

	Pages
conduite au moyen de l'électricité. — Portes pour écluses de faible section	849
BELGIQUE. — La seigneurie de Gaesbeek. Notice historique de M. F. Vennekens. — Calcul et exécution des constructions en béton armé. Instructions à MM. les chefs de service des Ponts et Chaussées. — Standardisation des tuyauteries et appareils de distribution d'eau. Seconde partie. Standardisation des raccords.	859
FRANCE. — Le port de Bordeaux	876
ITALIE. — Le port de Gênes en 1922	877
PAYS-BAS. — Les murs de quai du port d'Amsterdam. Profondeurs devant les quais.	878
POLOGNE. — Protection du titre d'ingénieur en Pologne	881
RUSSIE. — L'alimentation de Moscou en énergie électrique . . .	882
DIVERS. — Préparation de l'huile de lin cuite	884

Comptes Rendus :

BELGIQUE. — Installations maritimes de Bruges. Exploitation. — Taxes. — Pension des cantonniers. — Barrage de la Gileppe. Vente des eaux. Relèvement des tarifs	885
---	-----

Bibliographie :

Les travaux publics et le bâtiment aux États-Unis (A. ANTOINE). — Traité d'urbanisme (E. JOYANT). — Résistance des matériaux analytique et graphique. Théories générales. poutres droites isostatiques et hyperstatiques (BERTRAND DE FONTVIOLANT). — Ce que doit être la cité moderne. Son plan, ses aménagements, ses organes, son hygiène, ses monuments et sa vie (D. BELLET et WILL DARVILLE). — Les méthodes modernes d'organisation industrielle (L. BENOIST et HERMANN). — Calcul des enveloppes de révolution avec applications aux réservoirs en béton armé et métalliques (P. DÉVÉDEC). — Union des Ingénieurs et architectes autrichiens. LXXV anniversaire	887
---	-----

VUES PHOTOGRAPHIQUES :
Le château de Gaesbeek.

PLANCHE X.

MÉMOIRES

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE THÉORIQUE

DES

FLEUVES A MARÉE

ET

APPLICATION AUX RIVIÈRES A MARÉE

DU

BASSIN DE L'ESCAUT MARITIME

PAR

L. BONNET

Ingénieur en chef Directeur des Ponts et Chaussées

Pl. VIII

(Fin).

Voir *Annales des travaux publics de Belgique*
fascicules 3, 4, 5 et 6 de 1922 et fascicules 1, 2 et 3 de 1923.

QUATRIÈME PARTIE.

Applications diverses de la théorie générale.

CHAPITRE I.

MARCHE A SUIVRE DANS LES ÉTUDES D'AMÉLIORATION DES FLEUVES ET DES AFFLUENTS A MARÉE.

—————
PLANCHE VIII (1).
—————

§ 1. — Fleuves à marée.

Le premier travail, qui doit être fait dans la rédaction d'un projet d'amélioration de fleuve à marée, est l'étude d'une marée moyenne du fleuve par l'observation directe et l'opération de la cubature. Cette première étude donnera des indications précises sur : les sections à marée haute, les profondeurs moyennes à mi-marée, les amplitudes de la marée, les volumes de flot, les débits d'amont, le niveau moyen du fleuve, les célérités de propagation de l'onde fluviale, les vitesses de flot et de jusant, les durées du gagnant et du perdant, du flot et du jusant, en un mot, sur tous les éléments qui ont une importance dans le régime maritime du fleuve. Quand cette étude préliminaire aura été faite, on fixera le profil en long des profondeurs moyennes à mi-marée qu'on désire voir réaliser. Ce profil sera choisi de telle manière qu'il assure une bonne propagation de la marée, l'extinction de l'onde fluviale à la limite de la partie maritime, l'évacuation des crues d'amont et la navigabilité du fleuve dans les conditions voulues. Il n'y aura, en général, pas grande incertitude quant au choix à faire de la loi des profondeurs moyennes à mi-marée, car l'étude du fleuve dans son état naturel aura donné des indications suffisamment précises sur les parties bonnes ou mauvaises du fleuve, sur les profondeurs à conserver ou à modifier. Ce n'est que dans le

(1) V. fascicule n° 3 de 1923.

cas, où l'on voudra convertir une rivière à régime fluvial en rivière à régime maritime, qu'on pourra devoir se livrer à quelques tâtonnements avant de pouvoir fixer définitivement le profil en long des profondeurs moyennes.

Lorsque ce profil en long aura été fixé, on se donnera la section mouillée à marée haute, soit à l'embouchure du fleuve, soit à la limite de la partie maritime, de manière que l'énergie de l'onde fluviale soit sensiblement amortie à l'extrémité du fleuve à marée. En général, la section d'embouchure est fixée par la topographie des lieux dans la partie aval du fleuve et l'on peut rarement la modifier sans avoir à exécuter des travaux difficiles et fort coûteux. C'est donc le plus souvent en partant de l'aval, qu'on déterminera les différentes sections du fleuve et l'on agira sur les profondeurs et la longueur de la partie maritime pour assurer l'équilibre hydrodynamique du fleuve. Si l'embouchure est manifestement défectueuse, par exemple : d'une largeur excessive, et si, d'autre part, les profondeurs et la longueur de la partie maritime ne peuvent varier que dans des limites étroites, c'est de la section d'égale vitesse à l'amont qu'il faudra partir pour déterminer toutes les autres sections du fleuve, y compris celle à l'embouchure. La section d'égale vitesse à la limite de la marée étant toujours très petite : 2 à 5 mètres carrés, cette section ne convient jamais pour assurer la navigation et l'évacuation des eaux supérieures. On doit donc toujours abandonner, dans la partie amont du fleuve, la loi de la constance de la vitesse moyenne du courant de marée et admettre une loi des vitesses décroissantes. Il faut convenir de la position et de la grandeur de la dernière section d'égale vitesse, qui satisfasse encore aux conditions imposées par la navigation et l'évacuation des eaux d'amont. On détermine ensuite la section à marée haute à la limite de la partie maritime : celle-ci dépend exclusivement du régime fluvial du cours d'eau. On se donne parfois aussi la loi des vitesses décroissantes, ou bien l'amplitude de la marée à l'extrémité de la partie maritime. Disposant d'un de ces éléments, on peut calculer avec un grand degré d'approximation, les sections définitives du fleuve. Ayant déterminé les différentes sections à marée haute, on procède au calcul des amplitudes de la marée et des largeurs du fleuve ; puis, ayant défini l'inclinaison des talus, on dessine les différents profils en travers du fleuve. Le calcul du niveau moyen du fleuve permet de repérer les profils

en travers par rapport à un même plan de comparaison et de tracer le profil en long du plafond ainsi que les lieux géométriques de marée haute et de marée basse.

De la détermination de la vitesse de propagation, on peut déduire l'heure de marée haute et de marée basse aux différents points du fleuve; de sorte qu'en se basant sur la forme des courbes locales relevées directement sur le fleuve, on peut tracer avec une très grande précision les courbes locales futures de la rivière.

La connaissance de ces éléments permet de déterminer les profils instantanés du fleuve et de procéder à l'opération de la cubature complète.

Dans les cas où il ne s'agit que d'une étude d'avant-projet, on peut supprimer la cubature du fleuve et procéder au calcul des débits de marée et des vitesses moyennes de flot et de jusant par les lois que nous avons établies pour les marées fluviales.

§ 2. — Affluents à marée.

Quand il s'agit d'un affluent à marée, la marche à suivre est absolument identique à celle qu'on suit pour un fleuve maritime; il n'y a guère que la détermination de la section d'embouchure qui puisse donner lieu à quelques études particulières. Trois cas peuvent se présenter dans le calcul de cette section :

1° On ne modifie pas le débit existant de la marée, ni dans le fleuve, ni dans l'affluent;

2° L'amplitude et le débit de la marée du fleuve sont maintenus, mais on change la répartition du débit de la marée entre l'affluent et la partie du fleuve en amont de l'affluent;

3° Le débit de la marée dans le fleuve ne change pas en amont du confluent, mais on l'augmente dans l'affluent. L'amplitude existante est maintenue.

Dans le premier cas, on détermine la section d'embouchure par la condition que l'amplitude de la marée soit la même dans le fleuve que dans l'affluent, ou bien, que la constante de la loi du débit soit la même dans l'affluent que dans le fleuve en amont du confluent.

Dans le second cas, on convient de la nouvelle répartition du volume de la marée et on calcule la section du fleuve en

amont du confluent ainsi qu'à l'embouchure de l'affluent de manière que l'amplitude de la marée soit conservée.

Dans le troisième cas, on se donne l'augmentation du débit de flot de l'affluent et on détermine les travaux à exécuter au fleuve en aval du confluent de manière à permettre la réalisation de l'augmentation de débit projetée; puis, on calcule la section à l'embouchure de l'affluent de manière à conserver l'amplitude de la marée.

§ 3. — Transformation d'un affluent à régime fluvial en affluent à régime maritime.

Il résulte de la théorie des marées fluviales que la transformation d'une rivière à régime fluvial en rivière à régime maritime ne peut renforcer en aucune manière la puissance hydraulique de l'onde marée qui se propage dans le fleuve. Si, donc, un affluent du fleuve est rendu maritime, sans qu'il soit exécuté de travaux au fleuve même, l'onde dérivée dans l'affluent sera entièrement prélevée sur l'onde qui remonte le cours du fleuve en amont du confluent.

La première étude, qui s'impose donc, est de rechercher les modifications qui seront apportées au régime du fleuve en amont du confluent par le travail projeté. Si les modifications ne sont pas de nature à compromettre la viabilité du fleuve, l'affluent peut être rendu maritime sans qu'il y ait lieu de se préoccuper davantage du fleuve même; mais si c'est le contraire qui se présente, il faut étudier au préalable les travaux à exécuter au fleuve en aval du confluent pour pouvoir renforcer l'énergie de l'onde fluviale dans une proportion telle, que l'affluent puisse être rendu maritime sans compromettre l'existence du fleuve en amont du confluent. Quand ce problème aura été résolu, on pourra terminer l'étude comme celle d'une rivière maritime dont l'énergie de l'onde à son embouchure est connue.

Nous donnons ci-après, à titre d'exemples, deux études d'amélioration de fleuve à marée : le problème de la « Grande Coupure de l'Escaut en aval d'Anvers » qui a tant passionné, dans les dernières années, le public en général et le monde des ingénieurs en particulier, et une étude d'amélioration de la Durme.

CHAPITRE II.

LA GRANDE COUPURE DE L'ESCAUT EN AVAL D'ANVERS.

Profil en long des profondeurs moyennes à mi-marée. — Nous ferons les calculs en supposant que les travaux commencent à 1 kilomètre en aval du poste marégraphique de Lillo, où nous maintiendrons la profondeur moyenne à mi-marée existante, soit 8^m,03. Nous admettrons qu'on veuille réaliser depuis Lillo jusqu'en amont de la rade d'Anvers une profondeur moyenne à mi-marée de 10 mètres; cette profondeur étant raccordée, par des éléments rectilignes, d'une part à la profondeur de 8^m,03, existant à l'origine aval des travaux, et d'autre part à celle de 8 mètres qu'on réaliserait au droit du Rupel. Ce nouveau profil en long donne un approfondissement de près de 2 mètres jusqu'en amont de la rade d'Anvers et une augmentation moyenne de profondeur de plus d'un mètre entre Anvers et le Rupel. Ces chiffres ne concernent évidemment que la profondeur *moyenne* à mi-marée et nullement la profondeur dans les passes navigables car, nous le répétons, la théorie des marées fluviales que nous avons établie ne résout pas la question des passes navigables dans le lit du fleuve. Il est toutefois infiniment probable que, si le fleuve subit un approfondissement moyen de 2 mètres, il y aura aussi une sérieuse amélioration dans les passes navigables et sur les seuils du fleuve.

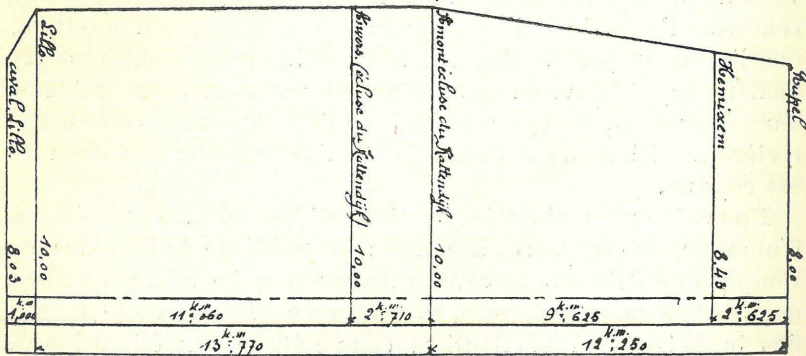


Fig. 28.

Profil en long des profondeurs moyennes à mi-marée.

Sections mouillées du fleuve à marée haute.

Section d'égale vitesse à 1 kilomètre en aval de Lillo : 9194 mètres carrés. (Voir calcul 3^e partie, chapitre III, § 1) $\log 9194 = 3,96350$.

1^o Section 1 km. aval Lillo-Lillo.

$$a = \frac{10 - 8.05}{1} = 1,97$$

Section à Lillo.

$$\log \zeta = 3,96350 - \frac{0,688}{1,97} \left(\frac{1}{\sqrt{8,05}} - \frac{1}{\sqrt{10}} \right) = 3,95057$$

$$\zeta = 8.924^{m^2}.$$

2^o Section Lillo. — 2,71 km. amont écluse Kattendyck.

$$\frac{0,344}{10^{3/2}} = 0,01089$$

Section à Anvers (Écluse du Kattendijk.)

$$\log \zeta = 3,95057 - 0,01089 \times 11,06 = 3,85057$$

$$\zeta = 6767^{m^2}$$

Section à 13km 77 en amont de Lillo.

$$\log \zeta = 2,95057 - 0,01089 \times 13,77 = 3,80067$$

$$\zeta = 6319^{m^2}.$$

3^o Section 2km.71 amont écluse Kattendijk-Rupel.

$$a = \frac{10 - 8}{12,25} = 0,1632$$

Profondeur à Hemixem.

$$10 - 0,1632 \times 9,625 = 8^{m},43$$

Section à Hemixem.

$$\log \zeta = 3,80067 - \frac{0,688}{0,1632} \left(\frac{1}{\sqrt{8,43}} - \frac{1}{\sqrt{10}} \right) = 3,68177$$

$$\zeta = 4806^{m^2}.$$

Section au Rupel.

$$\log \zeta = 3,80067 - \frac{0,688}{0,1632} \left(\frac{1}{\sqrt{8}} - \frac{1}{\sqrt{10}} \right) = 3,65157.$$

$$\zeta = 4481^{m^2}.$$

Tableau récapitulatif des sections calculées et existantes.

Stations.	Sections		Observations.
	calculées.	existantes.	
Origine des travaux	9194 m ²		
Lillo	8924	8416	
Anvers Kattendijk	6767	4935	
2km.71 amont écluse du Kattendijk	6319	5000	
Hemixem	4806	2926	
Rupel	4481	2845	

Si nous examinons les calculs ci-dessus, nous voyons que le projet de la « Grande Coupure » et l'approfondissement du lit apportent des modifications profondes dans le régime maritime du fleuve. Alors qu'on ne relève actuellement en rade d'Anvers que des sections de près de 5000 mètres carrés, l'exécution du projet « La Grande Coupure » permet d'y entretenir, dans les mêmes conditions qu'actuellement, des sections de plus de 6000 mètres carrés avec une profondeur moyenne à mi-marée de 10 mètres au lieu de 8^m.03. A Hemixem et au Rupel, les différences sont encore plus marquées, et si nous continuions les calculs plus loin vers l'amont dans l'Escaut, le Rupel et la Durme, nous pourrions faire des constatations absolument semblables.

Amplitudes de la marée et largeurs du fleuve.

Nous allons faire les calculs dans l'hypothèse où l'on réalise les sections d'égale vitesse calculées plus haut.

Lillo.

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,0426 + 0,0527 + \frac{0,125 \times 7}{20,25} + \frac{0,125}{0,706} \left(\frac{1}{4,5} - \frac{1}{8,05} \right) + \frac{0,125}{2,97} \left(\frac{1}{5,55} - \frac{1}{10} \right)}$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,1373} = 0,878$$

$$\left\{ \begin{aligned} h &= 0,878 \times 3,68 \times \frac{15}{10} \sqrt{\frac{5795}{l} \times \frac{8924}{86000}} \\ l \left(10 + \frac{h}{2} \right) &= 8924 \end{aligned} \right.$$

$$l = 751^m \qquad h = 3^m.76$$

Anvers-Kattendijk.

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,1373 + \frac{0,125 \times 11,06}{100}} = 0,868$$

$$\left\{ \begin{aligned} h &= 0,868 \times 3,68 \times \frac{15}{10} \sqrt{\frac{5795}{l} \times \frac{6767}{86000}} \\ l \left(10 + \frac{h}{2} \right) &= 8924 \end{aligned} \right.$$

$$l = 571^m \qquad h = 3^m,75$$

Anvers (2^{km},71 amont écluse du Kattendyk).

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,1373 + \frac{0,125 \times 15,77}{100}} = \frac{1}{1 + 0,1545} = 0,865$$

$$\left\{ \begin{aligned} h &= 0,865 \times 3,68 \times \frac{15}{10} \sqrt{\frac{5795}{l} \times \frac{6319}{86000}} \\ l \left(10 + \frac{h}{2} \right) &= 6319 \end{aligned} \right.$$

$$l = 553^m. \qquad h = 5,69^m.$$

Hemixem.

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,1545 + \frac{0,125}{0,1652} \left(\frac{1}{8,45} - \frac{1}{10} \right)} = 0,855$$

$$\left\{ \begin{aligned} h &= 0,855 \times 3,68 \times \frac{15}{8,45} \sqrt{\frac{5795}{l} \times \frac{4806}{86000}} \\ l \left(8,45 + \frac{h}{2} \right) &= 4806 \end{aligned} \right.$$

$$l = 460^m. \qquad h = 4^m,00.$$

Tableau récapitulatif des hauteurs de la marée et des largeurs du fleuve calculées et existantes.

Stations.	Amplitudes de la marée		Largeurs du lit	
	calculées.	existantes.	calculées.	existantes.
1 km. aval Lillo	—	4.45	—	800
Lillo	3.76	4.45	751	794, 2
Anvers-Kattendijk	3.73	4.37	571	430
2.71 amont Anvers-Kattendijk	3.69	4.36	533	506
Hemixem	4.00	4.31	460	296

Il résulte des calculs ci-dessus que l'onde marée subit un affaissement considérable en passant de l'extrémité aval des travaux au poste marégraphique de Lillo; cet affaissement, qui se maintient jusqu'en amont d'Anvers, est dû à l'approfondissement du lit du fleuve. Ce n'est guère qu'à Hemixem, où le fond s'est fortement relevé, que l'amplitude de la marée se rapproche de celle qui est observée actuellement.

Les largeurs du fleuve montrent des différences tout aussi marquées. A Lillo, le calcul indique un léger rétrécissement du lit, mais partout ailleurs c'est le contraire qui se présente. Ainsi à Anvers, la largeur doit être majorée de plus de 100 mètres et à Hemixem de près de 170 mètres.

On peut se demander ici, si la réduction rapide et notable de l'amplitude de la marée indiquée par le calcul à l'origine aval des travaux se produira réellement. Car, nous avons vu par l'étude de l'Escaut maritime et de ses affluents soumis à marée que la hauteur de la marée ne dépend pas de la largeur et de la profondeur mesurées exactement au point considéré du fleuve, mais d'une largeur et d'une profondeur moyenne du fleuve aux abords du point envisagé; que, d'autre part, tout élargissement ou tout étranglement brusque du fleuve, tout abaissement ou tout relèvement rapide du plafond font sentir leur influence à des centaines de mètres de distance. Dans ces

conditions, il peut paraître prudent de limiter l'appâtissement de l'onde marée de manière qu'il ne s'établisse pas un régime autre que celui qui est prévu par le calcul. Ce résultat peut être obtenu en diminuant la largeur du fleuve.

Proposons-nous donc de réaliser une hauteur de marée un peu plus grande, soit 4^m,10. La largeur du fleuve, qui correspond à cette amplitude, est donnée par la relation :

$$4,10 = 0,878 \times 3,68 \times \frac{15}{10} \sqrt{\frac{5795}{l} \times \frac{8924}{86000}}$$

$$l = 652 \text{ mètres.}$$

En faisant abstraction des triangles supplémentaires résultant de l'inclinaison des talus au-dessus du niveau de la mi-marée, la section de marée haute est égale à :

$$S = 652 \left(10 + \frac{4,10}{2} \right) = 7620 \text{ m}^2$$

au lieu de 8924 mètres carrés, qui représente la section d'égale vitesse.

Une question se pose également en rade d'Anvers. Là, le calcul montre qu'il faut élargir considérablement le fleuve. Cet élargissement est-il conciliable avec la situation existante? N'est-il pas à conseiller de prévoir un rétrécissement du fleuve pour augmenter la vitesse du courant et faciliter l'entretien du fleuve en rade d'Anvers? Voilà, certes, des questions qui présentent le plus haut intérêt pour l'avenir du port d'Anvers, et elles méritent d'être étudiées de très près avant qu'on ne prenne une décision à leur sujet. Il n'entre pas dans mes intentions de résoudre ici ce problème, car je sortirais ainsi du cadre de l'étude que je me suis imposée, soit l'élaboration d'un projet d'amélioration d'un fleuve à marée, à titre d'exemple de la théorie que nous avons établie. Nous supposons donc le problème résolu et nous admettrons qu'il a conduit à maintenir la largeur existante du fleuve, soit : 470 mètres environ. L'amplitude de la marée correspondant à cette largeur est égale à :

$$h = 0,868 \times 3,68 \times \frac{15}{10} \sqrt{\frac{5795}{470} \times \frac{6797}{86000}}$$

$$h = 4^m,10$$

soit la même amplitude qu'à Lillo. La section mouillée à marée

haute, abstraction faite des triangles supplémentaires situés au-dessus du niveau de marée, par suite de l'inclinaison des talus, est égale à :

$$\ell = 470 \left(10,00 + \frac{4,10}{2} \right) = 5660 \text{ m}^2$$

au lieu de 6797 mètres carrés, qui est la section d'égale vitesse.

A Hemixem, l'amplitude de la marée et la largeur du fleuve calculées plus haut concordent d'une manière très satisfaisante avec les dimensions trouvées pour la partie aval du fleuve; elles peuvent donc être maintenues dans un projet définitif

Niveau de mi-marée, vitesse de propagation, durées de flot et de jusant. — Ces différents éléments varieront très peu par suite de l'exécution de la « Grande Coupure », nous pouvons donc admettre, dans une étude d'avant-projet, les mêmes données que celles fournies par l'observation directe.

Volumes de remplissage. — Nous ferons les calculs dans deux hypothèses : 1° on réalise les sections d'égale vitesse; 2° on prévoit une amplitude de 4^m.10 à Lillo et à Anvers.

1° *Sections d'égale vitesse.*

Lillo.

$$M = 52500 \times 8924 \times \frac{1}{3,76} = 124.100.000 \text{ m}^3.$$

Anvers-Kattendyk.

$$M = 52500 \times 6767 \times \frac{1}{3,73} = 95.000.000 \text{ m}^3.$$

Hemixem.

$$M = 52500 \times 4806 \times \frac{1}{4,00} = 62.800.000 \text{ m}^3.$$

2° *Amplitude de 4^m.10 à Lillo et à Anvers.*

Lillo.

$$M = 52500 \times 8924 \times \frac{1}{4,10} = 113.800.000 \text{ m}^3.$$

Anvers-Kattendyk.

$$M = 52500 \times 6767 \times \frac{1}{4,10} = 86.300.000 \text{ m}^3.$$

Hemixem.

$$M = 52500 \times 4806 \times \frac{1}{4,00} = 62.800.000 \text{ m}^3.$$

A titre de comparaison, déterminons aussi les volumes actuels de la marée, corrigés en donnant à la constante C la valeur théorique de 52500 déterminée par l'étude de l'Escaut maritime.

Lillo.

$$M = 52500 \times 8879 \times \frac{1}{4,43} = 104.300.000 \text{ m}^3.$$

Anvers-Kattendyk.

$$M = 52500 \times 5485 \times \frac{1}{4,57} = 65.600.000 \text{ m}^3.$$

Hemixem.

$$M = 52500 \times 5565 \times \frac{1}{4,51} = 43.300.000 \text{ m}^3.$$

Tableau récapitulatif des volumes de la marée.

STATIONS	Volumes de la marée		
	actuels corrigés par les formules théoriques.	dans l'hypothèse où l'on réalise les sections d'égale vitesse	dans l'hypothèse où l'on réalise une amplitude de 4m.10 à Lillo et à Anvers.
Lillo	104.300.000	124.100.000	113.800.000
Anvers (Kattendijk)	65.600.000	95.000.000	86.300.000
Hemixem.	43.000.000	62.800.000	62.800.000

Il résulte des calculs ci-dessus que le volume de la marée est considérablement augmenté en amont de Lillo; à Anvers, l'augmentation atteint environ 40 ou 50 p. e., suivant qu'on réalise l'amplitude de 4^m.10 ou la section d'égale vitesse.

Débits de flot et de jusant. — Nous avons vu, par l'étude de l'Escaut dans son état actuel, que les débits d'eau d'amont à Lillo, Anvers et Hemixem s'élevaient approximativement à 91 mètres cubes; 85 mètres cubes et 80,5 mètres cubes. Ces

débites correspondent aux volumes d'eau suivants, pendant le flot et le jusant :

Lillo.

Débites des eaux d'amont, pendant le flot :

$$91 (5 \times 3600 + 50 \times 60) = 1\,911.000 \text{ m}^3,$$

pendant le jusant :

$$91 (44700 - 5 \times 3600 - 50 \times 60) = 2.156.700 \text{ m}^3.$$

Anvers.

Débites des eaux d'amont, pendant le flot :

$$85 (5 \times 3600 + 40 \times 60) = 1.735.000 \text{ m}^3,$$

pendant le jusant :

$$85 (41700 - 5 \times 3600 - 40 \times 60) = 2.065\,500 \text{ m}^3.$$

Hemixem.

Débites des eaux d'amont, pendant le flot :

$$80,5 (5 \times 3600 + 22 \times 60) = 1.558.000 \text{ m}^3,$$

pendant le jusant :

$$80,5 (44700 - 5 \times 3600 - 22 \times 60) = 2.045.090 \text{ m}^3.$$

Connaissant les volumes de remplissage et les débits d'eau d'amont, nous pouvons calculer les débits de flot et de jusant du fleuve amélioré. Ces éléments sont réunis dans le tableau ci-dessous.

Stations.	Volumes de remplissage		Débits des eaux d'amont pendant le		Sections d'égale vitesse. Débits de		Amplitudes de 4.10 m. Débits de	
	pour des sections d'égale vitesse	pour une amplitude de 4.10 m.	flot.	jusant	flot.	jusant.	flot.	jusant.
Lillo. . .	124.100.000	113.800.000	1.911.000	2.156.700	122.189.000	126.256.700	111.889.000	115.956.700
Anvers . .	95.000.000	86.300.000	1.735.000	2.065.500	93.265.000	97.065.500	84.565.000	88.365.500
Hemixem .	62.800.000	62.800.000	1.558.000	2.043.000	61.242.000	64.843.090	61.242.000	64.843.090

Vitesse moyenne du courant de flot et de jusant.

1° Section d'égale vitesse.

Lillo.

Vitesse moyenne de flot :

$$v_f = \frac{122.189.000}{751 \left[8,12 + 1,88 \left(1 + \frac{4800}{21000} \right) \right] 21000} = 0^m,743.$$

Vitesse moyenne de jusant :

$$v_j = \frac{126.256.700}{751 \left[8,12 + 1,88 \left(1 - \frac{4800}{23700} \right) \right] 23700} = 0^m,745.$$

Vitesse moyenne générale du courant de marée :

$$u = \frac{0^m,743 \times 21000 + 0^m,745 \times 23700}{44700} = 0^m,744.$$

Anvers.

Vitesse moyenne de flot :

$$v_f = \frac{93.265.000}{15 \left[8,13 + 1,87 \left(1 + \frac{4800}{20400} \right) \right] 20400} = 0^m,766.$$

Vitesse moyenne de jusant :

$$v_j = \frac{97.065.500}{571 \left[8,13 + 1,87 \left(1 - \frac{4800}{24500} \right) \right] 24500} = 0^m,676.$$

Vitesse moyenne générale du courant de marée :

$$u = \frac{0^m,766 \times 20400 + 0^m,676 \times 24500}{44700} = 0^m,715.$$

Hemixem.

Vitesse moyenne de flot :

$$v_f = \frac{61.242.000}{460 \left[6,43 + 2,00 \left(1 + \frac{4800}{19320} \right) \right] 19320} = 0^m,772.$$

Vitesse moyenne de jusant :

$$v_j = \frac{64.843.090}{460 \left[6,43 + 2,00 \left(1 - \frac{4800}{25580} \right) \right] 25580} = 0^m,674.$$

Vitesse moyenne générale du courant de marée :

$$u = \frac{0^m,772 \times 19320 + 0^m,674 \times 25580}{44700} = 0^m,713.$$

2° Amplitude de 4.10 m. à Lillo et à Anvers.

Lillo.

Vitesse moyenne de flot :

$$v_f = \frac{111.889.000}{632 \left[7,95 + 2,05 \left(1 + \frac{4800}{21000} \right) \right] 21000} = 0^m,804.$$

Vitesse moyenne de jusant :

$$v = \frac{415.956.700}{632 \left[7,95 + 2,05 \left(1 - \frac{4800}{23700} \right) \right] 23700} = 0^m,808.$$

Vitesse moyenne générale du courant de marée :

$$u = \frac{0^m,804 \times 21000 + 0^m,808 \times 23700}{44700} = 0^m,806.$$

Anvers :

Vitesse moyenne de flot :

$$v_f = \frac{84.565.000}{470 \left[7,95 + 2,05 \left(1 + \frac{4800}{20400} \right) \right] 20400} = 0^m,842.$$

Vitesse moyenne de jusant :

$$v_j = \frac{88.565.500}{470 \left[7,95 + 2,05 \left(1 - \frac{4800}{24300} \right) \right] 24300} = 0^m,743.$$

Vitesse moyenne générale du courant de marée :

$$u = \frac{0^m,842 \times 20400 + 0^m,743 \times 24300}{44700} = 0^m,79.$$

Hemixem. — Les calculs sont les mêmes que dans le 1°, puisque la section d'égalité vitesse est maintenue.

Tableau récapitulatif.

Stations.	Vitesse moyenne du courant.	
	Section d'égalité vite-se.	Amplitude de 4m.10 à Lillo et Anvers.
Lillo	0.744	0.806
Anvers	0.715	0.79
Hemixem.	0.713	0.713

Le tableau ci-dessus montre que la vitesse moyenne générale du courant de marée est un peu supérieure à 0^m,70 dans l'hy-

pothèse où l'on réalise les sections d'égalité vitesse et qu'elle est approximativement égale à 0^m,80 dans le cas où l'on réalise une amplitude de 4^m,10 à Anvers et à Lillo.

Conclusion. — Il résulte des calculs ci-dessus que la « Grande Coupure » augmente considérablement l'énergie de l'onde marée en amont de Lillo et qu'elle améliore notablement la situation du fleuve en rade d'Anvers ; mais ils montrent aussi que le projet de la « Grande Coupure » constitue un travail gigantesque, qui exige un remaniement complet du fleuve, non pas seulement entre Lillo et Anvers, mais aussi en amont d'Anvers sur des dizaines, peut-être une centaine de kilomètres de longueur. Dans ces conditions, le programme des travaux, le mode et les moyens d'exécution devront faire l'objet d'une étude très sérieuse si l'on veut éviter des mécomptes ou des accidents, réparables probablement, mais seulement au prix de dépenses supplémentaires considérables.

En présence d'un projet d'aussi vaste envergure et aussi difficile que compliqué d'exécution, on peut se demander si l'amélioration et l'approfondissement du fleuve en aval d'Anvers ne peuvent pas être réalisés par l'exécution de travaux moins importants. A notre avis, oui : cette amélioration peut être atteinte en maintenant sensiblement le cours actuel du fleuve. Il suffit à cet effet : de diminuer la largeur du fleuve en quelques points et d'y augmenter la profondeur par voie de dragages ; de redresser quelques coudes trop brusques et d'éviter autant que possible un allongement du fleuve, car tout accroissement de longueur signifie déperdition d'énergie, qui ne peut être regagnée que par un approfondissement supplémentaire du fleuve, d'où une nouvelle dépense qu'il vaut mieux éviter.

CHAPITRE III.

PROJET D'AMÉLIORATION DE LA DURME.

Le projet est dressé en partant d'un nouveau tracé de la Durme établi par le service des Ponts et Chaussées. Ce tracé, qui n'est pas encore entièrement mis au point, vise à supprimer les nombreux méandres qui entravent singulièrement la navigation et à donner à la rivière une profondeur et une largeur suffisantes, pour pouvoir amener à Lokeren des bateaux d'au moins 1.000 tonnes et plus en amont, des bateaux

de 300 à 600 tonnes. En vue d'atteindre ce but, la rivière a été considérablement raccourcie et on se propose de réaliser des profondeurs beaucoup plus grandes que celles qui existent maintenant. Actuellement, la rivière mesure 26,050 km. depuis son embouchure dans l'Escaut jusqu'au confluent du Moervaert et de la Zuidlede à Dacknam. Suivant le nouveau tracé (voir pl. 7), la rivière ne mesure plus qu'une longueur de 18,680 km. Pour satisfaire aux conditions imposées par la navigation, on a admis une loi des profondeurs moyennes à mi-marée linéaire réalisant une profondeur moyenne de 5 mètres à l'embouchure de la Durme, et 2^m.90 au confluent du Moervaert et de la Zuidlede. (Voir ci-dessous le profil en long des profondeurs moyennes fig. 29). Nous verrons, à la fin

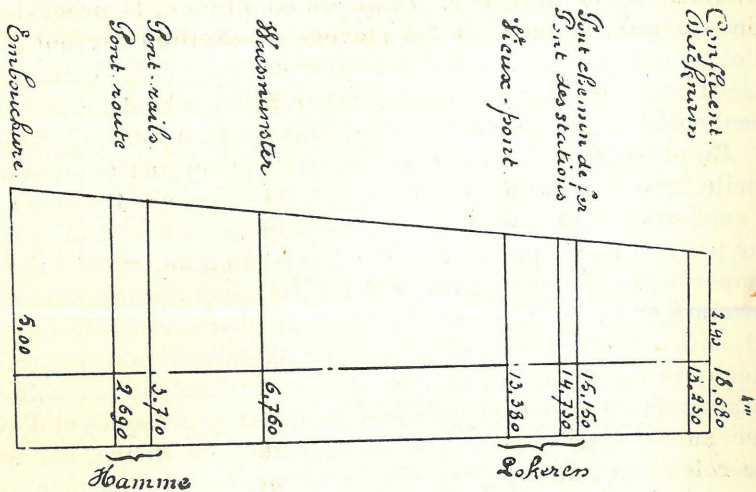


Fig. 29.

Profil en long des profondeurs moyennes à mi-marée.

de notre étude, que ce profil en long réalise sous marée basse moyenne une profondeur de plus de 2^m.61 jusqu'à Lokeren et de plus de 2^m.19 jusqu'au confluent du Moervaert et de la Zuidlede.

Nous verrons aussi plus loin qu'avec les données admises la largeur de la rivière à mi-marée dépasse 42^m.20 jusqu'à Lokeren et 34^m.20 jusqu'au confluent du Moervaert et de la Zuidlede. Dans ces conditions, les données qu'on s'impose

assurent dans de très bonnes conditions la navigation qu'on veut voir s'établir sur la Durme.

Pour définir complètement les données du problème, il reste encore à fixer la section d'équilibre à marée haute à l'embouchure de la Durme.

Si l'on ne veut pas modifier le régime d'équilibre de l'Escaut, il faut maintenir la section à marée haute existante à l'embouchure de la Durme. Cette section a été établie par l'étude de la Durme dans son état actuel; nous avons alors vu que cette section mesurait 456,50 m².

C'est cette section que nous adopterons dans notre étude d'amélioration de la Durme.

§ 1. — Calcul des sections à marée haute d'égale vitesse.

Section à l'embouchure : 456,50 m²; $\log 456,5 = 2,65944$.

Le coefficient de variation a de la profondeur moyenne à mi-marée est égal à :

$$a = \frac{5,00 - 2,90}{18,680} = 0,1124.$$

D'où :

$$\lambda = 5 \text{ m.} - 0,1124x.$$

Les profondeurs moyennes à mi-marée aux points principaux de la rivière mesurent :

Hamme :

Pont-route	4 ^m ,70
Pont-rails	4 ^m ,58
Waesmunster	4 ^m ,24

Lokeren :

Vieux pont	3 ^m ,50
Pont des stations	3 ^m ,34
Pont du Chemin de fer	3 ^m ,50
Dacknam	2 ^m ,95
Confluent	2 ^m ,90

Les sections à marée haute correspondant à une vitesse

moyenne générale du courant de marée constante sont égales à :

Hamme (pont-route) :

$$\log \ell = 2,65944 - \frac{0,688}{0,1124} \left(\frac{1}{\sqrt{4,70}} - \frac{1}{\sqrt{5}} \right) = 2,56764 = \log 369,50 \text{ m}^2.$$

Hamme (pont-rails) :

$$\log \ell = 2,65944 - \frac{0,688}{0,1124} \left(\frac{1}{\sqrt{4,58}} - \frac{1}{\sqrt{5}} \right) = 2,55702 = \log 344,40 \text{ m}^2.$$

Waesmunster :

$$\log \ell = 2,65944 - \frac{0,688}{0,1124} \left(\frac{1}{\sqrt{4,24}} - \frac{1}{\sqrt{5}} \right) = 2,42644 = \log 266,95 \text{ m}^2.$$

Lokeren (vieux pont) :

$$\log \ell = 2,65944 - \frac{0,688}{0,1124} \left(\frac{1}{\sqrt{3,50}} - \frac{1}{\sqrt{5}} \right) = 2,12386 = \log 133,00 \text{ m}^2.$$

Lokeren (pont des stations) :

$$\log \ell = 2,65944 - \frac{0,688}{0,1124} \left(\frac{1}{\sqrt{3,34}} - \frac{1}{\sqrt{5}} \right) = 2,04744 = \log 111,55 \text{ m}^2.$$

Lokeren (pont du chemin de fer) :

$$\log \ell = 2,65944 - \frac{0,688}{0,1124} \left(\frac{1}{\sqrt{3,50}} - \frac{1}{\sqrt{5}} \right) = 2,02898 = \log 106,90 \text{ m}^2.$$

Dacknam :

$$\log \ell = 2,65944 - \frac{0,688}{0,1124} \left(\frac{1}{\sqrt{2,95}} - \frac{1}{\sqrt{5}} \right) = 1,85311 = \log 68,10 \text{ m}^2.$$

Confluent :

$$\log \ell = 2,65944 - \frac{0,688}{0,1124} \left(\frac{1}{\sqrt{2,90}} - \frac{1}{\sqrt{5}} \right) = 1,80250 = \log 63,45 \text{ m}^2.$$

Pour déterminer les sections définitives de la rivière, nous admettrons une diminution de la vitesse moyenne générale du courant de marée à mesure qu'on remonte vers l'amont. Nous verrons plus loin que la vitesse moyenne du courant de marée à l'embouchure mesure : 0^m,525. Admettons au confluent à Dacknam une vitesse de 0^m,307; dès lors, la loi de variation de la vitesse sur la rivière a la forme :

$$0,307 = 0,525 - w \times 18,680.$$

D'où :

$$w = \frac{0,525 - 0,307}{18,680} = 0,01165$$

et

$$w' = \frac{0,01165}{1,15 \times 0,525} = 0,0193.$$

La connaissance du coefficient w' nous permet de calculer les sections définitives à marée haute de la rivière. Celles-ci sont :

Hamme (pont-route) :

$$\log \left(\frac{1}{1 - 0,0193 \times 2,69} \right)^2 = \log 1,112 = 0,04610$$

$$\log \ell = 2,56764 + 0,04610 = 2,61374 = \log 410,90 \text{ m}^2.$$

Hamme (pont-rails) :

$$\log \left(\frac{1}{1 - 0,0193 \times 3,71} \right) = \log 1,160 = 0,06446$$

$$\log \ell = 2,55702 + 0,06446 = 2,62148 = \log 399,50 \text{ m}^2.$$

Waesmunster :

$$\log \left(\frac{1}{1 - 0,0193 \times 6,76} \right) = \log 1,522 = 0,12123$$

$$\log \ell = 2,42644 + 0,12123 = 2,54767 = \log 352,90 \text{ m}^2.$$

Lokeren (vieux pont) :

$$\log \left(\frac{1}{1 - 0,0193 \times 13,38} \right) = \log 1,818 = 0,25959$$

$$\log \ell = 2,12386 + 0,25959 = 2,38345 = \log 241,80 \text{ m}^2.$$

Lokeren (pont des stations) :

$$\log \left(\frac{1}{1 - 0,0193 \times 14,73} \right) = \log 1,952 = 0,29048$$

$$\log \ell = 2,04744 + 0,29048 = 2,33792 = \log 217,75 \text{ m}^2.$$

Lokeren (pont du chemin de fer) :

$$\log \left(\frac{1}{1 - 0,0193 \times 15,15} \right) = \log 1,995 = 0,29994$$

$$\log \ell = 2,02898 + 0,29994 = 2,32892 = \log 213,50 \text{ m}^2.$$

Dacknam :

$$\log \left(\frac{1}{1 - 0,0193 \times 18,23} \right) = \log 2,380 = 0,37657$$

$$\log \ell = 1,85311 + 0,37657 = 2,22968 = \log 166,00 \text{ m}^2.$$

Confluent :

$$\log \left(\frac{1}{1 - 0,0193 \times 18,68} \right) = \log 2,450 = 0,38916$$

$$\log \ell = 1,80250 + 0,38916 = 2,19166 = \log 155,50 \text{ m}^2.$$

Les sections ci-dessus correspondent aux vitesses du courant général de marée suivantes :

Hamme (pont route) :

$$v = 0^m.525 - 0.01165 \times 269 = 0^m.525 - 0.0313 = 0^m.494$$

Hamme (pont-rails) :

$$v = 0.525 - 0.01165 \times 3.71 = 0.525 - 0.0432 = 0.493$$

Waesmunster :

$$v = 0.525 - 0.01165 \times 6.76 = 0.525 - 0.0787 = 0.446$$

Lokeren (vieux pont) :

$$v = 0.525 - 0.01165 \times 13.38 = 0.525 - 0.1558 = 0.36$$

Lokeren (pont des stations) :

$$v = 0.525 - 0.01165 \times 14.73 = 0.525 - 0.1724 = 0.35$$

Lokeren (pont du chemin de fer) :

$$v = 0.525 - 0.01165 \times 15.15 = 0.525 - 0.1765 = 0.34$$

Dacknam :

$$v = 0.525 - 0.01165 \times 18.23 = 0.525 - 0.215 = 0.310$$

Confluent :

$$v = 0.525 - 0.01165 \times 18.68 = 0.525 - 0.218 = 0.307$$

§ 2. — Calcul des amplitudes de la marée et des largeurs à mi-marée.

Pour calculer les largeurs à mi-marée et les amplitudes de la marée correspondantes, des différentes sections de la rivière, considérées ci-dessus, il faut retrancher au préalable des dites

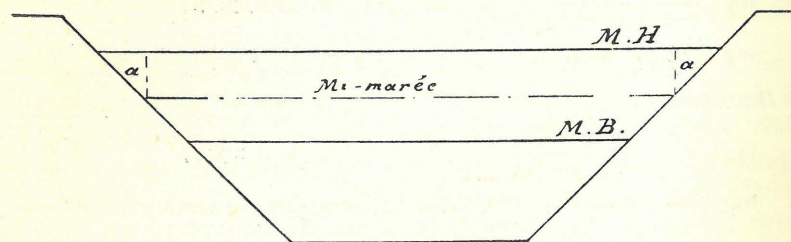


Fig. 30.

sections la surface des triangles supplémentaires a dus à l'inclinaison des talus, de manière à ne plus avoir que des sections rectangulaires, dont la profondeur sous mi-marée soit celle de la loi des profondeurs admises. Nous admettrons que

l'inclinaison des talus varie d'une manière continue : de 12/4 à l'embouchure à 8/4 à Dacknam.

Surface des triangles supplémentaires :

$$\text{Embouchure : } 2 \times \frac{12}{4} \times 2 \times \frac{1}{2} \times 2 = 1200 \text{ m}^2$$

$$\text{Dacknam : } 1.525 \times \frac{8}{4} \times 1.525 \times \frac{1}{2} \times 2 = 4.652 \text{ m}^2$$

$$\text{Différence : } \overline{7.348 \text{ m}^2}$$

Variation de la surface des triangles supplémentaires par kilomètre de longueur :

$$\frac{7,348}{18,68} = 0,3925 \text{ m}^2.$$

Sections réduites.

Hamme (pont-route) :

$$12^{\text{m}^2} - 0,3935 \times 2,69 = 10^{\text{m}^2},94 \quad 410^{\text{m}^2},90 - 10,94 = 399^{\text{m}^2},96$$

Hamme (pont-rails) :

$$12^{\text{m}^2} - 0,3935 \times 3,71 = 10^{\text{m}^2},54 \quad 399^{\text{m}^2},50 - 10,54 = 388^{\text{m}^2},96$$

Waesmunster :

$$12^{\text{m}^2} - 0,3935 \times 6,76 = 9^{\text{m}^2},34 \quad 352^{\text{m}^2},90 - 9,34 = 343^{\text{m}^2},56$$

Lokeren (vieux pont) :

$$12^{\text{m}^2} - 0,3935 \times 13,38 = 6^{\text{m}^2},73 \quad 241^{\text{m}^2},80 - 6,73 = 235^{\text{m}^2},07$$

Lokeren (pont des stations) :

$$12^{\text{m}^2} - 0,3935 \times 14,73 = 6^{\text{m}^2},21 \quad 217^{\text{m}^2},75 - 6,21 = 211^{\text{m}^2},54$$

Lokeren (pont du chemin de fer) :

$$12^{\text{m}^2} - 0,3935 \times 15,15 = 6^{\text{m}^2},04 \quad 213^{\text{m}^2},50 - 6,04 = 207^{\text{m}^2},46$$

Dacknam :

$$12^{\text{m}^2} - 0,3935 \times 18,23 = 4^{\text{m}^2},83 \quad 166^{\text{m}^2},00 - 4,83 = 161^{\text{m}^2},17$$

Confluent :

$$12^{\text{m}^2} - 0,3935 \times 18,68 = 4^{\text{m}^2},62 \quad 155^{\text{m}^2},50 - 4,65 = 150^{\text{m}^2},85$$

Calculons maintenant la valeur du coefficient de réduction φ aux différents points importants de la rivière :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0,125}{a} \left(\frac{1}{\lambda_{\text{min.}}} - \frac{1}{\lambda_{\text{max.}}} \right)}.$$

Hamme (pont-route) :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0,125}{0,1124} \left(\frac{1}{4,70} - \frac{1}{5} \right)} = 0,986.$$

Hamme (pont-rails) :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0,125}{0,1124} \left(\frac{1}{4,58} - \frac{1}{5} \right)} = 0,980.$$

Waesmunster :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0,125}{0,1124} \left(\frac{1}{4,24} - \frac{1}{5} \right)} = 0,964.$$

Lokeren (vieux pont) :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0,125}{0,1124} \left(\frac{1}{3,5} - \frac{1}{5} \right)} = 0,915.$$

Lokeren (pont des stations) :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0,125}{0,1124} \left(\frac{1}{3,54} - \frac{1}{5} \right)} = 0,905.$$

Lokeren (pont du chemin de fer) :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0,125}{0,1124} \left(\frac{1}{3,3} - \frac{1}{5} \right)} = 0,896.$$

Dacknam :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0,125}{0,1124} \left(\frac{1}{3,30} - \frac{1}{5} \right)} = 0,865.$$

Confluent :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0,125}{0,1124} \left(\frac{1}{2,9} - \frac{1}{5} \right)} = 0,860.$$

Calculons encore la largeur théorique à l'embouchure de la rivière correspondant à l'amplitude observée de 4 mètres :

$$l \left(5^m,00 + \frac{4,00}{2} \right) = 456^m,5 - 12 = 444^m,5$$

$$l = 63^m,5.$$

Moyennant la connaissance des différents éléments ci-dessus, nous pouvons procéder au calcul des amplitudes et des largeurs à mi-marée aux différents points importants de la rivière.

Hamme (pont-route) :

$$h = 4 \times 0,986 \times \frac{5,00}{4,70} \sqrt{\frac{65,5}{l} \times \frac{369,5}{456,5}} = 4,185 \sqrt{\frac{51,4}{l}}$$

$$l \left(4,70 + \frac{h}{2} \right) = 599,96$$

d'où $h = 5^m,87$ $l = 60,20$

Hamme (pont-rails) :

$$h = 4 \times 0,98 \times \frac{5,00}{4,58} \sqrt{\frac{65,5}{l} \times \frac{544,4}{456,5}} = 4,28 \sqrt{\frac{47,9}{l}}$$

$$l \left(4,58 + \frac{h}{2} \right) = 388,96$$

d'où $h = 5^m,85$ $l = 60 \text{ m.}$

Waesmunster :

$$h = 4 \times 0,964 \times \frac{5,00}{4,24} \sqrt{\frac{65,5}{l} \times \frac{266,95}{456,50}} = 4,55 \sqrt{\frac{37,1}{l}}$$

$$l \left(4,24 + \frac{h}{2} \right) = 345,56$$

d'où $h = 5^m,69$ $l = 56^m,40$

Lokeren (vieux pont) :

$$h = 4 \times 0,915 \times \frac{5,00}{3,50} \sqrt{\frac{65,5}{l} \times \frac{135}{456,5}} = 5,22 \sqrt{\frac{18,5}{l}}$$

$$l \left(3,50 + \frac{h}{2} \right) = 255,07$$

d'où $h = 5^m,52$ $l = 45^m,70.$

Lokeren (pont des stations) :

$$h = 4 \times 0,905 \times \frac{5,00}{3,54} \sqrt{\frac{65,5}{l} \times \frac{111,55}{456,5}} = 5,57 \sqrt{\frac{15,5}{l}}$$

$$l \left(3,54 + \frac{h}{2} \right) = 211,54$$

d'où $h = 5^m,25$ $l = 42^m,50.$

Lokeren (pont du chemin de fer) :

$$h = 4 \times 0.896 \times \frac{5.00}{5.50} \sqrt{\frac{65.5}{l} \times \frac{106.9}{456.5}} = 5.45 \sqrt{\frac{14.85}{l}}$$

$$l \left(5^m.50 + \frac{h}{2} \right) = 207.46$$

d'où $h = \underline{5^m.22}$ $l = \underline{42^m.20}$.

Dacknam :

$$h = 4 \times 0.865 \times \frac{5.00}{2.95} \sqrt{\frac{65.5}{l} \times \frac{68.1}{456.5}} = 5.87 \sqrt{\frac{9.47}{l}}$$

$$l \left(2.95 + \frac{h}{2} \right) = 161.17$$

d'où $h = \underline{5 \text{ m.}}$ $l = \underline{56^m.50}$

Confluent :

$$h = 4 \times 0.860 \times \frac{5.00}{2.90} \sqrt{\frac{65.5}{l} \times \frac{65.45}{456.5}} = 5.95 \sqrt{\frac{8.825}{l}}$$

$$l \left(2.90 + \frac{h}{2} \right) = 150.85$$

d'où $h = \underline{2^m.99}$ $l = \underline{54^m.20}$

Stations.	Profondeur moyenne à		Vitesse de propagation $\sqrt{g(H+h)}$		Coefficient de réduction $1 + \frac{1}{(F)}$
	M. H.	M. B.	M. H.	M. B.	
Embouchure	m. 7,00	m. 3,00	m. 8,28	m. 5,42	0,986
Hamme (Pont-route) . . .	6,64	2,77	8,07	5,21	0,983
Hamme (Pont rails) . . .	6,50	2,67	8,00	5,12	0,983
Waesmunster	6,09	2,40	7,74	4,86	0,982
Lokeren (V. P.)	5,16	1,84	7,12	4,25	0,974
Lokeren (P. St.)	4,96	1,71	6,99	4,09	0,972
Lokeren (P. C. F.)	4,91	1,69	6,95	4,06	0,971
Dacknam	4,45	1,45	6,61	3,77	0,965
Confluent	4,40	1,41	6,57	3,72	0,963

Lokeren (pont du chemin de fer) :

$$h = 4 \times 0.896 \times \frac{5.00}{5.50} \sqrt{\frac{65.5}{l} \times \frac{106.9}{456.5}} = 5.45 \sqrt{\frac{14.85}{l}}$$

$$l \left(5^m.50 + \frac{h}{2} \right) = 207.46$$

d'où $h = \underline{5^m.22}$ $l = \underline{42^m.20}$.

Dacknam :

$$h = 4 \times 0.865 \times \frac{5.00}{2.95} \sqrt{\frac{65.5}{l} \times \frac{68.1}{456.5}} = 5.87 \sqrt{\frac{9.47}{l}}$$

$$l \left(2.95 + \frac{h}{2} \right) = 161.17$$

d'où $h = \underline{5 \text{ m.}}$ $l = \underline{56^m.50}$

Confluent :

$$h = 4 \times 0.860 \times \frac{5.00}{2.90} \sqrt{\frac{65.5}{l} \times \frac{65.45}{456.5}} = 5.95 \sqrt{\frac{8.825}{l}}$$

$$l \left(2.90 + \frac{h}{2} \right) = 150.85$$

d'où $h = \underline{2^m.99}$ $l = \underline{54^m.20}$

Les vitesses

Marée haute : W

Marée basse : W

Les calculs

Stations.	Profondeur moyenne à		Vitesse de propagation $\sqrt{g(H+h)}$		Coefficient de réduction.		Vitesse corrigée
	M. H.	M. B.	M. H.	M. B.	$1 + \frac{0.70}{(H+h^2)}$		
Embouchure	m. 7,00	m. 3,00	m. 8,28	m. 5,42	0,986	0,928	m. 8,17
Hamme (Pont-route) . . .	6,64	2,77	8,07	5,21	0,983	0,917	7,94
Hamme (Pont rails) . . .	6,50	2,67	8,00	5,12	0,983	0,911	7,87
Waesmunster	6,09	2,40	7,74	4,86	0,982	0,892	7,66
Lokeren (V. P.)	5,16	1,84	7,12	4,25	0,974	0,828	6,93
Lokeren (P. St.)	4,96	1,71	6,99	4,09	0,972	0,807	6,80
Lokeren (P. C. F.)	4,91	1,69	6,95	4,06	0,971	0,802	6,75
Dacknam	4,45	1,45	6,61	3,77	0,965	0,750	6,37
Confluent	4,40	1,41	6,57	3,72	0,963	0,738	6,33

3. — Calcul de la vitesse de propagation de la marée.

Les vitesses de propagation de la marée sont données par les formules suivantes :

$$+ \frac{1}{0,70} \sqrt{9,81 (H + h) + 0,8 \times (\text{vitesse moyenne du courant de marée})} \left] \frac{H + h}{H + 2h} \right.$$

$$- \frac{1}{0,70} \sqrt{9,81 \times H - 0,8 \times (\text{vitesse moyenne du courant de marée})} \left] \frac{1}{H^2} \right.$$

Les résultats sont indiqués dans le tableau ci-dessous

Vitesse moyenne de la marée (voir § 1). <i>v.</i>	0.8 <i>v</i>	Vitesse de propagation à marée haute plus 0.8 <i>v</i>	$H + 2h$	$\frac{H + h}{H + 2h}$	Vitesse réelle de propagation.		Vitesse moyenne de propagation.		Entre-distance en mètres.	Temps de propagation.		Heure de marée.		Durée du	
					M. H.	M. B.	M. H.	M. B.		Marée haute.	Marée basse.	Haute.	Basse.	gagnant.	perdant
m. 0,525	m. 0,420	m. 8,590	m. 11,00	m. 0,636	m. 5,47	m. 4,61	m. 5,365	m. 4,492	m. 2690	8'22"	9'58"	3h. 29'	10h.50'	5h.4'	7h.21'
0,494	0,396	8,336	10,51	0,631	5,26	4,374	5,225	4,325	1020	3'15"	3'56"	3h.37'22"	10h.59'58"	5h.2'24"	7h.22'36"
0,493	0,395	8,265	10,33	0,628	5,19	4,275	5,085	4,124	3050	9'58"	12'17"	3h.40'37"	11h.3'54"	5h.1'43"	7h.23'17"
0,446	0,357	8,017	9,78	0,622	4,98	3,973	4,700	3,599	6620	23'30"	30'40"	3h.50'35"	11h.16'41"	4h.59'24"	7h.25'36"
0,369	0,295	7,225	8,48	0,609	4,42	3,225	4,350	3,122	1350	5'10"	7'12"	4h.14'15"	11h.46'51"	4h.52'14"	7h.32'46"
0,353	0,282	7,082	8,21	0,604	4,28	3,018	4,265	2,995	420	1'38"	2'21"	4h.19'15"	11h.54'3"	4h.50'12"	7h.34'48"
0,349	0,279	7,029	8,13	0,604	4,25	2,971	4,105	2,777	3080	12'30"	18'30"	4h.20'53"	11h.56'24"	4h.49'29"	7h.35'31"
0,310	0,248	6,618	7,45	0,598	3,96	2,582	3,940	2,543	450	1'54"	2'57"	4h.33'23"	12h.14'54"	4h.43'29"	7h.41'31"
0,307	0,246	6,576	7,39	0,595	3,92	2,504						4h.34'17"	12h.17'51"	4h.41'26"	7h.43'34"

Comme le débit d'amont est insignifiant vis-à-vis du débit de la marée, nous pouvons admettre d'un bout de la rivière à l'autre que la durée du gagnant est sensiblement égale à celle du flot, et la durée du perdant à celle du jusant. Ceci nous permet d'écrire les durées du flot et du jusant.

marée.	Durée du	
	gagnant.	perdant
Basse.		
10h.50'	5h.4'	7h.21'
10h.59'58"	5h.2'24"	7h.22'36"
11h.3'54"	5h.1'43"	7h.23'17"
11h.16'41"	4h.59'24"	7h.25'36"
11h.46'51"	4h.52'14"	7h.32'46"
11h.54'3"	4h.50'12"	7h.34'48"
11h.56'24"	4h.49'29"	7h.35'31"
12h.14'54"	4h.43'29"	7h.41'31"
12h.17'51"	4h.41'26"	7h.43'34"

Stations.	Durée en heures minutes et secondes du		Durée en secondes du	
	flot.	jusant.	flot.	jusant.
Embouchure	5 h. 4'00"	7 h. 21'00"	18240"	26460"
Hamme (pont-route) . . .	5 h. 2'24"	7 h. 22'36"	18144"	26556"
Hamme (pont-rails). . . .	5 h. 1'43"	7 h. 23'17"	18103"	26597"
Waesmunster	4 h. 59'24"	7 h. 25'36"	17964"	26736"
Lokeren (vieux pont) . . .	4 h. 52'14"	7 h. 32'46"	17534"	27166"
Id. pont du chemin de de fer	4 h. 50'12"	7 h. 34'48"	17412"	27288"
Id. (pont du chemin de fer)	4 h. 49'29"	7 h. 35'31"	17369"	27331"
Dacknam	4 h. 43'29"	7 h. 41'31"	17009"	27691"
Confluent	4 h. 41'26"	7 h. 43'34"	16886"	27814"

§ 4. — Calcul des volumes de remplissage et des débits d'amont, de flot et de jusant.

Les volumes de remplissage doivent être calculés par la loi du débit, en remarquant que l'étude de la Durme, dans son état actuel, a montré que la valeur de la constante C est environ : 32750.

$$\begin{aligned} \text{Embouchure} & \frac{327.50 \times 456,5}{4} = 3.735.000 \text{ m}^3 \\ \text{Hamme (pont-route)} & \frac{327.50 \times 569,5}{5,87} = 3.124.000 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Hamme (pont-rails)	$\frac{327,50 \times 544,4}{3,83}$	= 2.944.000 m ³
Waesmunster	$\frac{327,50 \times 266,95}{3,69}$	= 2.366.000 m ³
Lokeren (vieux pont)	$\frac{327,50 \times 133}{3,52}$	= 1.312.000 m ³
Lokeren (pont des stations).	$\frac{327,50 \times 111,55}{3,25}$	= 1.122.000 m ³
Lokeren (pont du chem. de fer).	$\frac{327,50 \times 106,90}{3,22}$	= 1.087.000 m ³
Dacknam	$\frac{327,50 \times 68,10}{3,00}$	= 744.000 m ³
Confluent	$\frac{327,50 \times 65,85}{2,99}$	= 693.500 m ³

Pour calculer les débits d'amont aux différents points de la rivière, nous admettrons les mêmes débits que ceux qui sont résultés de l'étude de la Durme dans son état actuel, soit : 2 mètres cubes à l'embouchure et 1 mètre cube au confluent. Ces chiffres correspondent à une variation kilométrique de :

$$\frac{1}{18,680} = 0,0535$$

ce qui donne comme débit d'amont par seconde aux points importants de la rivière :

Embouchure	2.000 m ³
Hamme (pont-route).	2.000 m ³ — $2,69 \times 0,0535 = 1,855$ m ³
Hamme (pont-rails).	2.000 m ³ — $3,71 \times 0,0535 = 1,801$ m ³
Waesmunster	2.000 m ³ — $6,76 \times 0,0535 = 1,638$ m ³
Lokeren (vieux-pont)	2.000 m ³ — $13,38 \times 0,0535 = 1,284$ m ³
Lokeren (pont des stations)	2.000 m ³ — $14,73 \times 0,0535 = 1,212$ m ³
Lokeren (pont du chemin de fer).	2.000 m ³ — $15,15 \times 0,0535 = 1,188$ m ³
Dacknam	2.000 m ³ — $18,23 \times 0,0535 = 1,024$ m ³
Confluent	2.000 m ³ — $18,68 \times 0,0535 = 1,000$ m ³

Les données ci-dessus permettent de calculer aux différents points de la rivière les débits d'amont pendant le flot et le jasant, le débit de flot et le débit de jasant, de la marée fluviale. Ces éléments sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Stations.	Durée du		Débit supérieur horaire.	Débit d'amont pendant le		Volume de remplissage de la marée.	Débit de		Observations.
	flot. (2)	jasant. (3)		flot. (5)	jasant. (6)		flot. (8)	jasant. (9)	
Embouchure	18240	26460	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	Les chiffres de la 5 ^e et de la 6 ^e colonne sont obtenus en multipliant ceux de la 2 ^e et de la 3 ^e par ceux de la 4 ^e colonne. Les chiffres de la 8 ^e colonne sont obtenus en soustrayant ceux de la 5 ^e colonne de ceux de la 7 ^e . Les chiffres de la 9 ^e colonne sont obtenus en ajoutant ceux de la 6 ^e colonne à ceux de la 7 ^e .
Hamme (Pont-route)	18144	26556	2,000	36480	52920	3.735.000	3.698.520	3.787.920	
Hamme (Pont-rails)	18103	26597	1,855	33650	49300	3.124.000	3.090.350	3.173.300	
Waesmunster	17964	26736	1,801	32600	47800	2.944.000	2.911.400	2.991.800	
Vieux Pont.	17534	27166	1,638	29400	43750	2.366.000	2.336.600	2.409.700	
Pont des Stations	17442	27288	1,284	22500	34850	1.312.000	1.289.500	1.346.850	
Pont du Ch. de fer.	17369	27331	1,212	21150	33100	1.122.000	1.100.850	1.155.100	
Dacknam	17009	27691	1,188	20600	32450	1.087.000	1.066.450	1.119.450	
Confluent	16886	27814	1,024	17400	28400	744.000	726.600	772.400	
Confluent	16886	27814	1,000	16886	27814	693.500	676.614	721.314	

§ 5. — Calcul des vitesses moyennes des courants de flot et de jusant et de la vitesse moyenne générale du courant de marée.

Embouchure :

Données :

Amplitudes de la marée : $h = 4^m,00$;

Profondeur moyenne à marée basse : $H = 3^m,00$;

Largeur à mi-marée : $L = 63^m,50$.

Vitesse moyenne de flot :

$$v_f = \frac{5698520}{63,5 \left[3 + 2 \left(1 + \frac{4800}{18240} \right) \right] 18240} = 0^m,578.$$

Vitesse moyenne de jusant :

$$v_j = \frac{3.787.920}{63,5 \left[3 + 2 \left(1 - \frac{4800}{26460} \right) \right] 26460} = 0^m,488.$$

Vitesse moyenne générale du courant de marée :

$$u = \frac{0^m,578 \times 18240 + 0^m,488 \times 26460}{18240 + 26460} = \frac{10560 + 12940}{44700} = 0^m,525.$$

Hamme (pont-route) :

$$H = 4,70 - \frac{3,87}{2} = 2^m,77 \quad L = 60^m,20 \quad h = 3^m,87.$$

$$v_f = \frac{509.350}{60,2 \left[2,77 + 1,955 \left(1 + \frac{4800}{18144} \right) \right] 18144} = 0^m,541$$

$$v_j = \frac{5173500}{60,2 \left[2,77 + 1,955 \left(1 - \frac{4800}{26556} \right) \right] 26556} = 0^m,457$$

$$u = \frac{0,551 \times 18144 + 0,457 \times 26556}{44700} = \frac{9800 + 12140}{44700} = 0^m,490.$$

Hamme (pont-rails) :

$$H = 4,58 - \frac{3,85}{2} = 2^m,67 \quad L = 60^m,00 \quad h = 3^m,83$$

$$v_f = \frac{2.919.400}{60 \left[2,67 + 1,92 \left(1 + \frac{4800}{18103} \right) \right] 18103} = 0^m,524$$

$$v_j = \frac{2.991.800}{60 \left[2,67 + 1,92 \left(1 - \frac{4800}{26597} \right) \right] 26597} = 0^m,442$$

$$u = \frac{0,524 \times 18103 + 0,442 \times 26597}{44700} = \frac{9480 + 11770}{44700} = \frac{21250}{44700} = 0^m,475$$

Waesmunster :

$$H = 4^m,24 - \frac{5,69}{2} = 2^m,40 \quad L = 56^m,40 \quad h = 3^m,69$$

$$v_f = \frac{2356600}{56,40 \left[2,40 + 1,85 \left(1 + \frac{4800}{17964} \right) \right] 17964} = 0^m,485.$$

$$v_j = \frac{2409750}{56,40 \left[2,40 + 1,85 \left(1 - \frac{4800}{26756} \right) \right] 26756} = 0^m,408.$$

$$u = \frac{0,485 \times 17964 + 0,408 \times 26756}{44700} = \frac{8715 + 10920}{44700} = \frac{19635}{44700} = 0^m,439.$$

Lokeren (Vieux-Pont) :

$$H = 5^m,50 - \frac{5,52}{2} = 1^m,84 \quad L = 45^m,70 \quad h = 3^m,52.$$

$$v_f = \frac{1289500}{45,7 \left[1,84 + 1,66 \left(1 + \frac{4800}{17554} \right) \right] 17554} = 0^m,406.$$

$$v_j = \frac{1546850}{45,7 \left[1,84 + 1,66 \left(1 - \frac{4800}{27166} \right) \right] 27166} = 0^m,538.$$

$$u = \frac{0,406 \times 17554 + 0,538 \times 27166}{44700} = \frac{7110 + 14680}{44700} = \frac{21790}{44700} = 0^m,564.$$

Lokeren (Pont des Stations) :

$$H = 5^m,54 - \frac{5,25}{2} = 1^m,71 \quad L = 42^m,50 \quad h = 3^m,25.$$

$$v_f = \frac{1100850}{42,5 \left[1,71 + 1,65 \left(1 + \frac{4800}{17412} \right) \right] 17412} = 0^m,592$$

$$v_j = \frac{1155100}{42,50 \left[1,71 + 1,65 \left(1 - \frac{4800}{27288} \right) \right] 27288} = 0^m,526$$

$$u = \frac{0,592 \times 17412 + 0,526 \times 27288}{44700} = \frac{6850 + 8900}{44700} = \frac{15750}{44700} = 0^m,352.$$

Lokeren (Pont du Chemin de fer) :

$$H = 5^m,50 - \frac{5,22}{2} = 1^m,69 \quad L = 45^m,20 \quad h = 3^m,22$$

$$v_f = \frac{1066400}{42,20 \left[1,69 + 1,61 \left(1 + \frac{4800}{17369} \right) \right] 17369} = 0^m,589$$

$$v_j = \frac{1119450}{42,20 \left[1,69 + 1,61 \left(1 - \frac{4800}{27331} \right) \right] 27331} = 0^m,521$$

$$u = \frac{0,589 \times 17369 + 0,521 \times 27331}{44700} = \frac{6750 + 8770}{44700} = 0^m,547$$

Dacknam.

$$H = 2^m,95 - \frac{5,00}{2} = 1^m,45 \quad L = 56^m,50 \quad h = 3^m,00$$

$$v_f = \frac{726600}{56,50 \left[1,45 + 1,50 \left(1 + \frac{4800}{17009} \right) \right] 17009} = 0^m,548$$

$$v_j = \frac{772400}{56,50 \left[1,45 + 1,50 \left(1 - \frac{4800}{27691} \right) \right] 27691} = 0^m,286$$

$$u = \frac{0,548 \times 17009 + 0,286 \times 27691}{44700} = \frac{5950 + 7950}{44700} = \frac{13860}{44700} = 0^m,310$$

Confluent :

$$H = 2^m,90 - \frac{2,99}{2} = 1^m,41 \quad L = 54,20 \quad h = 2^m,99$$

$$v_f = \frac{676614}{54,20 \left[1,41 + 1,495 \left(1 + \frac{4800}{16886} \right) \right] 16886} = 0^m,552$$

$$v_j = \frac{721514}{54,20 \left[1,41 + 1,495 \left(1 - \frac{4800}{27814} \right) \right] 27814} = 0^m,286$$

$$u = \frac{0,552 \times 16886 + 0,286 \times 27814}{44700} = \frac{5950 + 7950}{44700} = \frac{13880}{44700} = 0^m,310$$

Les vitesses obtenues ci-dessus concordent parfaitement avec celles qui résultent du calcul des sections définitives de la rivière (voir § 1). Nous avons réuni dans le tableau ci-dessous les vitesses calculées d'après les deux différentes méthodes.

Stations.	Vitesse moyennes générales du courant de marée résultant du calcul		
	des sections définitives.	direct des vitesses.	
Embouchure	0,525	0,525	
Hamme {	Pont-route	0,494	0,490
	Pont-rails	0,493	0,475
Waesmunster	0,446	0,439	
Lokeren {	Vieux pont	0,369	0,364
	Pont des Stations	0,353	0,352
	Pont du Chemin de fer	0,349	0,347
Dacknam	0,310	0,310	
Confluent	0,307	0,310	

§ 6. — Relèvement du niveau moyen.

A. — Relèvement dû à la marée seule.

1° Embouchure. — Waesmunster.

Amplitude de la marée à l'embouchure : 4 mètres ; à Waesmunster : 3^m,69.

Loi de variation de l'amplitude :

$$h = 4 e^{-0,01194x}$$

Profondeur moyenne à mi-marée à l'embouchure : 5 mètres ;
à Waesmunster : 4^m.24.

Loi de variation de la profondeur moyenne :

$$\lambda = 5e^{-0,0244x}$$

Largeur à mi-marée à l'embouchure : 63^m50 ; à Waesmunster : 56^m.4.

Valeur moyenne du coefficient $\frac{l}{l+2\lambda}$:

$$\left[\frac{65,5}{65,5+2 \times 5,00} + \frac{56,4}{56,4+2 \times 4,24} \right] : 2 = (0,864+0,868) : 2 = 0,866.$$

Valeur moyenne du coefficient b :

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,864 \times 5,00} \right) = 0,361$$

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,868 \times 4,24} \right) = 0,375$$

$$\text{Valeur moyenne : } 0,736 : 2 = 0,368.$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\zeta_m = \frac{0,568 \times 0,095 \times \overline{4}^2 \times e^{-2 \times 0,01194x}}{0,866 \times \overline{5}^{2,5} \times e^{-5/2 \times 0,0244x}} dx.$$

Relèvement total du niveau moyen en un point abscisse x :

$$\zeta_m = \frac{0,568 \times 0,095}{0,866 \times 0,03725} \times \frac{16}{55,9} \left(e^{0,03725x} - 1 \right) = 0,505 \left(e^{0,03725x} - 1 \right)$$

Hamme (pont-route) :

$$\zeta_m = 0,505 \left(e^{0,03725 \times 2,69} - 1 \right) = 0,052 \text{ m.}$$

Hamme (pont-rails) :

$$\zeta_m = 0,505 \left(e^{0,03725 \times 3,71} - 1 \right) = 0,045 \text{ m.}$$

Waesmunster.

$$\zeta_m = 0,505 \left(e^{0,03725 \times 6,76} - 1 \right) = 0,087 \text{ m.}$$

2° *Waesmunster-Lokeren (Vieux pont).*

Amplitude de la marée à Waesmunster : 3^m.69 ; à Lokeren (Vieux pont) : 3^m.32.

Loi de variation de l'amplitude :

$$h = 3,69e^{-0,01598x}$$

Profondeur moyenne à mi-marée à Waesmunster : 4^m.24 ; à Lokeren (Vieux-pont) : 3^m.50.

Loi de variation de la profondeur moyenne à mi-marée :

$$\lambda = 4,24 e^{-0,029x}$$

Largeur de la rivière à Waesmunster : 56^m.4 ; à Lokeren (Vieux-pont) : 45^m.70.

Valeur moyenne du coefficient $\frac{l}{l+2\lambda}$:

$$\left[\frac{56,4}{56,4+2 \times 4,24} + \frac{45,7}{45,7+2 \times 3,5} \right] : 2 = (0,868+0,867) : 2 = 0,8675.$$

Valeur moyenne du coefficient b :

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,868 \times 4,24} \right) = 0,375$$

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,867 \times 3,50} \right) = 0,396$$

$$\text{Valeur moyenne : } 0,771 : 2 = 0,3855.$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\zeta_m = \frac{0,3855 \times 0,095 \times \overline{3,69}^2 \times e^{-2 \times 0,01598x}}{0,8675 \times 4,24^{5/2} \times e^{-5/2 \times 0,029x}} dx.$$

Relèvement total à Lokeren (Vieux-pont) :

$$\zeta_m = \frac{0,3855 \times 0,095}{0,8675 \times 0,0405} \times \frac{13,62}{37,10} \left(e^{-0,0405 \times 6,62} - 1 \right)$$

$$\zeta_m = 0^m 119.$$

3° *Lokeren (Vieux-pont)-Confluent.*

Amplitude de la marée à Lokeren (Vieux-pont) : 3^m.32 ; au confluent : 2^m.99.

Loi de variation de l'amplitude :

$$h = 3,32 e^{-0,0197x}$$

Profondeur moyenne à mi-marée à Lokeren (Vieux-pont) : 3^m.50 ; au confluent : 2^m.90.

Loi de variation de la profondeur moyenne à mi-marée :

$$\lambda = 3,50 e^{-0,0355x}$$

Largeur de la rivière à Lokeren (Vieux-Pont) : 45^m,70 ; au confluent : 34^m,20.

Valeur moyenne du coefficient $\frac{l}{l+2\lambda}$:

$$\left[\frac{45,70}{45,70 + 2 \times 3,5} + \frac{34,2}{34,2 + 2 \times 2,9} \right] : 2 = (0,867 + 0,854) : 2 = 0,8605$$

Valeur moyenne du coefficient b :

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,867 \times 3,50} \right) = 0,396$$

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,854 \times 2,90} \right) = 0,421$$

$$\text{Valeur moyenne : } 0,817 : 2 = 0,4085$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\tilde{\zeta}_m = \frac{0,4085 \times 0,095 \times 3,32^2 \times e^{-2 \times 0,0197x}}{0,8605 \times 3,5^{2,5} \times e^{-2,5 \times 0,0355x}} dx$$

Relèvement total à une distance x de Lokeren (Vieux-Pont) :

$$\tilde{\zeta}_m = \frac{0,4085 \times 0,095}{0,8605 \times 0,04935} \times \frac{11,02}{22,92} \left(e^{0,04935x} - 1 \right)$$

$$\tilde{\zeta}_m = 0,452 \left(e^{0,04935x} - 1 \right)$$

Lokeren (Pont des stations) :

$$\tilde{\zeta}_m = 0,452 \left(e^{0,04935 \times 1,35} - 1 \right) = 0^m,05$$

Lokeren (Pont du Chemin de fer) :

$$\tilde{\zeta}_m = 0,452 \left(e^{0,04935 \times 1,77} - 1 \right) = 0^m,04$$

Dacknam :

$$\tilde{\zeta}_m = 0,452 \left(e^{0,04935 \times 4,85} - 1 \right) = 0^m,121$$

Confluent :

$$\tilde{\zeta}_m = 0,452 \left(e^{0,04935 \times 5,3} - 1 \right) = 0^m,133$$

Tableau récapitulatif des relèvements partiels et totaux dus à la marée seule.

Stations	Relèvements	
	partiels	totaux
Embouchure		
Hamme	Pont-Route	0.032
	Pont du Chemin de fer	0.013
		0.045
Waesmunster		0.042
		0.087
Lokeren	Vieux Pont	0.119
	Pont des Stations	0.03
	Pont du Chemin de fer	0.01
		0.236
		1.246
Dacknam		0.081
		0.327
Confluent		0.012
		0.339

B. Relèvement dû au débit d'amont seul.

Nous avons vu ci dessus que les débits d'amont à Waesmunster et à Lokeren (Vieux Pont) mesurent :

Waesmunster : 1^m³,638 ;

Lokeren (Vieux Pont) : 1^m³,284.

Ces débits sont très peu importants en regard des dimensions données à la rivière améliorée. Il en résulte que le relèvement du niveau moyen de la rivière, sous l'influence de l'écoulement du débit moyen supérieur, est insignifiant et négligeable dans l'étude que nous nous proposons. Il suffit dès lors de chercher le relèvement du niveau moyen de la rivière sous l'action combinée de la marée et du débit d'amont. Ce calcul est fait au paragraphe suivant. Nous ne l'avons reproduit qu'à partir de Lokeren (Vieux Pont) car ce n'est qu'à partir de ce dernier point que le relèvement atteint une valeur appréciable.

C. Relèvement dû à la marée et au débit d'amont.

Lokeren (Vieux Pont)-Confluent.

Loi de variation du débit d'amont :

$$q = 1,284e^{-0,0472x}$$

Largeur à mi-marée à Lokeren (Vieux Pont) : 45^m,70 ; au Confluent : 34^m,20.

Loi de variation de la largeur :

$$l = 45,70e^{-0,0546x}$$

Pour les autres données voir le relèvement dû à la marée.

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\tau_{ma} = \frac{0,4085 \times 2 \times \sqrt{0,095} \times 5,52 \times e^{-0,0197x} \times 1,284 \times e^{-0,0472x}}{0,8605 \times 45,70 \times e^{-0,0546x} \times 3,5^{11/4} \times e^{-11/4 \times 0,0355x}} dx$$

Relèvement total à une distance de Lokeren (Vieux Pont) :

$$\tau_{ma} = \frac{0,4085 \times 2 \times \sqrt{0,095}}{0,8605 \times 0,0851} \times \frac{5,52 \times 1,284}{45,7 \times 3,5^{11/4}} (e^{0,0851x} - 1)$$

$$\tau_{ma} = 0,0102 (e^{0,0851x} - 1)$$

Lokeren (Pont des Stations) :

$$\tau_{ma} = 0,0102 (e^{0,0851 \times 1,35} - 1) = 0,00125$$

Lokeren (Pont du Chemin de Fer) :

$$\tau_{ma} = 0,0102 (e^{0,0851 \times 1,77} - 1) = 0,0017$$

Dacknam :

$$\tau_{ma} = 0,0102 (e^{0,0851 \times 4,85} - 1) = 0,0052$$

Confluent :

$$\tau_{ma} = 0,0102 (e^{0,0851 \times 5,3} - 1) = 0,0058$$

Tableau récapitulatif des relèvements du niveau moyen de la rivière et cotes de hauteur du niveau moyen.

Stations.	Relèvements dus à		Relèvement total dû à tous les phénomènes.	Cotes de mi-marée.	
	la marée.	marée et débit d'amont.			
Embouchure	»	»	»	2.69	
Hamme.	Pont-Route.	0.032	»	0.032	2.722
	Pont-Rails	0.045	»	0.045	2.735
Waesmunster	0.087	»	0.087	2.777	
Lokeren	Vieux Pont.	0.206	»	0.206	2.896
	Pont des Stations	0.236	0.001	0.237	2.927
	Pont du Chemin de fer	0.246	0.002	0.248	2.938
Dacknam	0.327	0.005	0.332	3.022	
Confluent	0.339	0.006	0.345	3.035	

§ 7. — Détermination de la forme des sections transversales de la rivière.

Pour déterminer la forme des sections transversales, nous donnerons aux talus une inclinaison à 12/4 à l'embouchure de la Durme et à 8/4 au confluent du Moervaert et de la Zuidlede. Soit τ cette inclinaison nous pouvons alors écrire :

$$\text{Embouchure : } \tau = \frac{12}{4} = 3$$

$$\text{Confluent : } \tau = \frac{8}{4} = 2$$

Variation kilométrique de la valeur τ :

$$\frac{3 - 2}{18,680} = 0,05355$$

Inclinaison du talus à une distance x de l'embouchure est donnée par la relation :

$$\tau = 3 - 0,05355x$$

Soient : H la profondeur du plafond sous le niveau de mi-marée;

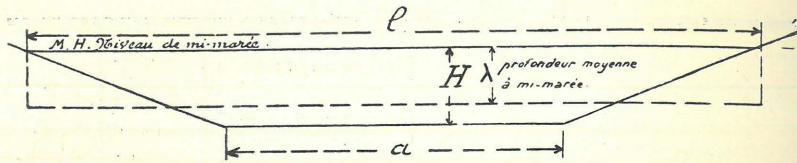


Fig. 31.

a : la largeur au plafond ;
 l : la largeur à mi marée.
 λ : la profondeur moyenne à mi-marée;
 Nous pouvons écrire les deux équations :

$$(l + a) \frac{H}{2} = l\lambda \quad a = l - 2\tau H$$

Ces deux équations permettent de calculer les valeurs de H et de a aux différents points de la rivière. Nous avons réuni, dans le tableau ci-dessous, les valeurs trouvées pour les stations considérées de la rivière.

Stations.	Distance de l'embouchure x	Profondeur moyenne à mi-marée λ	Largeur à mi-marée l	Inclinaison des talus τ	Largeur au plafond a	Profondeur au plafond H
	km.	m.	m.		m.	m.
Embouchure	»	5.00	63.50	3	15.00	8.08
Hamme (Pont-route)	2.690	4.70	60.20	2.8559	19.80	7.08
Id. (Pont-rails)	3.710	4.58	60.00	2.801	22.79	6.64
Waesmunster	6.760	4.24	56.40	2.637	25.82	5.80
Lokeren (Vieux-Pont)	13.380	3.50	45.70	2.292	24.98	4.54
Id. (Pont des Stations)	14.730	3.34	42.50	2.212	24.00	4.26
Id. (Pont Chemin de fer).	15.150	3.30	42.20	2.189	23.73	4.22
Dacknam	18.230	2.95	36.30	2.022	21.30	3.72
Confluent	18.680	2.90	34.20	2	19.44	3.69

Les sections sont figurées à la planche VII en même temps que le profil en long du plafond, l'axe hydraulique moyen et les lieux géométriques de marée haute et de marée basse.

§ 8. — Conclusions.

Quand on compare les résultats de l'étude d'amélioration de la Durme, tels qu'ils résultent des calculs ci-dessus, aux éléments correspondants de la rivière dans son état actuel, on voit rapidement que le régime maritime de la voie d'eau est profondément modifié. Actuellement, la rivière n'est facilement navigable que jusqu'à Waesmunster, au delà, elle ne peut être fréquentée par les bateaux que vers l'heure de marée haute; et, en amont de Lokeren, elle n'assure le passage qu'à des bateaux de petit tonnage et de faible tirant d'eau. Le projet d'amélioration, par contre, assure une navigation aisée à de grands bateaux rhénans, depuis l'embouchure dans l'Escaut jusqu'au confluent du Moervaert et la Zuidlede. La rivière est aussi considérablement raccourcie, ce qui est de nature à influencer favorablement le coût du fret. Quand on examine les éléments caractéristiques de la marée fluviale, on voit que ceux-ci sont profondément modifiés pour la partie amont de la rivière. Ainsi, à Dacknam, on constate les différences suivantes :

Amplitude de la marée :	
Existante	0 ^m .85
Nouvelle	3 ^m .00
Section à marée haute :	
Existante	31,4 m ²
Nouvelle	166 m ² .
Volume de remplissage :	
Actuel	95,974 m ³
Nouveau	693,500 m ³
Vitesse moyenne générale du courant de marée :	
Actuelle	0 ^m .18
Nouvelle	0 ^m .31
Cote de marée haute :	
Actuelle	3 ^m 76
Nouvelle	4,522

Cote de marée basse :	
Actuelle	2 ^m .91
Nouvelle	1,522

Le relèvement assez notable de la cote de marée haute moyenne nécessite un relèvement de même importance des digues de la rivière. D'autre part, l'abaissement important du niveau de marée basse permet d'assécher les terrains environnants dans de bien meilleures conditions que maintenant, ce qui est une circonstance extrêmement favorable pour un pays fréquemment inondé par les pluies d'hiver.

Le projet d'amélioration de la Durme montre que l'énergie de l'onde marée, encore disponible au confluent du Moervaert et la Zuidlede, est mesurée par une section à marée haute d'égale vitesse de 63.45 m². Cette énergie est très considérable et ne peut être absorbée sur place à l'extrémité de la Durme. Il faut donc permettre à l'onde marée de s'éteindre dans une rivière maritime située en amont du confluent. A mon avis, cette rivière doit être le Moervaert, qui possède déjà une navigation d'une certaine importance. On pourrait, par exemple, aménager ce canal de manière à pouvoir recevoir des bateaux de 300 tonnes au moins. En barrant la Zuidlede et le canal de Stekene, on pourrait même donner au Moervaert les dimensions nécessaires pour recevoir des bateaux d'environ 600 tonnes.

En résumé, le projet d'amélioration de la Durme montre qu'il est possible de transformer la rivière en un cours d'eau maritime puissant, qui réponde à tous les besoins de la navigation moderne pour bateaux d'intérieur.

Anvers, juillet 1920.

TABLE DES MATIÈRES.

FASCICULES DE 1922.

AVANT-PROPOS.	379
-----------------------	-----

PREMIÈRE PARTIE : Mouvements ondulatoires.

CHAPITRE I. — <i>Classification des mouvements ondulatoires</i>	385
CHAPITRE II. — <i>Propriétés des mouvements ondulatoires</i>	385
1. — <i>Onde houleuse</i>	385
2. — <i>Onde clapoteuse</i>	399
3. — <i>Ondes de translation</i>	401

DEUXIÈME PARTIE. — Onde marée fluviale.

CHAPITRE I. — <i>Définitions et mode de représentation des marées fluviales</i>	602
CHAPITRE II. — <i>Nature de l'onde marée fluviale</i>	605
CHAPITRE III. — <i>Mascaret</i>	611
CHAPITRE IV. — <i>Théorie de la marée fluviale</i>	615
1. — <i>Loi de l'énergie ou loi des sections à marée haute</i>	615
2. — <i>Loi de l'amplitude</i>	622
3. — <i>Loi du débit</i>	625
4. — <i>Niveau moyen du fleuve</i>	628
5. — <i>Vitesse de propagation de l'onde marée fluviale</i>	635
6. — <i>Courbes locales de marée</i>	642
7. — <i>Durée du gagnant et du perdant, durée du flot et du jusant</i>	645
8. — <i>Vitesses des courants de flot et de jusant</i>	645
9. — <i>Vitesses moyennes des courants de flot et de jusant.</i> <i>Vitesse moyenne générale du courant de marée</i>	646

TROISIÈME PARTIE. — Application de la théorie des marées fluviales aux rivières du bassin de l'Escaut maritime.

CHAPITRE I. — <i>Description sommaire des rivières du bassin de l'Escaut maritime</i>	765
---	-----

CHAPITRE II. — Documents qui ont servi à faire l'étude théorique de l'Escaut maritime et de ses affluents soumis à la marée 768

CHAPITRE III. — Étude de l'Escaut maritime.

1. — Calcul des sections à marée haute 770
 2. — Amplitudes de l'onde marée fluviale 789
 3. — Loi du débit 958
 4. — Niveau moyen du fleuve 972
 5. — Vitesses de propagation de l'onde marée fluviale 996
 6. — Vitesses des courants de flot et de jusant 1001
 7. — Durées du gagnant et du perdant, durées du flot et du jusant 1001
 8. — Vitesses moyennes des courants de flot et de jusant. 1003

FASCICULES DE 1925.

CHAPITRE IV. — Considérations sur les profondeurs moyennes à mi-marée et les débits d'amont moyens des rivières du bassin maritime du Rupel.

1. — Profondeurs moyennes à mi-marée. 74
 2. — Débits d'amont moyens 77

CHAPITRE V. — Étude du Rupel.

1. — Calcul des sections à marée haute d'égale vitesse 80
 2. — Calcul des amplitudes de la marée 83
 3. — Détermination de la courbe des sections réelles à marée haute 84
 4. — Vérification de la loi du débit 85
 5. — Niveau moyen de la rivière 89
 6. — Vitesses de propagation de l'onde marée fluviale 93
 7. — Vitesses moyennes des courants de flot et de jusant. 94

CHAPITRE VI. — Nèthe Inférieure .

1. — Calcul des sections à marée haute d'égale vitesse 95
 2. — Calcul des amplitudes de la marée fluviale 98
 3. — Détermination de la courbe des sections réelles à marée haute 99
 4. — Vérification de la loi du débit. 100
 5. — Niveau moyen de la rivière 105
 6. — Vitesses de propagation de l'onde marée fluviale 107
 7. — Vitesses moyennes des courants de flot et de jusant. 109

CHAPITRE VII. — Grande Nèthe 412

CHAPITRE VIII. — Petite Nèthe 418

CHAPITRE IX. — Dyle.

Première partie. — RUMPST-SENNEGAT 220

Deuxième partie. — SENNEGAT-RYMENAM 227

1. — Calcul des sections à marée haute d'égale vitesse 227
 2. — Calcul des amplitudes de la marée et des sections réelles à marée haute 228
 3. — Vérification de la loi du débit et des vitesses moyennes des courants de flot et de jusant 251
 4. — Relèvement du niveau moyen de la rivière 251
 5. — Vitesses de propagation de la marée fluviale. 255

CHAPITRE X. — Senne.

1. — Sections à marée haute et largeurs à mi-marée 237
 2. — Débits et vitesses des courants de marée 239
 3. — Relèvements du niveau moyen de la rivière 239
 4. — Vitesses de propagation de la marée fluviale. 245

CHAPITRE XI. — Considérations particulières sur les rivières du bassin maritime du Rupel. 245

Situation du régime des rivières 246

CHAPITRE XII. — Durme.

1. — Calcul des sections à marée haute d'égale vitesse 402
 2. — Amplitudes de l'onde marée fluviale 408
 3. — Calcul des sections réelles à marée haute. 410
 4. — Calcul des débits de la marée. 414
 5. — Niveau moyen de la rivière 417
 6. — Vitesses de propagation de la marée fluviale 450
 7. — Durées du gagnant et du perdant, durées du flot et du jusant 452
 8. — Vitesses moyennes des courants de flot et de jusant. 452

CHAPITRE XIII. — Débits supérieurs des rivières du bassin maritime de l'Escaut 434

QUATRIEME PARTIE. — Applications diverses de la théorie générale 728

CHAPITRE I. — *Marche à suivre dans les études d'amélioration des fleuves et des affluents à marée.*

1. — Fleuves à marée. 728

2. — Affluents à marée 750

3. — Transformation d'un affluent à régime fluvial en affluent à régime maritime 751

CHAPITRE II. — *La grande coupure de l'Escaut en aval d'Anvers 752*

CHAPITRE III. — *Projet d'amélioration de la Durme 745*

1. — Calcul des sections à marée haute d'égale vitesse . 745

2. — Calcul des amplitudes de la marée et des largeurs à mi-marée 748

3. — Vitesse de propagation de la marée. 755

4. — Calcul des volumes de remplissage et des débits d'amont, de flot et de jusant 755

5. — Calcul des vitesses moyennes des courants de flot et de jusant et de la vitesse moyenne générale du courant de marée 756

6. — Relèvement du niveau moyen 761

7. — Détermination de la forme des sections transversales de la rivière 767

8. — Conclusions 769

LES
PIERRES DE TAILLE ET MARBRES
EXPLOITÉS DANS LA VALLÉE
DE LA MEUSE NAMUROISE

PAR

E. MAROTE

Directeur général honoraire des Ponts et Chaussées.

PL. X.

(Suite)

Voir fascicules 3 et 4 de 1923
des *Annales des Travaux Publics de Belgique*