

B. — Calcul des épaisseurs par la formule exacte.

N° 71 380

C. — Calcul complet à l'aide de la méthode d'intégration approchée.

N° 72. Premier calcul, avec intervalles de 10 mètres ($0.1 \frac{l}{\Delta}$) 380

N° 73. Second calcul, avec intervalles de 5 mètres ($0.05 \frac{l}{\Delta}$) 381

N° 74. Vérification des résultats obtenus par application de la méthode d'intégration approchée 382

D. — Emploi du procédé mixte.

N° 75 386

E. — Vérifications des conditions de stabilité.

N° 76 386

N° 77. Résistance au glissement. 387

N° 78. Résistance au renversement 388

N° 79. Résistance à l'action du vent 389

N° 80. Fatigue maxima de compression à vide 390

N° 81. Changement d'échelle 391

F. — Problème.

N° 82. Transformer un barrage de la catégorie A en un barrage de la catégorie B 393

G. — Variations de la section transversale selon la valeur donnée à l'épaisseur initiale.

N° 83 395

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. VI

(Suite).

Voir *Annales des Travaux Publics de Belgique*
3^e, 4^e, 5^e et 6^e fascicules de 1922 et fascicules 1 et 2 de 1923.

CHAPITRE XI.

DURME.

(Pl. VI).

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

Nous avons figuré planche VI le diagramme des profondeurs moyennes à mi-marée et nous avons substitué à ce diagramme, d'allure fort irrégulière, un profil en long régulier composé d'éléments droits, tracés de telle manière que la profondeur moyenne générale de la rivière soit conservée. Le tableau ci-dessous donne les profondeurs moyennes vraies et admises.

Sections de la rivière.	Profondeurs locales.	Profondeurs moyennes	
		vraies.	admises.
	m.	m.	m.
Embouchure de la Durme	5.00	3.85	3.86
1km.5 en amont de l'embouchure . . .	2.72	3.555	3.555
3km.5 en amont de l'embouchure . . .	4.38	3.855	3.855
Waesmunster	3.33	2.62	2.62
4km.725 en amont de Waesmunster . .	1.91	1.825	1.825
Confluent du Moervaert et de la Zuidleede	1.73		

La section d'équilibre à l'embouchure de la rivière peut être déterminée comme pour les autres affluents et sous-affluents à marée de l'Escaut en réalisant, soit la même amplitude de marée dans la rivière que dans l'Escaut; soit la même constante de la loi du débit dans la Durme que dans le susdit fleuve.

Nous avons besoin dans ce calcul du volume de remplissage de l'Escaut au droit de la Durme et de celui de la Durme même. Ces éléments ont été déterminés en faisant l'étude de l'Escaut maritime. Nous avons trouvé alors, en nous basant sur le travail de M. l'Ingénieur en chef Directeur Van Brabant :

Volume de remplissage de l'Escaut en aval de la Durme	16.632.000 ^{m³}
Volume de remplissage de l'Escaut en amont de la Durme	12.855.440 ^{m³}
Volume de remplissage de la Durme	3.776.560 ^{m³}

1° Calcul de la section d'équilibre à l'embouchure par la loi de l'amplitude.

Déterminons d'abord la section d'égale vitesse dans la Durme qui soit à l'énergie de l'onde marée, comme la section d'égale vitesse dans l'Escaut immédiatement en aval de la Durme est à l'énergie de l'onde marée en ce même point. Cette section est donnée par la proportion :

$$l_2 = 1556 \frac{3.776.560}{16.632.000} = 355 \text{ m}^2.$$

1.556 mètres carrés est la section d'équilibre d'égale vitesse dans l'Escaut.

La largeur théorique de la Durme qui correspond à la même amplitude théorique de l'Escaut, soit 3^m.95, est donnée par la relation :

$$3,95 = \varphi \times 4,58 \times \frac{5,4}{5} \sqrt{\frac{411}{l_2} \times \frac{553}{5155}}$$

φ est le coefficient de réduction de l'amplitude de la marée au droit de la Durme, que nous avons trouvé égal à 0.953 en faisant l'étude de l'Escaut maritime.

4^m.58 est l'amplitude théorique de la marée à l'embouchure du Rupel résultant de l'Étude de l'Escaut maritime.

Dès lors $l_2 = 65^m.40$.

La section d'égale vitesse d'équilibre est donc égale à :

$$65,40 \left(5 + \frac{3,95}{2} \right) = 457 \text{ m}^2.$$

2° Calcul de la section d'équilibre à l'embouchure par la loi du débit.

Nous avons établi dans l'étude de l'Escaut qu'à l'embou-

chure de la Durme la valeur de la constante de la loi du débit, dans l'Escaut, immédiatement en amont de la Durme, est égale à 32750. Comme cette même constante doit se réaliser dans la Durme, la section d'équilibre d'égale vitesse à l'embouchure de la Durme est égale à :

$$\frac{5\,776.560 \times 3,96 \text{ (amplitude observée)}}{32750} = 456 \text{ m}^2$$

soit sensiblement la même valeur que celle obtenue par la loi de l'amplitude.

Nous pouvons donc admettre que la section d'équilibre à l'embouchure de la Durme est sensiblement égale à :

$$\ell = \frac{457 + 456}{2} = 456,5 \text{ m}^2.$$

En partant de cette valeur, nous pouvons déterminer les autres sections d'égale vitesse.

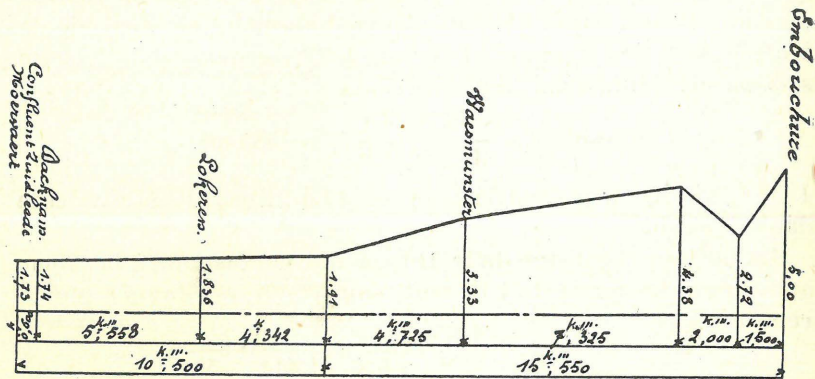


Fig. 27.

Embouchure de la Durme : Section d'équilibre $\ell = 456,5 \text{ m}^2$
 $\log 456,5 = 2,65944$. Profondeur $\lambda : 5$ mètres.

Section d'égale vitesse à 1km.5 en amont de l'embouchure.

$$a = \frac{5,00 - 2,72}{1,5} = 1,52$$

$$\log \ell = 2,65944 - \frac{0,688}{1,52} \left(\frac{1}{\sqrt{2,72}} - \frac{1}{\sqrt{5}} \right) = 2,58754$$

$$\ell = 586^{\text{m}^2},90.$$

Section d'égale vitesse à 3k.5 en amont de l'embouchure.

$$a = \frac{4,58 - 2,72}{2} = 0,85$$

$$\log \ell = 2,58754 - \frac{0,688}{0,85} \left(\frac{1}{\sqrt{2,72}} - \frac{1}{\sqrt{4,58}} \right) = 2,48054$$

$$\ell = 302,40^{\text{m}^2}.$$

Section d'égale vitesse à Waesmunster.

$$a = \frac{4,58 - 3,33}{7,525} = 0,1455.$$

$$\log \ell = 2,48054 - \frac{0,688}{0,1455} \left(\frac{1}{\sqrt{3,33}} - \frac{1}{\sqrt{4,58}} \right) = 2,14404$$

$$\ell = 139,55 \text{ m}^2.$$

Section d'égale vitesse à 4km.725 en amont de Waesmunster.

$$a = \frac{3,33 - 1,91}{4,75} = 0,5$$

$$\log \ell = 2,14404 - \frac{0,688}{0,5} \left(\frac{1}{\sqrt{1,91}} - \frac{1}{\sqrt{3,33}} \right) = 1,74054$$

$$\ell = 55,02^{\text{m}^2}.$$

Partie de la rivière en amont du point situé à 4k.725 en amont de Waesmunster.

$$a = \frac{1,91 - 1,73}{10,5} = 0,01715.$$

Profondeur à Lokeren :

$$1,91 - 0,01715 \times 4,542 = 1^{\text{m}},856.$$

Profondeur à Dacknam :

$$1,91 - 0,01715 \times 9,9 = 1,74 \text{ m}.$$

Section à Lokeren.

$$\log \ell = 1,74054 - \frac{0,688}{0,01715} \left(\frac{1}{\sqrt{1,836}} - \frac{1}{\sqrt{1,91}} \right) = 1,20304$$

$$\ell = 15,96^{\text{m}^2}.$$

Section à Dacknam.

$$\log \ell = 1,74054 - \frac{0,688}{0,01715} \left(\frac{1}{\sqrt{1,74}} - \frac{1}{\sqrt{1,91}} \right) = 0,57254$$

$$\ell = 2,558^{\text{m}^2}.$$

Section au confluent de la Zuidlede et du Moervaert.

$$\log \epsilon = 1,74054 - \frac{0,688}{0,01715} \left(\frac{1}{\sqrt{1,73}} - \frac{1}{\sqrt{1,91}} \right) = 0,28454$$

$$\epsilon = 1,925^{m^2}$$

Les sections obtenues sont toutes beaucoup plus petites que celles qui existent dans la rivière. (Voir diagramme des sections, planche VI). Ainsi à Waesmunster, on trouve 211 mètres carrés, au lieu de 139^{m²}.33 et à Dacknam 31 m²; au lieu de 2^{m²}.358. Cela provient de ce que la vitesse moyenne du courant de marée n'est pas une constante depuis l'embouchure jusqu'au confluent de la Zuidleede et du Moervaert, comme nous l'avons supposé dans les calculs ci-dessus, mais qu'elle diminue à mesure qu'on s'éloigne de l'embouchure malgré l'appoint du débit d'amont. Cela résulte clairement du travail de M. l'Ingénieur en chef Directeur Van Brabant sur la cubature de la marée moyenne dans la Durme. Nous donnons ci-dessous les vitesses moyennes générales du courant de marée, telles qu'elles résultent de cette étude.

Postes d'observations.	Vitesses moyennes générales du cou- rant pendant une marée.
Embouchure.	0.441
Waesmunster.	0.391
Dacknam.	0.180

Il n'est donc pas étonnant que l'application des formules 29, 30 et 31 ne donne pas des résultats concordants avec ceux de la réalité, car ce sont les formules 32, 33 et 34 qui sont d'application. Or, celles-ci comportent un terme supplémentaire qui est à ajouter au logarithme des sections obtenues ci-dessus. Pour qu'on puisse utiliser directement ces formules, il faudrait qu'on disposât des vitesses moyennes de la marée dans l'hypothèse où il n'y a pas de débit d'amont. Or, ces éléments ne nous sont pas connus et ne peuvent être établis

avec exactitude. Dans ces conditions, il est nécessaire d'opérer comme nous l'avons fait pour les autres rivières maritimes, c'est-à-dire de déterminer d'abord les amplitudes de la marée en se servant des sections calculées ci-dessus, puis de déduire du résultat de ces calculs les sections réelles existantes. C'est ce que nous ferons plus loin.

Les calculs ci-dessus montrent que l'énergie de l'onde marée est presque complètement épuisée quand l'onde arrive au confluent de la Zuidlede et du Moervaert. En effet, l'énergie n'est plus représentée en ce point que par une section de 1.925 mètres carrés, ce qui est insignifiant et permet un amortissement complet de l'énergie dans le Moervaert et la Zuidlede.

Quand on examine le diagramme des profondeurs moyennes à mi-marée et celui des largeurs, on remarque qu'à 1^{km}.5 en amont de l'embouchure de la Durme il y a un seuil où la profondeur ne mesure plus que 2^m.41 et où la rivière s'élargit considérablement jusqu'à atteindre 94^m.50 de largeur. Ce relèvement du fond de la rivière a une influence néfaste sur la conservation de l'énergie de l'onde marée fluviale; aussi sa suppression peut-elle permettre de récupérer une bonne partie de l'énergie dépensée inutilement sur un haut-fond et d'entretenir dans la rivière des sections beaucoup plus grandes que celles qui existent actuellement.

Voyons par un calcul, quelle serait la section d'égale vitesse qu'on pourrait réaliser à Waesmunster si la loi des profondeurs moyennes était une ligne droite tracée avec une profondeur de 5 mètres à l'embouchure et 3^m.33 à Waesmunster, c'est-à-dire avec les deux profondeurs moyennes qui existent actuellement aux deux points extrêmes :

$$a = \frac{5 - 3,33}{10,825} = 0,1542$$

$$\log \epsilon = 2,65944 - \frac{0,688}{0,1542} \left(\frac{1}{\sqrt{5,33}} - \frac{1}{\sqrt{5}} \right) = 2,21294.$$

$\epsilon = 163^{m^2}$,3 au lieu de 139^{m²},33, soit une majoration de section de 17 p. c.

Quand on remarque encore, que la Durme comporte de nombreux méandres qui rendent la navigation sur la rivière longue et difficile, on voit qu'il est possible d'améliorer consi-

dérablement cet affluent maritime en exécutant les travaux de régularisation indispensables, conçus judicieusement suivant les lois de l'hydraulique des rivières à marée.

§ 2. — Amplitudes de l'onde marée fluviale.

La Durme est une rivière dont les eaux limoneuses servent à irriguer chaque hiver les terres riveraines. Ces irrigations ont pour effet de provoquer un élargissement artificiel de la rivière et un affaissement de l'onde marée fluviale. Ainsi, on relève à Waesmunster et à Dacknam, durant la période d'été, des amplitudes qui mesurent respectivement 3^m,60 et 0^m,82, alors qu'en hiver, elles n'atteignent que 3^m,12 et 0^m,39. Nous ne pouvons donc pas adopter l'amplitude moyenne de toutes les marées, pour procéder à la vérification de la loi de l'amplitude, mais, il faut prendre l'amplitude moyenne de l'été, qui, elle seule, n'est pas entachée d'erreurs par suite de l'exécution des irrigations. Nous admettrons donc aux postes d'observations les amplitudes d'été suivantes :

Waesmunster :	3 ^m ,60,
Lokeren :	2 ^m ,21,
Dacknam :	0 ^m ,85.

Calculons maintenant pour les trois postes ci-dessus les largeurs théoriques de la rivière qui correspondent aux amplitudes observées.

A l'embouchure de la Durme, nous admettons les données suivantes qui résultent : soit de l'étude de l'Escaut maritime, soit du calcul de la section d'équilibre d'égale vitesse à l'embouchure de la Durme.

Amplitude théorique de la marée	3 ^m ,95
Profondeur moyenne à mi-marée	5 ^m ,00
Section d'égale vitesse d'équilibre	456 ^m ² ,50
Largeur théorique de la rivière.	65 ^m ,40

Waesmunster : Données :

Amplitude de la marée	3 ^m ,60
Profondeur moyenne à mi marée	3 ^m ,33
Section d'équilibre d'égale vitesse	139 ^m ² ,33

Valeur du coefficient φ :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0,125}{4,52} \left(\frac{1}{2,72} - \frac{1}{5} \right) + \frac{0,125}{0,83} \left(\frac{1}{2,72} - \frac{1}{4,38} \right) + \frac{0,125}{0,1433} \left(\frac{1}{3,33} - \frac{1}{4,38} \right)}$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,0975} = 0,91.$$

Largeur théorique de la rivière l_1 :

$$5,60 = 0,91 \times 3,95 \times \frac{5,00}{3,33} \sqrt{\frac{65,4}{l_1} \times \frac{159,55}{456,50}}$$

$$l_1 = 45 \text{ m.}$$

Lokeren. — Données :

Amplitude de la marée	2 ^m .21
Profondeur moyenne à mi-marée	1 ^m .836
Section d'équilibre d'égale vitesse.	15 ^m .296

Valeur du coefficient φ :

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,0975 + \frac{0,125}{0,5} \left(\frac{1}{4,91} - \frac{1}{3,33} \right) + \frac{0,125}{0,01715} \left(\frac{1}{1,836} - \frac{1}{4,91} \right)}$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,0975 + 0,0928 + 0,1532} = \frac{1}{1 + 0,1905 + 0,1532} = 0,745.$$

Largeur théorique de la rivière l_1 :

$$2,21 = 0,745 \times 3,95 \times \frac{5,00}{1,836} \sqrt{\frac{65,4}{l_1} \times \frac{15,96}{456,50}}$$

$$l_1 = 50 \text{ m.}$$

Confluent du Moervaert et de la Zuidlede, près de Dacknam.
Données :

La largeur à mi-marée est sensiblement égale à 20 mètres, par suite de l'existence des deux bras : Moervaert et Zuidlede.

Profondeur moyenne à mi-marée	1 ^m .73
Section d'équilibre d'égale vitesse	1 ^m .925

Valeur du coefficient φ :

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,1905 + \frac{0,125}{0,01715} \left(\frac{1}{4,75} - \frac{1}{4,91} \right)}$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,1905 + 0,4015} = 0,6275.$$

Valeur de l'amplitude théorique :

$$h = 0,6245 \times 5,95 \times \frac{5,00}{1,75} \sqrt{\frac{65,4}{20} \times \frac{2,558}{456,5}}$$

$$h = 0,84 \text{ m.}$$

Soit sensiblement l'amplitude observée à Dacknam.

Quand on trace la courbe des largeurs au moyen des résultats des calculs ci-dessus, on voit (pl. VII) que cette courbe épouse parfaitement le diagramme des largeurs vraies. Ce n'est guère que dans le voisinage de Dacknam que la concordance n'est pas complète. Mais il est à remarquer, que nous nous trouvons en cet endroit près du confluent du Moervaert et de la Zuidlede, qui réalise à 600 mètres en amont de Dacknam un élargissement brusque de la rivière, qui doit nécessairement faire sentir son effet jusqu'à Dacknam même.

La discordance devient moins frappante quand on complète le diagramme des largeurs en amont du confluent par la somme des largeurs du Moervaert et de la Zuidlede. On voit alors très distinctement que la largeur admise ci-dessus est en harmonie avec la largeur des deux bras existant en amont du confluent.

§ 3. — Calcul des sections réelles à marée haute.

Partie comprise entre l'embouchure de la Durme et Waesmunster.

Nous avons vu au paragraphe précédent que la largeur théorique à Waesmunster est égale à 45 mètres. Ceci correspond à une section à marée haute de :

$$45 \left(3,55 + \frac{3,60}{2} \right) = 231 \text{ m}^2$$

en négligeant les triangles supplémentaires provenant de l'inclinaison des talus. Cette section est un peu plus grande que celle existante, qui est 211 mètres carrés.

Calculons maintenant les sections intermédiaires comprises entre Waesmunster et l'embouchure de la Durme. La quantité w' dans le terme supplémentaire du logarithme de la section est donnée par la relation :

$$\log 231 - \log 139,55 = \log \left(\frac{1}{1 - w' \times 10,825} \right)^2$$

$$w' = 0,0245.$$

Section réelle à 1k.5 en amont de l'embouchure.

Valeur du terme supplémentaire du logarithme de la section d'égale vitesse :

$$\log \left(\frac{1}{1 - 0,0245 \times 1,510} \right)^2 = 0,02776$$

$$\log \zeta = 2,58754 + 0,02776 = 2,61530$$

$$\zeta = 412^{\text{m}^2}, 4.$$

Section réelle à 3k.5 en amont de l'embouchure.

Valeur du terme supplémentaire du logarithme de la section d'égale vitesse :

$$\log \left(\frac{1}{1 - 0,0245 \times 5,5} \right)^2 = 0,07846$$

$$\log \zeta = 2,48054 + 0,07846 = 2,55900$$

$$\zeta = 362^{\text{m}^2}, 15.$$

Section réelle à Waesmunster.

$$\zeta = 231^{\text{m}^2}. \text{ (Voir calcul ci-dessus.)}$$

Tronçon Waesmunster-Lokeren.

La largeur théorique à Lokeren (voir calculs des amplitudes) est égale à 30 mètres. Ceci correspond à une section à marée haute, en négligeant les triangles supplémentaires dus à l'inclinaison des talus, de :

$$30 \left(1,856 + \frac{2,21}{2} \right) = 88^{\text{m}^2}, 2.$$

Cette section est plus grande que celle qui figure au diagramme, et qui est d'environ 66 mètres carrés. Cela provient de ce que M. l'Ingénieur en chef-Directeur Van Brabant a déterminé la section à Lokeren en comptant sur une amplitude de marée de 1^m,75, alors que les observations directes ultérieures ont démontré que l'amplitude à Lokeren est de 2^m,21. Si l'on voulait corriger la surface de la section à marée haute à Lokeren, il faudrait ajouter

$$30 (1,21 - 1,75) = 13^{\text{m}^2}, 8,$$

ce qui donnerait une section d'environ 80 mètres carrés,

chiffre qui se rapproche de celui établi plus haut par une autre méthode.

En admettant la surface de $88^{\text{m}^2},2$ à Lokeren, nous pouvons à nouveau calculer toutes les sections intermédiaires entre Waesmunster et Lokeren.

La section à Waesmunster devenant 231 mètres carrés, les nouvelles sections d'égale vitesse en amont de Waesmunster jusque Lokeren sont :

$$\log 231 = 2.36361.$$

Section à 4km 725 en amont de Waesmunster.

$$\log \zeta = 2.36361 - 0.40350 = 1.96011.$$

$$\zeta = 91^{\text{m}^2},3.$$

Section à Lokeren.

$$\log \zeta = 1.96011 - 0.53750 = 1.42261.$$

$$\zeta = 26^{\text{m}^2},46.$$

La valeur de w' dans le terme supplémentaire du logarithme de la section d'égale vitesse est donnée par la relation :

$$\log 88^{\text{m}^2},2 - \log 26^{\text{m}^2},46 = \log \left(\frac{1}{1 - w' \times 9,067} \right)^2$$

soit $w' = 0.0499$.

Section réelle à 4km.725 en amont de Waesmunster.

Valeur du terme supplémentaire du logarithme de la section d'égale vitesse :

$$\log \left(\frac{1}{1 - 0.0499 \times 4,725} \right)^2 = 0,23300$$

$$\log \zeta = 1.96011 + 0.23300 = 2.19311.$$

$$\zeta = 156 \text{ mètres carrés.}$$

Tronçon Lokeren-Confluent Moervaert et Zuidlede.

Section à Lokeren.

$$\zeta = 88^{\text{m}^2},2 \text{ (voir calcul plus haut).}$$

Section au confluent Moervaert et Zuidlede.

$$20 \text{ m.} \left(1,75 + \frac{0,84}{2} \right) = 43^{\text{m}^2}.$$

Les nouvelles sections d'égale vitesse entre Lokeren et le confluent sont :

Section à Dacknam.

$$\log \zeta = \log 88^{\text{m}^2},2 - \frac{0.688}{0,01715} \left(\frac{1}{\sqrt{1,74}} - \frac{1}{\sqrt{1,856}} \right)$$

$$\log \zeta = 1.94547 - 0.842 = 1.10347.$$

$$\zeta = 12^{\text{m}^2},69.$$

Section au confluent.

$$\log \zeta = 1.94547 - \frac{0,683}{0,01715} \left(\frac{1}{\sqrt{1,75}} - \frac{1}{\sqrt{1,856}} \right) = 1.02247$$

$$\zeta = 10^{\text{m}^2},53.$$

Moyennant la connaissance de la section au confluent du Moervaert et de la Zuidlede, nous pouvons déterminer la valeur de w' et calculer les sections intermédiaires entre Lokeren et le confluent.

$$\log 43^{\text{m}^2} - \log 10^{\text{m}^2},53 = \log \left(\frac{1}{1 - w' \times 6,158} \right)^2$$

$$w' = 0.082.$$

Section à Dacknam.

Valeur du terme supplémentaire du logarithme de la section d'égale vitesse.

$$\log \left(\frac{1}{1 - 0,082 \times 5,558} \right)^2 = 0,52892$$

$$\log \zeta = 1,10347 + 0,52892 = 1,63239$$

$$\zeta = 42^{\text{m}^2},9.$$

La section à Dacknam est notablement plus grande que la section réelle, soit $31^{\text{m}^2},4$; cela provient de ce que nous avons dû admettre une largeur théorique plus grande que la largeur réelle par suite de l'élargissement dû au confluent du Moervaert et de la Zuidlede.

Tableau récapitulatif des sections théoriques de la Durme.

STATIONS	SECTIONS
	mèt. carré.
Embouchure de la Durme	456,5
1km,5 en amont de l'embouchure	412,4
3km,5 en amont de l'embouchure	362,15
Waesmunster	231,0
4km,725 en amont de Waesmunster	156,0
Lokeren	88,2
Dacknam	42,9
Confluent du Moervaert et de la Zuidlede	43,0

§ 4. — Calcul des débits de la marée.

Embouchure. Données :

Amplitude réelle	3,96 m
Section d'équilibre d'égale vitesse	456,5 m ²

Débit de la marée :

Débit du flot	3.739.560 m ³
Débit d'amont (5 × 3.600 + 5 × 60)2 =	36.600
Total.	3.776.160 m ³

Valeur de la constante C :

$$c = \frac{3.776.160 \times 3,96}{456,5} = 327.550$$

Waesmunster. Données :

Amplitude réelle	3,38 m
Section d'équilibre d'égale vitesse	139,33 m ²

Débit de la marée :

Débit de flot	1.072.830 m ³
Débit d'amont : (5 × 3.600 + 60 × 1) 1,5 =	27 090
Total.	1.099.920 m ³

Valeur de la constante C :

$$c = \frac{1.099.920 \times 3,58}{139,53} = 26700.$$

Dacknam. Données :

Amplitude réelle	0,62
Section d'équilibre d'égale vitesse	2,358 m ²

Débit de la marée :

Débit de flot	84.754 m ³
Débit d'amont : (3 × 3.600 + 60 × 7) 1 =	11.220
Total.	95.974 m ³

Valeur de la constante C :

$$c = \frac{95.974 \times 0,62}{2,558} = 23500.$$

Quand on compare les résultats des calculs ci-dessus, on voit que la loi des débits se vérifie pour Waesmunster et Dacknam, mais que la même concordance n'existe plus pour la valeur de la constante à Waesmunster et Dacknam comparée à celle de l'embouchure. Cette discordance provient des irrigations effectuées en hiver tout le long de la Durme, qui ont pour conséquence de diminuer l'amplitude de la marée et le volume de l'eau contenu entre les rives de la rivière.

Les chiffres donnés par M. l'ingénieur en chef directeur Van Brabandt se rapportent à la marée moyenne et négligent la moitié du volume des eaux d'irrigation. Dans ces conditions, il est impossible d'obtenir une vérification bien exacte de la loi des débits.

La vérification de la loi des débits se fait beaucoup mieux à l'embouchure et à Waesmunster, quand on considère les 4 autres marées dont M. Van Brabant a fait la cubature, soient celle du 8-9 avril 1890, 1^{er} et 2^e flot et celle du 8-9 octobre 1890, 1^{er} et 2^e flot.

La même vérification ne se fait toutefois pas à Dacknam. La marée du 8-9 avril 1890 donne une valeur de la constante plus petite que celle qu'on obtient à Waesmunster et à l'embouchure, la marée du 8-9 octobre 1890 donne une valeur notablement plus grande.

Cette anomalie est probablement due, soit à des erreurs de

cubature commises sur des débits de marée peu importants, soit à des phénomènes secondaires, par exemple : l'action du vent, agissant sur des marées isolées. Il est encore à remarquer qu'à l'époque du 8-9 avril, les irrigations ont presque totalement cessé et qu'à la date du 8-9 octobre les irrigations ont à peine commencé. Il en résulte que le régime intermédiaire, qui existe vers ces époques, a pu influencer, dans un sens ou dans l'autre, la valeur de la constante de la loi du débit.

**Vérification de la loi du débit pour les marées
du 8-9 avril et du 8-9 octobre 1890.**

Désignation des marées considérées.	Stations.	Débits de flot.	Débits supérieurs.	Débits totaux.	Amplitudes.	Section d'égalité vite-se.	Valeur de la constante.
Marée du 8-9 avril 1890.	Embouchure. . .	4784900	36600	4821500	4.25	456.5	44900
	Waesmunster. . .	1504600	27090	1531690	3.84	139.33	42200
	Premier flot. Dacknam.	100500	11220	111720	0.63	2.358	28900
Marée du 8 9 avril 1890.	Embouchure. . .	3869700	36600	3906300	3.87	456.5	33100
	Waesmunster. . .	1235900	27090	1262990	3.33	139.33	301 0
	Deuxième flot. Dacknam.	71300	11220	82520	0.47	2.358	16500
Marée du 8-9 octobre 1890.	Embouchure. . .	2556400	36600	2693000	2.69	456.5	15700
	Waesmunster. . .	872500	27090	899590	2.63	139.33	17000
	Premier flot. Dacknam.	88000	11220	99220	0.62	2.358	26200
Marée du 8 9 octobre 1890.	Embouchure. . .	3141300	36600	3177900	3.44	456.5	23950
	Waesmunster. . .	1000200	27090	1027090	3.14	139.33	23100
	Deuxième flot. Dacknam.	94600	11220	105820	0.69	2.358	30950

La loi du débit permet de déterminer d'une façon très simple le volume des irrigations. A cet effet, il suffit de déterminer par l'opération de la cubature les volumes de remplissage entre les rives de la rivière pour une marée moyenne d'hiver, puis de calculer par la loi du débit les volumes de remplissage réels. La différence entre les deux volumes ainsi obtenus donne le volume d'eau des irrigations.

Nous avons vu, par l'étude de la marée fluviale de l'Escaut,

que la constante C, en chaque point de la rivière, est égale à une constante Γ multipliée par le carré de l'amplitude de la marée. Vérifions si cette propriété se vérifie pour la Durme.

Stations.	Marée moyenne.		Marée du 8-9 avril 1890.				Marée du 8-9 oct. 1890.			
			1 ^{er} flot.		2 ^e flot.		1 ^{er} flot.		2 ^e flot.	
	h ²	Γ	h ²	Γ	h ²	Γ	h ²	Γ	h ²	Γ
Embouchure .	15,60	2100	18,50	2425	14,98	2210	7,17	2190	11,84	2020
Waesmunster .	11,43	2330	14,75	2860	11,10	2715	6,92	2460	9,86	2345
Dacknam . .	0,385	65700	0,463	62400	0,221	74600	0,38	68000	0,47	64800

Le tableau ci-dessus montre que la propriété se vérifie d'une manière très satisfaisante.

§ 5. — Niveau moyen de la rivière.

Opérons comme pour les autres rivières du bassin de l'Escaut maritime : soit sur des tronçons de rivière suffisamment courts pour que nous puissions substituer aux lois de variation vraie de l'amplitude de la marée, de la profondeur, de la largeur du fleuve ainsi que du débit supérieur des lois exponentielles approchées. Nous pouvons alors appliquer les formules de la théorie générale. Nous admettons dans nos calculs les débits d'amont moyens établis par M. l'Ingénieur en chef Directeur Van Brabant : soit 2 mètres cubes à l'embouchure de la Durme, 1^m3,5 à Waesmunster et 1 mètre cube à Dacknam, qui doivent se rapprocher beaucoup de la réalité.

Relèvement dû à la marée seule.

A. Embouchure de la Durme-Waesmunster.

Amplitude de la marée à l'embouchure de la Durme : 3^m.96 ; à Waesmunster : 3^m.60.

Loi de variation de l'amplitude :

$$h = 3,96 e^{-0,0088x}$$

Amplitude à 1,5 Km. en amont de l'embouchure de la Durme :

$$h = 3,96 e^{-0,0088 \times 1,5} = 3^m,90.$$

Amplitude à 3,5 km. en amont de l'embouchure de la Durme :

$$h = 3,96 e^{-0,0088 \times 3,5} = 3^m,84.$$

1^{re} Section : Embouchure de la Durme jusque 1,5 km. en amont.

Profondeur moyenne à mi-marée à l'embouchure : 5 mètres; à 1,5 kilomètres en amont de l'embouchure : 2^m.72.

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

$$\lambda = 5,00 e^{-0,406x}$$

Largeur de la rivière à l'embouchure : 65^m,4 ; à 1,5 km. en amont : 94^m,5.

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

$$\left[\frac{65,4}{65,4+2 \times 5,00} + \frac{94,5}{94,5+2 \times 2,72} \right] : 2 = (0,854+0,944) : 2 = 0,899.$$

Valeur moyenne du coefficient b :

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,854 \times 5} \right) = 0,362$$

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,944 \times 2,72} \right) = 0,416$$

$$\text{Valeur moyenne : } 0,778 : 2 = 0,389.$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\tilde{\tau}_m = \frac{0,389 \times 0,095 \times 3,96^2 \times e^{-2 \times 0,0088x}}{0,899 \times 5^{5,2} \times e^{-5/2 \times 0,406x}} dx.$$

Relèvement total à 1,5 km. en amont de l'embouchure de la Durme :

$$\tilde{\tau}_m = \frac{0,389 \times 0,095}{0,899 \times 0,9974} \times \frac{3,96^2}{5^{2/5}} \left(e^{0,9974 \times 1,5} - 1 \right) = 0^m,039.$$

2^e Section : 1,5 km. amont embouchure jusque 3,5 km. amont embouchure.

Profondeur moyenne à mi-marée à 1,5 km. en amont : 2^m.72 ; à 3,5 km. en amont : 4^m.38.

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

$$\lambda = 2,72 e^{0,2385x}$$

Largeur de la rivière à 1,5 km. en amont de l'embouchure : 94^m,5 ; à 3,5 km. en amont de l'embouchure : 64 mètres.

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

$$\left[\frac{94,5}{94,5+2 \times 2,72} + \frac{64}{64+2 \times 4,58} \right] : 2 = (0,944+0,878) : 2 = 0,911.$$

Valeur moyenne du coefficient b :

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,911 \times 2,72} \right) = 0,416$$

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,878 \times 4,58} \right) = 0,371$$

$$\text{Valeur moyenne : } 0,787 : 2 = 0,3935.$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\tilde{\tau}_m = \frac{0,3935 \times 0,095 \times 3,90^2 \times e^{-2 \times 0,0088x}}{0,911 \times 2,72^{5/2} \times e^{5/2 \times 0,2385x}} dx.$$

Relèvement total à 3,5 Km. en amont de l'embouchure de la Durme :

$$\tilde{\tau}_m = \frac{0,3935 \times 0,095}{0,911 \times 0,6136} \times \frac{3,90^2}{2,72^{2,5}} \left(1 - \frac{1}{e^{-0,6136 \times 2}} \right) = 0^m,0575.$$

3^e Section : 3,5 Km. amont de l'embouchure jusque Waesmunster.

Profondeur moyenne à mi-marée à 3,5 Km. amont embouchure : 4^m,38 ; à Waesmunster : 3^m,33.

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

$$\lambda = 4,38 e^{-0,0375x}$$

Largeur de la rivière à 3,5 Km. en amont de l'embouchure : 64 mètres ; à Waesmunster : 45 mètres.

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

$$\left[\frac{64}{64 + 2 \times 4,58} + \frac{45}{45 + 2 \times 5,35} \right] : 2 = (0,878 + 0,872) : 2 = 0,875.$$

Valeur moyenne du coefficient b :

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,878 \times 4,58} \right) = 0,371$$

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,872 \times 5,35} \right) = 0,401$$

$$\text{Valeur moyenne : } 0,772 : 2 = 0,386.$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\zeta_m = \frac{0,586 \times 0,095 \times 5,84^2 \times e^{-2 \times 0,0088x}}{0,875 \times 4,58^{5/2} \times e^{-5/2 \times 0,0373x}} dx.$$

Relèvement total à Waesmunster :

$$\zeta_m = \frac{0,586 \times 0,095}{0,875 \times 0,07615} \times \frac{5,84^2}{4,58^{5/2}} \left(e^{-0,07615 \times 7,325} - 1 \right)$$

$$\zeta_m = 0^m,148.$$

B. *Waesmunster-Lokeren.*

Amplitude de la marée à Waesmunster : 3^m,60.

A Lokeren : 2^m,21.

Loi de variation de l'amplitude entre Waesmunster et Lokeren :

$$h = 3^m,60 e^{-0,0537x}.$$

Amplitude de la marée à 4.725 Km. en amont de Waesmunster :

$$h = 3,60e^{-0,0537 \times 4,725} = 2^m,79.$$

Première Section. — Waesmunster : 4.725 Km. en amont de Waesmunster.

Profondeur moyenne à mi-marée à Waesmunster : 3^m,33 ; à 4.725 Km. en amont : 1^m,91.

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

$$\lambda = 3,33e^{-0,1177x}.$$

Largeur à Waesmunster : 45 mètres ; à 4.725 Km. en amont de Waesmunster : 38^m,5.

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

$$\left[\frac{45}{45 + 2 \times 5,35} + \frac{58,5}{58,5 + 2 \times 4,91} \right] : 2 = (0,872 + 0,908) : 2 = 0,89.$$

Valeur moyenne du coefficient b :

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,872 \times 5,35} \right) = 0,401$$

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,908 \times 4,91} \right) = 0,481$$

$$\text{Valeur moyenne : } 0,882 : 2 = 0,441.$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\zeta_m = \frac{0,441 \times 0,095 \times 5,60^2 \times e^{-2 \times 0,0537x}}{0,89 \times 5,35^{5/2} \times e^{-5/2 \times 0,01177x}} dx.$$

Relèvement total à 4.725 Km. en amont de Waesmunster :

$$\zeta_m = \frac{0,441 \times 0,095}{0,89 \times 0,1868} \times \frac{5,60^2}{5,35^{5/2}} \left(e^{0,1868 \times 4,725} - 1 \right) = 0^m,222.$$

2^e Section. — 4.725 Km. en amont de Waesmunster-Lokeren.

Profondeur moyenne à mi-marée à 4.725 Km. en amont de Waesmunster : 1^m,91 ; à Lokeren : 1^m,836.

Loi de variation de la profondeur à mi-marée.

$$\lambda = 1,91e^{-0,00911x}.$$

Largeur à 4.725 Km. en amont de Waesmunster : 38^m,5 ; à Lokeren : 30 mètres.

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

$$\left[\frac{58,5}{58,5 + 2 \times 4,91} + \frac{50}{50 + 2 \times 1,836} \right] : 2 = (0,908 + 0,890) : 2 = 0,899.$$

Valeur moyenne du coefficient b :

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,908 \times 4,91} \right) = 0,481$$

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,89 \times 1,836} \right) = 0,495$$

$$\text{Valeur moyenne : } 0,974 : 2 = 0,487.$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$dz_m = \frac{0,487 \times 0,095 \times 2,79^2 \times e^{-2 \times 0,0537x}}{0,899 \times 1,91^{2,5} \times e^{-2,5 \times 0,00911x}} dx.$$

Relèvement total à Lokeren :

$$z_m = \frac{0,487 \times 0,095}{0,899 \times 0,0846} \times \frac{2,79^2}{1,91^{2,5}} \left(1 - e^{-0,0846 \times 4,342} \right) = 0^m,284.$$

C. Lokeren-Dacknam :

Amplitude de la marée à Lokeren : 2^m,21 ; à Dacknam : 0^m,85.

Loi de variation de l'amplitude :

$$h = 2,21 e^{-0,1722x}.$$

Profondeur moyenne à mi-marée à Lokeren : 1^m,836 ; à Dacknam : 1^m,74.

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

$$\lambda = 1,836 e^{-0,00967x}.$$

Largeur à Lokeren : 30 mètres ; à Dacknam : 16 mètres.

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

$$\left[\frac{30}{30 + 2 \times 1,836} + \frac{16}{16 + 2 \times 1,74} \right] : 2 = \left(0,890 + 0,820 \right) : 2 = 0,855.$$

Valeur moyenne du coefficient b :

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,89 \times 1,836} \right) = 0,493$$

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,82 \times 1,74} \right) = 0,524$$

$$\text{Valeur moyenne : } 1,017 : 2 = 0,5085.$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$dz_m = \frac{0,5085 \times 0,095 \times 2,21^2 \times e^{-2 \times 0,1722x}}{0,855 \times 1,836^{2,5} \times e^{-2,5 \times 0,00967x}} dx.$$

Relèvement total à Dacknam :

$$z_m = \frac{0,5085 \times 0,095}{0,855 \times 0,3202} \times \frac{2,21^2}{1,836^{2,5}} \left(1 - e^{-0,3202 \times 5,558} \right)$$

$$z_m = 0^m,162.$$

Relèvements totaux dus au phénomène de la marée.

Stations.	Relèvements	
	partiels.	totaux.
Embouchure	Mètres.	Mètres.
	0.0390	0.0000
Point à 1km,5 en amont de l'em- bouchure	0.0573	0.039
Point à 3km,5 en amont de l'em- bouchure	0.148	0.0963
Waesmunster	0.222	0.2443
Point à 4 km.725 en amont de Waes- munster	0.284	0,4663
Lokeren	0.162	0.7505
Dacknam		0.9123

Relèvement dû au débit d'amont seul (1).

Quand on fait le calcul pour la section comprise entre l'embouchure de la Durme et Waesmunster, on trouve que le relèvement du niveau moyen sous l'influence de l'évacuation du débit d'amont est imperceptible, par suite de la faible importance du débit d'amont et de la grande surface des sections transversales du fleuve. Le relèvement calculé est de moins d'un millimètre. Nous ne reproduirons pas ici les calculs et nous nous contenterons de donner ceux relatifs à la section Waesmunster-Dacknam, qui donne un relèvement de plusieurs millimètres.

A. Waesmunster-Lokeren.

Débit supérieur à Waesmunster : 1^{m3},5 ; à Dacknam : 1^{m3}.000.

(1) Pour la valeur des coefficients $\frac{l}{l + 2\lambda}$ et b voir le relèvement dû à la marée.

Loi de variation du débit supérieur :

$$q = 1,5e^{-0,0277x}$$

Débit d'amont à 4^{km}.725 en amont de Waesmunster :

$$q = 1,5e^{-0,0277 \times 4,725} = 1,315^{ms}$$

Débit d'amont à Lokeren :

$$q = 1,5e^{-0,0277 \times 9,067} = 1,616^{ms}$$

Largeur à Waesmunster : 45 mètres ; à Lokeren : 30 mètres.

Loi de variation de la largeur :

$$l = 45e^{-0,0447x}$$

Largeur à 4^{km}.725 en amont de Waesmunster :

$$l = 45e^{-0,0447 \times 4,725} = 36^{m,4}$$

Première section : Waesmunster jusque 4.725 en amont.

Loi de la profondeur moyenne à mi-marée :

$$\lambda = 3,33e^{-0,1177x}$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$dz_a = \frac{0,441 \times 1,5^2 \times e^{-2 \times 0,0277x} \times dx}{0,89^2 \times 45^2 \times e^{-2 \times 0,0447x} \times 3,33^3 \times e^{-3 \times 0,1177x}}$$

Relèvement total du niveau moyen à 4^{km}.725 en amont de Waesmunster :

$$\zeta_a = \frac{0,441}{0,89 \times 0,3871} \times \frac{1,5^2}{45^2 \times 3,33^3} \left(e^{0,3871 \times 4,725} - 1 \right) = 0,00021$$

Deuxième section. Depuis 4^{km}.725 en amont de Waesmunster jusque Lokeren.

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

$$\lambda = 1,91e^{-0,00911x}$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$dz_a = \frac{0,487 \times 1,315^2 \times e^{-2 \times 0,0277x} \times dx}{0,899 \times 36,4^2 \times e^{-2 \times 0,0447x} \times 1,91^3 \times e^{-3 \times 0,0911x}}$$

Relèvement total du niveau moyen à Lokeren.

$$\zeta_a = \frac{0,487}{0,899 \times 0,06153} \times \frac{1,315^2}{36,4^2 \times 1,91^3} \left(e^{0,06133 \times 4,3421} - 1 \right) = 0,066056$$

B. Lokeren-Dacknam.

Largeur à Lokeren : 30 mètres ; à Dacknam : 16 mètres.

Loi de variation de la largeur :

$$l = 30e^{-0,113x}$$

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

$$\lambda = 1,836e^{-0,00967x}$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$dz_a = \frac{0,5085 \times 1,166^2 \times e^{-2 \times 0,0277x} \times dx}{0,855 \times 30^2 \times e^{-2 \times 0,113x} \times 1,836^3 \times e^{-3 \times 0,00967x}}$$

Relèvement total du niveau moyen à Dacknam :

$$\zeta_a = \frac{0,5085}{0,855 \times 0,19961} \times \frac{1,166^2}{30^2 \times 1,836^3} \left(e^{0,19961 \times 3,558} - 1 \right) = 0,00172$$

Relèvements totaux dus au débit d'amont.

Stations.	Relèvements	
	partiels.	totaux.
Waesmunster	0 ^m .00021	
Point à 4.725 en amont de Waesmunster		0 ^m .00021
Lokeren	0 ^m .00056	0 ^m .00077
Dacknam	0 ^m .00173	0 ^m .0015 ou 0 ^m .002

Relèvement dû à la marée et au débit d'amont (1).

A. Waesmunster-Lokeren.

Loi de variation du débit supérieur : $q = 1,5e^{-0,0277x}$.

Loi de variation de la largeur : $l = 45e^{-0,0447x}$.

Loi de variation de l'amplitude : $h = 3,60e^{-0,0537x}$.

1^{re} Section. — Waesmunster jusque 4,725 km. en amont.

Loi de variation de la profondeur : $3,33e^{-0,1177x}$.

(1) Pour la valeur des coefficients $\frac{l}{l+2\lambda}$ et b, voir le relèvement dû à la marée.

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\zeta_{ma} = \frac{0,441 \times 2 \times \sqrt{0,095} \times 5,60 e^{-0,0537x} \times 1,5 e^{-0,0277x}}{0,89 \times 45 \times e^{-0,0447x} \times 5,55^{11/4} \times e^{-11/4} \times 0,1177x} dx.$$

Relèvement total du niveau moyen à 4km.725 en amont de Waesmunster :

$$\zeta_{ma} = \frac{0,441 \times 2 \times \sqrt{0,095}}{0,89 \times 0,287} \times \frac{5,60 \times 1,5}{45 \times 5,55^{11/4}} \left(e^{0,287 \times 4,725} - 1 \right) = 0^m,0152.$$

2^e Sectoin. — 4,725 km. en amont de Waesmunster-Lokeren.

Loi de variation de la profondeur : $\lambda = 1,91 \times e^{-0,00911x}$.

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\zeta_{ma} = \frac{0,487 \times 2 \times \sqrt{0,095} \times 2,79 \times e^{-0,0537x} \times 1,515 \times e^{-0,0277x}}{0,899 \times 36,4 \times e^{-0,0447x} \times 1,91^{11/4} \times e^{-11/4} \times 0,00911x} dx.$$

Relèvement total du niveau moyen à Lokeren :

$$\zeta_{ma} = \frac{0,487 \times 2 \times \sqrt{0,095}}{0,899 \times 0,0116} \times \frac{2,79 \times 1,515}{36,4 \times 1,91^{11/4}} \left(1 - e^{-0,0116 \times 4,342} \right) = 0^m,0242.$$

B. Lokeren-Dacknam.

Loi de variation du débit supérieur : $q = 1,166 e^{-0,0277x}$.

Loi de variation de la largeur : $l = 30 e^{-0,113x}$.

Loi de variation de l'amplitude : $h = 2,21 e^{-0,1722x}$.

Loi de variation de la profondeur : $\lambda = 1,836 e^{-0,00967x}$.

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\zeta_{ma} = \frac{0,5085 \times 2 \times \sqrt{0,095} \times 2,21 e^{-0,1722x} \times 1,166 e^{-0,0277x}}{0,855 \times 30 \times e^{-0,113x} \times 1,836^{11/4} \times e^{-11/4} \times 0,00967x} dx.$$

Relèvement total du niveau moyen à Dacknam :

$$\zeta_{ma} = \frac{0,5085 \times 2 \times \sqrt{0,095}}{0,855 \times 0,0603} \times \frac{2,21 \times 1,166}{30 \times 1,836^{11/4}} \left(1 - e^{-0,0603 \times 5,558} \right) =$$

$$\zeta_{ma} = 0^m,0285.$$

Relèvements totaux dus au débit d'amont et à la marée.

Stations.	Relèvements	
	partiels.	totaux.
Waesmunster	0 ^m .0132	
Point à 4km.725 en amont de Waesmunster		0 ^m .0132
Lokeren	0 ^m .0242	0 ^m .0374
Dacknam	0 ^m .0285	0 ^m .0659 ou 0 ^m .066

Tableau récapitulatif des relèvements totaux de la Durme ainsi que des cotes de hauteur calculées et observées à mi-marée.

Stations.	Relèvements totaux dus				Cotes de la marée		Observations.
	à la marée.	au débit d'amont.	au débit d'amont et marée.	à tous les phénomènes.	calculées.	observations en 1901-1910.	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
Embouchure	0.0000	-	-	0.000	2 m. 69	2 m. 69	Les chiffres de la 5 ^e colonne sont obtenus en additionnant les chiffres des colonnes 2, 3 et 4.
Point à 1.5 Km. en amont de l'embouchure	0.039	-	-	0.039	-	-	
Point à 3.5 Km. en amont de l'embouchure	0.0963	-	-	0.096	-	-	
Waesmunster	0.2443	-	-	0.244	2.934	2.93	
Point à 4.725 Km. en amont de Waesmunster	0.4663	0.0002	0.0132	0.48	-	-	
Lokeren	0.7503	0.0008	0.0374	0.788	-	-	
Dacknam	0.9123	0.002	0.066	0.980	3.67	3.53	

Les calculs ci-dessus montrent qu'il y a une concordance très grande entre les résultats de la théorie et ceux de l'observation depuis l'embouchure jusqu'à Waesmunster. Il y a un certain écart à Dacknam. Cela est probablement imputable au fait que, les calculs des relèvements dus à la marée ont été

faits en comptant sur les amplitudes non modifiées par les irrigations de l'hiver. Or, nous avons vu plus haut que ces amplitudes sont inférieures aux amplitudes moyennes de l'année, de sorte que les relèvements obtenus par calculs pour le niveau moyen de la rivière doivent être un peu supérieurs à ceux qui résultent des observations moyennes d'une année complète.

Par suite de l'exécution d'irrigations en hiver et du peu d'importance du débit d'amont, il est impossible de montrer sur la Durme que l'amplitude de la marée est plus forte en été qu'en hiver. Nous ne pouvons non plus pas bien voir se qui se passe en vive et en morte eau; car, par suite de la faiblesse du tirant d'eau, la diminution de profondeur en morte eau détruit d'une façon générale l'influence de la diminution d'amplitude. On peut néanmoins voir par l'examen du tableau ci-dessous que le relèvement du niveau moyen de la marée est plus fort en vive eau qu'en morte eau depuis l'embouchure jusqu'à Waesmunster et que l'inverse se produit entre Waesmunster et Dacknam.

STATIONS.	Côte de niveau de la mi marée.		Relèvement du niveau de la mi-marée.	
	vive eau.	morte eau.	vive eau.	morte eau.
Embouchure.	2.78	2.45	0.00	0.00
Waesmunster	3.02	2.67	0.24	0.22
Dacknam	3.505	3.335	0.725	0.885

Vitesse de propagation de la marée fluviale.

§ 6. — Vitesse de propagation

STATIONS.	Profondeur à		Vitesse de propagation $\sqrt{g(H+h)}$		Fonction réductrice $1 + \frac{0.70}{H^2}$		Vitesse de propagation corrigée		Vitesse		Valeur de la vitesse de propagation de la marée plus la vitesse du courant.
	Marée		Marée		Marée		Marée		moyenne du courant de la marée.	du courant.	
	haute.	basse.	haute.	basse.	haute.	basse.	haute.	basse.			
Embouchure . . .	m.	m.	m.	m.			m.	m.	m.	m.	m.
1km.5 en amont.	6.98	3.02	8.27	5.44	0.986	0.929	8.15	5.06	0.441	0.353	8.503
3km.5 en amont.	4.67	0.77	6.77	2.75	0.969	0.458	6.56	1.26	0.434	0.348	6.908
4km.725 en amont.	6.30	2.46	7.86	4.92	0.982	0.895	7.72	4.41	0.425	0.34	8.060
Waesmunster . . .	5.13	1.53	7.09	3.87	0.973	0.768	6.90	2.98	0.391	0.313	7.213
Lokeren	3.31	0.51	5.70	2.24	0.939	0.271	5.36	0.607	0.323	0.259	5.619
Dacknam	2.94	0.73	5.37	2.68	0.925	0.432	4.97	1.16	0.260	0.208	5.108
	2.17	1.31	4.62	3.85	0.870	0.710	4.02	2.72	0.180	0.144	4.164

de la marée fluviale.

Valeur de $\frac{H+h}{H+2h}$.	Valeur de $\frac{H+h}{H+2h}$.	Vitesse réelle de propagation		Vitesse moyenne de propagation		Temps de propagation		Heure de la marée calculée.		Heure de la marée observée	
		Marée		Marée		Marée		haute.	basse.	haute.	basse.
		haute.	basse.	haute.	basse.	haute.	basse.				
m.		m.	m.	m.	m.						
10.94	0.638	5.21	4.707	4.395	2.805	5'44"	8'54"				
8.57	0.545	3.58	0.902	4.195	2.486	7'57"	13'24"				
10.14	0.622	4.81	4.070	4.485	3.368	27'12"	36'15"				
8.73	0.588	4.16	2.667	3.535	1.508	22'18"	52'10"	40'50"	58'33"	32'	58'
6.10	0.542	2.91	0.348	2.875	0.65	25'12"	1h.51'20"				
5.15	0.571	2.84	0.952	2.865	1.764	32'20"	52'30"				
3.02	0.718	2.89	2.576					2 h. 0'40"	4h.34'33"	2 h. 1'	4 h. 7'

On peut voir par les calculs ci-dessus que la concordance entre la théorie et la pratique est très satisfaisante sur toute la longueur du cours de la Durme.

§ 7. — Durées du gagnant et du perdant.
Durées du flot et du jusant.

STATIONS.	Durée du		Durée du		Différence entre le	
	flot.	gagnant.	jusant.	perdant.	flot et le gagnant.	jusant et le perdant.
Embouchure . . .	h 3.05'	h 3.12'	h. 7.20'	h. 7.13'	— 7'	+ 7'
Waesmunster . . .	5.01	4.54	7.24	7.31	+ 7'	— 7'
Dacknam	3.07	3.20	9.18	9.05	— 13'	+ 13'

Le tableau ci-dessus montre que, pour la Durme comme pour les autres rivières du bassin maritime de l'Escaut, le gagnant dure sensiblement autant que le flot et le perdant que le jusant. Ce n'est guère qu'à Dacknam que l'écart atteint 13', mais il est à remarquer que nous nous trouvons en ce point à l'extrémité amont et que le débit supérieur, très faible il est vrai, y fait déjà sentir son effet.

§ 8. — Vitesses moyennes courants de flot et de jusant.

Embouchure.

Profondeur moyenne à marée basse : 3^m,70.
Largeur de la rivière : 69 mètres.
Durée du flot : 5 × 3.600 + 5 × 60 = 18.300".
Durée du jusant : 44.700 — 18.300 = 26.400".
Débit du flot : 3.739.560 mètres cubes.
Débit du jusant : 3.828.960 mètres cubes.
Amplitude de la marée : 3^m,95.
Vitesse moyenne du flot :

$$v_f = \frac{3.739.560}{69 \left[3,70 + 1,975 \left(1 + \frac{4800}{18300} \right) \right] 18300} = 0^m,478.$$

Vitesse moyenne du jusant :

$$v_j = \frac{3.828.960}{69 \left[3,70 + 1,975 \left(1 - \frac{4800}{26400} \right) \right] 26400} = 0^m,395.$$

Waesmunster.

Profondeur moyenne à marée basse : 1^m,20.
Largeur de la rivière : 47 mètres.
Durée du flot : 5 × 3600 + 60 = 18060".
Durée du jusant : 44700 — 18060 = 26640".
Débit du flot : 1.072.830 mètres cubes.
Débit du jusant : 1.139.880 mètres cubes.
Amplitude de la marée : 3^m,38.
Vitesse moyenne du flot :

$$v_f = \frac{1.072.830}{47 \left[1,20 + 1,69 \left(1 + \frac{4800}{18060} \right) \right] 18060} = 0,378 \text{ m.}$$

Vitesse moyenne du jusant :

$$v_j = \frac{1.139.880}{47 \left[1,20 + 1,69 \left(1 - \frac{4800}{26640} \right) \right] 26640} = 0,351 \text{ m.}$$

Dacknam.

Profondeur moyenne à marée basse : 1^m,64.
Largeur de la rivière : 13 mètres.
Durée du flot : 3 × 3600 + 7 × 60 = 11220".
Durée du jusant : 44700 — 11220 = 33480".
Débit du flot : 84754 mètres cubes.
Débit du jusant : 129454 mètres cubes.
Amplitude de la marée : 0^m,62.
Vitesse moyenne du flot :

$$v_f = \frac{84.754}{13 \left[1,64 + 0,51 \left(1 + \frac{4800}{11220} \right) \right] 11220} = 0,278 \text{ m.}$$

Vitesse moyenne du jusant :

$$v_j = \frac{129.454}{13 \left[1,64 + 0,51 \left(1 - \frac{4800}{33480} \right) \right] 33480} = 0,164 \text{ m.}$$

Tableau comparatif des vitesses moyennes du flot et du jusant obtenues d'une part par calcul, d'autre part par cubature.

STATIONS.	Vitesse moyennes de flot obtenues par :		Vitesse moyennes de jusant obtenues par :	
	calcul.	cubature.	calcul.	cubature.
	Mètres.	Mètres.	Mètres.	Mètres.
Embouchure.	0.478	0.499	0.395	0.401
Waesmunster	0.378	0.409	0.351	0.378
Dacknam.	0.278	0.288	0.164	0.146

CHAPITRE XII.

DÉBITS SUPÉRIEURS DES RIVIÈRES DU BASSIN MARITIME DE L'ESCAUT.

L'étude du niveau moyen de l'Escaut maritime a montré : que les débits moyens d'amont, établis par M. l'Ingénieur en Chef Directeur Van Brabandt à Gand, pour l'Escaut maritime et à l'embouchure de la Durme, pour la Durme même, sont sensiblement exacts.

L'étude de l'Escaut maritime permet plus difficilement de vérifier le débit moyen donné pour la Dendre, car celui-ci est tellement faible en regard de l'importance des sections transversales de l'Escaut, qu'on ne peut pas voir si un débit trouvé est exact à 10, même 20 p. c. près. Quand on remarque toutefois que le chiffre donné par M. Van Brabandt pour l'Escaut maritime à Gand et pour la Durme à son embouchure sont sensiblement exacts, on peut admettre que celui de la Dendre, qui est située dans la même partie de notre pays, se rapproche aussi de la réalité.

Nous admettons donc comme établis :

Escaut maritime à Gand, 23 mètres cubes ;

Dendre, 7 mètres cubes ;

Durme, 2 mètres cubes.

Pour déterminer la variation du débit moyen amont de l'Escaut, par suite des apports latéraux, M. l'Ingénieur en Chef Directeur Van Brabandt s'est basé sur le résultat des

jaugeages effectués en juillet et août de l'année 1896 à l'embouchure du Rupel. Ces jaugeages ont donné 43 mètres cubes pour l'Escaut et 37 mètres cubes pour le Rupel. Nous avons établi, par l'étude des rivières du bassin maritime du Rupel, que le débit moyen d'amont de 37 mètres cubes pour le Rupel est trop faible et que 40 mètres cubes se rapproche plus de la réalité. Comme le débit moyen d'amont de 43 mètres cubes pour l'Escaut maritime a été obtenu dans les mêmes conditions que celui du Rupel, il sera judicieux d'admettre le même pourcentage d'augmentation pour l'Escaut que pour le Rupel. Dans ces conditions, le débit moyen d'amont le plus probable de l'Escaut devant le Rupel est de 46^{m³}.5. En retranchant du débit ci-dessus celui de l'Escaut à Gand, celui de la Dendre et celui de la Durme, l'augmentation du débit moyen d'amont de l'Escaut entre Gand et le Rupel sous l'influence des apports latéraux est de :

$$46,5 - (23 + 7 + 2) = 14^{m^3},5.$$

Pour répartir le cube du débit moyen latéral, nous admettons avec M. Van Brabandt que le bassin hydrographique latéral de l'Escaut va en s'élargissant à mesure qu'on se rapproche de l'embouchure du fleuve, de sorte que le débit latéral du fleuve varie suivant une équation du 2^e degré, de la forme.

$$q = ax^2$$

dans laquelle :

q représente le débit amont ;

a un coefficient ;

x la distance en kilomètres compté à partir de Gand.

Le coefficient a peut être obtenu en se plaçant à l'embouchure du Rupel.

$$14,5 = a \times \overline{67,8^2}$$

$$a = 0,00315.$$

Connaissant le coefficient a nous pouvons écrire les équations qui donnent le débit moyen d'amont de l'Escaut aux différents points du fleuve.

Section Gand-Termonde :

$$q = 23 + 0,00315x^2.$$

Section Termonde-Durme :

$$q = 30 + 0,00315x^2.$$

Section Durme-Rupel :

$$q = 32 + 0,00315x^2.$$

Section Rupel-Embouchure Escaut :

$$q = 72 + 0,00315x^2.$$

L'étude faite sur les rivières du bassin maritime du Rupel a montré qu'il faut modifier dans une certaine proportion les résultats du travail de M. Van Brabandt.

Les débits supérieurs moyens les plus probables pour ces rivières sont :

	Mèt. cubes.
Petite Nèthe, à Lierre.	6,000
Grande Nèthe, à Lierre	5,500
Nèthe inférieure, à Lierre.	11,500
Nèthe inférieure, à Rumpst	12,500
Dyle, à Rymenam	15,000
Dyle, à Malines.	16,000
Dyle, à Sennegat	17,000
Senne, à Sennegat	9,000
Dyle, à Rumpst.	26,000
Rupel, à Rumpst	38,500
Rupel à son embouchure dans l'Escaut	40,000

Moyennant les données ci-dessus, on peut calculer en chaque point d'une rivière maritime le débit moyen des eaux d'amont avec un très grand caractère de précision.

(A suivre.)

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. VII.

AVANT-PROPOS

Un mémoire intitulé: « *Qualités et défauts des pierres de taille et marbres, exploités dans la vallée de la Meuse namuroise* », a paru dans les *Annales de l'Association des Ingénieurs*, sortis des Écoles spéciales de Gand (tome XVI, 4^e livraison, 1893).

Depuis lors, de nombreuses carrières ont été ouvertes dans la région considérée; d'autres ont été abandonnées tandis que le champ d'action de plusieurs sièges d'extraction a reçu une extension telle que les conditions d'exploitation ont été complètement modifiées.

A la demande de plusieurs architectes et constructeurs, le mémoire rédigé en 1893, a été mis à jour.

On manque de renseignements positifs concernant les calcaires extraits de la vallée de la Meuse namuroise; une connaissance plus complète de cette pierre en aurait permis un emploi plus judicieux et plus économique.

L'art du constructeur repose avant tout sur la connaissance des matériaux. Cette connaissance ne s'acquiert que par l'expérience et les observations.