période d'oscillation précédant la situation d'équilibre.

Il est toutefois un élément de cette dernière qui a été influencé visiblement, c'est le tracé en plan des chenaux dans la région de Bath; nous allons l'exposer brièvement.

Nous avons montré antérieurement que dans cette région, par suite de la brisure du lit et de l'existence des terres submergées de Saeftingen, ce tracé se modifie progressivement comme il est indiqué ci-après.

Au temps de M. Beautemps-Beaupré (cartes de 1799-1800), le schaar actuel de Waarde se prolongeait jusque dans la passe de Valkenisse et constituait le chenal navigable, tandis que le Schaar du Nord était inexistant; en 1862, les cartes de la marine néerlandaise montrent que la passe de Waarde s'est oblitérée et ne constitue plus qu'une fausse passe c'est-à-dire un schaar, et que celui du Nord est formé.

Cette modification est un signe incontestable de régularisation, et ne peut être due qu'à l'extinction naturelle et progressive de la communication avec le bras oriental du fleuve; l'obturation progressive de la région de Bath devait en effet avoir pour corollaire de diriger une partie de plus en plus grande du flot directement vers l'amont de Bath, par dessus les bancs de Saeftingen, ce qui rendait inévitable la formation d'un schaar en cet endroit.

D'un autre côté, à cette même époque de Beautemps-Beaupré, l'alignement de la passe de Saeftingen, dans lequel se produit le fameux seuil de Bath, pointait à environ

1 Km. à l'est de ce fort désaffecté; en 1862 il se dirigeait droit dessus et actuellement il s'en éloigne à plus d'un Km. à l'ouest. Cette passe se déplace donc lentement en éventail vers l'ouest en pivotant autour de son origine amont, entraîne tout le lit du fleuve dans son mouvement, érode l'île de Saeftingen et se rapproche du Schaar du Nord qui lui est perpendiculaire.

Nous avons indiqué également dans nos études antérieures le tracé limite vers lequel tend le fleuve; il comprend la réunion en une seule mouille des trois passes de Santvliet, Saeftingen et Bath, *bien entendu si des endiguements sur les terres submergées de Saeftingen ne viennent pas y mettre obstacle.*

Il est évident que le barrage du bras oriental doit hâter cette évolution, qui semble bien devoir constituer la phase finale de la tendance du fleuve vers sa situation d'équilibre.

Les cartes hydrographiques montrent que la régularisation dans cette section du fleuve est particulièrement notable depuis 1867, et l'on ne pourrait évidemment que s'en réjouir, s'il n'y avait pas un revers à la médaille. En effet, l'évolution du fleuve dans cette région est accompagnée d'un phénomène d'une intensité particulière et qui semble bien être en rapport direct avec l'oblitération naturelle de la communication avec l'Escaut Oriental, donc aussi avec le barrage de ce cours d'eau. C'est le seuil de Bath, où à certains moments une diminution de profondeur atteignant quatre mètres peut se produire en quelques mois, suivie ensuite par un déplacement brusque de l'extrémité de la passe de Saeftingen d'amont en aval, c'est-à-dire de l'est vers l'ouest.

Ce phénomène a été signalé pour la première fois à notre connaissance en 1858, puis en 1866, 1885, 1905, 1913, 1919 et 1923; il a chaque fois causé de graves ennuis à la navigation. Nous attribuons l'intensité et la fréquence de ces dernières manifestations à la puissance encore croissante du Schaar du Nord, résultat du barrage de l'Escaut Oriental.

Comme nous l'avons exposé antérieurement, ce schaar donne périodiquement naissance à des goulets qui rejoignent la passe de Saeftingen; ceux-ci se déplacent lentement de l'amont vers l'aval, c'est-à-dire du sud au nord, et l'un d'entre eux absorbe, lors d'un déblayage consécutif à une période de pluie, la plus grande partie du jusan; il provoque ainsi des dépôts dans la partie aval de cette passe abandonnée par ce courant qui constitue le seuil de Bath.

En résumé celui-ci est un phénomène inhérent à la période d'oscillation précédant la situation d'équilibre; en abrégant cette période, comme on l'a fait par le barrage de 1867, on a intensifié le phénomène.

B. — *Barrage du lit même de l'Escaut Occidental.*

Nous avons exposé dans notre premier mémoire, comment l'Escaut et la Lys furent barrés à Gand au XIII^e siècle, pour préserver cette localité, ainsi que les pâturages qui l'entouraient, de l'invasion de l'eau; la propagation de la marée à l'intérieur des terres au début de la formation de l'Escaut Occidental dut en effet relever notablement le niveau des eaux dans cette agglomération. Les conséquences du barrage pour l'onde marée en aval ont probablement été très faibles et sont évidemment inconnues.

Au siècle passé, un nouveau barrage fut établi à Gentbrugge, en aval de Gand, et l'amplitude de la marée y fut, paraît-il doublée; aucune preuve certaine n'a toutefois été donnée de ce phénomène. Certains auteurs considèrent que celui-ci est régi par une loi, et prétendent qu'une

onde marée fluviale arrêtée par un barrage a, en cet endroit, une amplitude double de celle qu'elle aurait si le barrage n'existait pas.

Pour montrer l'inexistence de cette loi, il suffit de faire observer que si l'on suppose l'Escaut barré brusquement à son embouchure, l'amplitude ne pourrait y être doublée. L'onde marée en mer à proximité de l'embouchure s'adapterait en effet immédiatement à cette nouvelle situation, son niveau moyen se relèverait quelque peu et l'amplitude y deviendrait légèrement plus forte, puisqu'elle reprendrait la valeur qu'elle avait avant la formation du fleuve, abstraction faite des modifications subséquentes dans le fond de la mer et des réactions de celles-ci sur la marée.

Il est intéressant de mentionner à ce sujet les résultats obtenus par le barrage du Zuiderzee : les amplitudes de marée calculées à l'avance pour le Waddenzee (la partie du Zuiderzee non-endiguée), se sont réalisées approximativement après la fermeture; le long de la côte nord de l'île de Wieringen l'amplitude a bien été doublée, mais le long de la digue de fermeture les augmentations furent beaucoup moindres. Ces augmentations notables sont dues au fait que le Zuiderzee jouait le rôle d'un réservoir régulateur de la marée, de très grande puissance.

Les calculs très minutieux effectués à ce sujet ont déterminé l'onde marée qui devait s'adapter immédiatement à la situation résultant de la fermeture du Zuiderzee, mais ils n'ont pu tenir compte des réactions futures qu'exercera le nouveau lit du Waddenzee sur cette onde. On estime en effet que des centaines de millions de mètres cubes de sable seront encore déplacés par les courants dans le Waddenzee et que le processus de cette adaptation du lit exigera plusieurs années pour s'accomplir.

Nous croyons que l'onde marée finale dans le lit du Waddenzee équilibré ne sera pas très différente de celle déjà enregistrée, mais la différence ne sera toutefois pas négligeable; le problème qui se posait par l'endiguement du Zuiderzee n'a donc pas été résolu entièrement.

C. — *Etablissement d'un réservoir latéral au fleuve.*

Ce cas fut souvent envisagé dans les discussions à propos de l'Escaut Maritime, car il se ramène en effet à la question des endiguements de schorres et surtout à celle des terres submergées.

Tout le monde semblait d'accord, bien que les arguments produits n'étaient guère pertinents, pour déclarer que les réservoirs latéraux ne peuvent être utiles en aval et sans danger pour la partie du fleuve située en amont, qu'à condition d'être établis à proximité de l'embouchure. Il en résultait implicitement que les endiguements en question étaient sans danger pour le fleuve en amont, et favorables en aval, à condition d'être effectués à une distance suffisante de l'embouchure.

L'incertitude qui régnait au sujet de ce qu'il fallait entendre par proximité de l'embouchure, fit que l'entente au sujet de ces travaux ne put jamais se faire. Il est probable que le réservoir latéral est défavorable dès qu'il joue le rôle de régulateur de marée, mais cet axiome ne donne aucune indication pratique; bien entendu, ceci ne s'applique pas aux

réservoirs régulateurs des marées-tempête que l'on envisage actuellement (Potpolders).

Pour la région de Bath, où les occasions d'endiguer sont fréquentes, la question du maintien ou de l'endiguement des schorres et des terres submergées était dominée de plus par l'idée, fausse nous l'avons montré, que l'énergie cédée au fleuve est trop forte pour celui-ci, que la situation troublée de Bath est un mal nécessaire, que le seuil fait office d'amortisseur d'énergie et que les schorres latéraux jouent le rôle de frein.

Cette conception erronée, avec les dangers imaginaires qu'elle sous-entend en cas d'endiguement, ont entravé sérieusement les projets d'amélioration du fleuve.

Pour montrer clairement le résultat d'une pareille opération, nous allons pousser les choses à l'extrême et supposer que les schorres et terres en question soient brusquement endigués, au moment où le premier flot arrive à hauteur de l'extrémité aval des travaux d'endiguement.

Si nous envisageons encore l'onde marée hypothétique moyenne, nous voyons en nous reportant à la planche II de la note de M. Van Brabandt déjà citée, que dès sa deuxième heure le flot commence à être influencé par la modification; au fur et à mesure que le flot avance et monte, l'influence de l'endiguement grandit et déforme de plus en plus les axes instantanés qui doivent se relever en aval de Bath vis-à-vis de leurs anciennes positions. A un certain moment le relèvement se prolonge jusqu'à l'embouchure et l'onde marée en mer commence à être influencée, c'est-à-dire que l'onde marée fluviale s'adapte à la nouvelle situation et que l'énergie cédée au fleuve diminue en conséquence, puisque la contre-pression à l'amont est augmentée. Au droit de l'endiguement, qui agit évidemment comme un rétrécissement, la pente des axes instantanés doit augmenter, de sorte que le relèvement en amont est moins accentué. La marée suivante sera vraisemblablement déjà adaptée complètement à la nouvelle situation; elle communiquera au fleuve une énergie plus petite que l'onde moyenne et cédera probablement au fleuve une puissance hydraulique moindre.

En réalité, l'endiguement ne peut se faire que progressivement et l'onde marée s'adapte au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

Le lit du fleuve doit ensuite s'adapter également à la nouvelle situation et réagir sur l'onde marée, et il est probable que la situation stabilisée, qui ne sera atteinte qu'au bout d'un temps plus ou moins long, ne sera, dans son ensemble, que peu différente de l'ancienne; les modifications survenues ne seront d'ailleurs guère perceptibles parce que le

fleuve, comme nous l'avons déjà fait remarquer, se trouve dans la période d'oscillation précédant la situation d'équilibre.

La puissance hydraulique étant diminuée, on pourrait objecter que le résultat des travaux ne peut être que nuisible; mais il ne faut pas perdre de vue que la partie de l'énergie ancienne employée à remplir les réservoirs maintenant supprimés, était partiellement perdue; en effet, l'énergie cinétique des eaux allant remplir les réservoirs pendant le flot, est emmagasinée là sous forme d'énergie potentielle qui se retransforme en énergie cinétique pendant la vidange; cette énergie est perdue en partie par suite des remous, tourbillons, etc., provoqués par ce remplissage et cette vidange. La puissance hydraulique peut donc dans ces conditions diminuer sans inconvénients, puisque son rendement sera augmenté.

En résumé, les endiguements dans la région de Bath ne semblent pas nuisibles au régime général du fleuve. Une grande réserve s'impose toutefois, pour les endiguements sur la rive gauche, par suite des répercussions néfastes qu'ils peuvent avoir sur les perturbations dans les passes navigables de cette région et sur la tendance à évolution de celles-ci; ils ne pourraient être conçus, à notre avis, qu'en fonction d'une correction ou d'une amélioration du fleuve dans cette région.

D. — *Amélioration du fleuve en aval d'Anvers.*

Nous visons ici uniquement une modification qui devrait tendre à améliorer les conditions de la navigation, et il est évident qu'elle doit s'appliquer avant tout à la région de Bath, où les perturbations temporaires sont les plus intenses et les plus dangereuses. Amélioration du fleuve et parfait aménagement des installations maritimes d'Anvers doivent d'ailleurs marcher de pair et nous avons déjà signalé que ce dernier facteur peut même être prépondérant dans le choix des solutions.

Dans notre deuxième mémoire déjà rappelé, nous avons indiqué comment l'avant-projet que nous avons publié en 1929 pouvait être modifié pour être mis à la hauteur des circonstances actuelles et futures.

Le nouveau projet maintient la réunion en une seule des trois passes de Santvliet, Saeftingen et Bath, comportant donc la suppression de deux seuils dont celui de Bath; dans cette passe unique la majeure partie du flot et du jusan serait concentrée. Ce résultat serait obtenu par des dragages temporaires dans la partie aval de cette passe, et par des parois directrices ou des murs de quai à établir sur la rive droite de la partie moyenne de cette même passe, au droit du nouvel avant-port à créer. Ces travaux auraient en même temps comme conséquence l'af-

faiblissement du Schaar du Nord, qui reculerait vers l'ouest, et l'éloignement vers l'est de la partie de la passe navigable qu'il menace, laquelle serait fixée contre la paroi directrice à établir. Cette disposition serait de nature à abréger, dans la région de Bath, la durée de la période de transformation du fleuve tout en diminuant l'ampleur des perturbations, condition *sine qua non* suivant nous, de tout projet d'amélioration ou de correction.

(A suivre.)

SAMENVATTING :

HET HYDRAULISCH PROBLEEM VAN DE ZEE-SCHELDE.

VOORWOORD.

De bestaansvoorwaarden van de zeehavens hebben, ten gevolge van den oorlog, grondige wijzigingen ondergaan; o. a. moet, na afloop van de vijandelijkheden, met een strenge onderlinge concurrentie worden gerekend. Talrijke werken zullen moeten worden uitgevoerd; ook de Zee-Schelde zal deze behoeften niet kunnen ontwijken.

Het na-oorlogsche tijdperk moet dan ook de ingenieurs bereid vinden om de bevoegde machten te wijzen op de praktische en onmiddellijk doorvoerbare oplossingen van de problemen die zullen oprijzen.

De theorie is ten andere nog niet bij machte om een bevredigende oplossing te verschaffen van het vraagstuk der golfbeweging in de rivieren.

HOOFDSTUK I.

Diverse beschouwingen omtrent de getijgolf in de rivieren.

In paragraaf I wordt uiteengezet wat men moet verstaan onder « evenwichtstoestand » van den stroom.

In dezen toestand, en voor een hypothetische en steeds dezelfde blijvende middelwaarde van het getij, terwijl bovendien een gemiddeld en constant bovenstroomsch debiet wordt verondersteld, gaat de aan den stroom afgestane energie niet meer gedeeltelijk verloren, onder den vorm van arbeid noodig voor het uitgraven van de bedding en van de oevers, en het algemeen transport van materialen naar de zee; zij zet zich echter volledig om in wrijvingsarbeid van de moleculen op elkander en tegen de wanden, afgezien van het gebrek aan parallelisme der sneden, dat zich in de tijrivieren sterk laat voelen.

Paragraaf II heeft betrekking op de definities van de kinetische en van de potentieele energie.

De energetische methode leidt op de gemakkelijkste wijze tot een praktisch resultaat, maar zij is bezaaid met hinderlagen en de toepassing er van is dan ook niet zonder gevaar.

De kinetische energie wordt gegeven door de welgekende formule $\frac{mv^2}{2}$; de potentieele energie moet worden bepaald ten opzichte van

het rustvlak, dat overeenstemt met den waterspiegel bij halftij. Indien l de gemiddelde breedte voorstelt van een snede met een dikte gelijk aan één en een hoogte h boven halftij, dan wordt de potentieele energie niet gegeven door de meestal gebruikte formule $\frac{lh^3}{2}$, maar wel door

de volgende: $lh \frac{H + h}{2}$, waarin H de gemiddelde diepte bij halftij

voorstelt. Dit beteekent een hemelsbreed verschil, want $h \approx 2$ m., terwijl H bij de monding 13 m. te boven gaat.

In paragraaf III wordt de benaderende berekening gegeven van de energie die aan den stroom wordt medegedeeld en deze welke de zee terugkrijgt; het verschil maakt, volgens definitie, het hydraulisch vermogen uit van den stroom. In deze berekeningen, wordt als hypothetische middelwaarde van de getijgolf deze aangenomen, beschouwd door den heer Van Brabandt voor de periode 1888-1895, en al de grootheden zijn uitgedrukt in functie van een gekend element van de benedenstroomsche omstandigheden, ω_0 of l_0 , t.t.z. de doorsnede of de gemiddelde breedte bij de uitmonding; ω_0 werd trouwens gelijk genomen aan 13 l. De vergelijkingen worden opgesteld door het gedeelte te isoleeren van den stroom en van zijn bijrivieren, begrepen tusschen de bovenstroomsche stuwen en de doorsnede bij de uitmonding, waar dan

de noodige uitwendige krachten worden ingevoerd. Een deel van de medegedeelde energie wordt aan den stroom afgestaan en bij het overwinnen van de wrijvingsweerstand verbruikt; de rest wordt slechts tijdelijk opgenomen en achterna aan de zee gerestitueerd; de energie van den stroom is dus veranderlijk.

Indien:

E_o en E'_o de energieën voorstellen van en vloed en van de eb bij de uitmonding;

E_a en E'_a de energieën die, gedurende dezelfde tijdsverloopen, langs den bovenstroomschen kant worden ingevoerd;

T_{pf} en T_{pj} den bewegings- en weerstandsarbeid van de uitwendige krachten;

TF_f en TF_j den wrijvingsarbeid, steeds gedurende dezelfde tijdsverloopen;

E_f en E_j de energie van de watermassa in den stroom, respectievelijk bij stilwater tusschen vloed- en ebstroom en tusschen eb- en vloedstroom;

en TF de som van $TF_f + TF_j$,

dan komt men tot de volgende vergelijkingen:

$$(E_o + E_a) + T_{pf} = TF_f + (E_f - E_j) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

$$(E'_a - E'_o) - T_{pj} = TF_j - (E_f - E_j) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

waaruit, door samentelling:

$$(E_o - E'_o) + (E_a + E'_a) + (T_{pf} - T_{pj}) = TF \quad . \quad . \quad (3)$$

en door aftrekking, mits aan te nemen dat $TF_f = TF_j$, wat op weinig na juist is,

$$(E_o + E_a) - (E'_a - E'_o) + T_{pf} + T_{pj} = 2 (E_f - E_j) \quad . \quad (4)$$

De berekeningen leveren:

$$\begin{array}{ll} E_o = 5728 \omega_o \text{ tm}, & E'_o = - 4078 \omega_o \text{ tm}, \\ E_a = 27 \omega_o \text{ tm}, & E'_a = 29 \omega_o \text{ tm}, \\ T_{pf} = 101520 \omega_o \text{ tm}, & \text{en} \quad T_{pj} = 90900 \omega_o \text{ tm}, \end{array}$$

waaruit, door toepassing van de vergelijking (3), voor het hydraulisch vermogen:

$$TF = 20482 \omega_o \text{ tm} \quad \text{of} \quad 457.000 \text{ paardekracht.}$$

De totale medegedeelde energie bedraagt $114042 \omega_o \text{ tm}$; deze welke wordt gerestitueerd, $93560 \omega_o \text{ tm}$; het verschil, of het hydraulisch vermogen, belooft dus slechts 18 % van de eerste waarde.

De vergelijking (4) geeft $(E_i - E_j) = 97034 \omega_0 \text{ tm}$; wanneer men echter E_i en E_j berekent door middel van de formules die in paragraaf II werden opgesteld, en die den theoretischen arbeid geven van de zwaartekracht voor de potentieele energie, dan bekomt men $(E_i - E_j) = 69020 \omega_0 \text{ tm}$; de waarde van $(E_i - E_j)$, die door de vergelijkingen wordt opgeleverd, is dus 40 % grooter dan de theoretische waarde van dit verschil.

Paragraaf IV handelt over de latente energie en over het energetisch diagram van den stroom. De energie van de watermassa in den stroom, of de latente energie, bereikt haar minimale en negatieve waarde omtrent het stilwater tusschen eb- en vloedstroom, en haar maximale en positieve waarde omtrent het stilwater tusschen vloed- en ebstroom; zij wordt gelijk aan nul omtrent de oogenblikken waarop de snelheden van den vloed- en van den ebstroom hun maximum waarden bereiken bij de uitmonding.

Het energetisch diagram is de grafische uitdrukking van de opgestelde vergelijkingen; het toont aan dat TF_i niet merkelyk van TF_j kan verschillen.

In paragraaf V wordt de aard van het Scheldeprobleem van naderbij onderzocht.

Indien men aanneemt dat de evenwichtstoestand thans verwezenlykt is, dan wordt het oorspronkelyk probleem teruggebracht tot het bepalen van de oogenblikkelyke assen, wanneer de boven- en benedenstroomsche omstandigheden, alsmede de vorm van de bedding gegeven zijn.

HOOFDSTUK II.

De aanpassing van de thans bestaande getijgolf
en stroombedding aan de veranderingen en verstoringen
in de boven- en benedenstroomsche omstandigheden,
en aan de plaatselyke wijzigingen
welke aan den stroom worden aangebracht.

Paragraaf I. — De aanpassing van de getijgolf in den stroom aan een stormvloed, en haar terugkeer tot den evenwichtstoestand, vinden onmiddellyk plaats.

Paragraaf II. — Hetzelfde geldt voor de periodieke of regelmatige veranderingen van het getij.

Paragraaf III. — *In geval van groote droogte en bij wassend water, past de getijgolf in den stroom zich onmiddellijk aan de nieuwe omstandigheden aan, en de bedding wijzigt zich geleidelijk. Het bovenstroomsch debiet laat over de gansche lengte van den stroom zijn invloed gevoelen.*

In paragraaf IV worden de gevolgen onderzocht van de ontworpen, of aan den stroom aangebrachte wijzigingen.

In strijd met hetgeen vele ingenieurs hadden voorspeld, kon de invloed van het afdammen van de Ooster-Schelde, in 1867, op het algemeen regime van den stroom, niet in het licht worden gesteld; alleen zijn de verstoringen in de bocht van Bath veelvuldiger en heviger geworden.

De zoogenaamde wet, volgens dewelke het aanbrengen van een dam in de bedding van een tijrivier het tijverschil op deze plaats verdubbelt, kan onmogelijk met de werkelijkheid overeenstemmen.

Een vergaarkom naast den stroom heeft een ongunstige uitwerking, van zoodra hij tusschenkomt als regelaar van het getij.

Het indijken van schorren en overstroomde gronden kan geen merklijken invloed uitoefenen op het regime van den stroom, maar een groote voorzichtigheid is geboden op den linkeroever rechtover Bath, wegens den terugslag welke deze werken zouden kunnen hebben op de natuurlijke evolutie van den stroom, die in deze streek nog aan den gang is.

De verbetering van den stroom, stroomafwaarts van Antwerpen, moet in de eerste plaats gericht zijn op de bocht van Bath; zij moet er naar streven den natuurlijke evolutieduur te verkorten, en tevens trachten den omvang te verminderen van de storingen die zich op deze plaats voordoen.

(Wordt voortgezet.)
