

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.

(Suite).

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

CHAPITRE IX.

DYLE.

Nous avons vu par l'étude de la Nèthe Inférieure que la section d'équilibre à marée haute à l'embouchure de la Dyle mesure 353 mètres carrés. Nous avons encore vu chapitre IV,

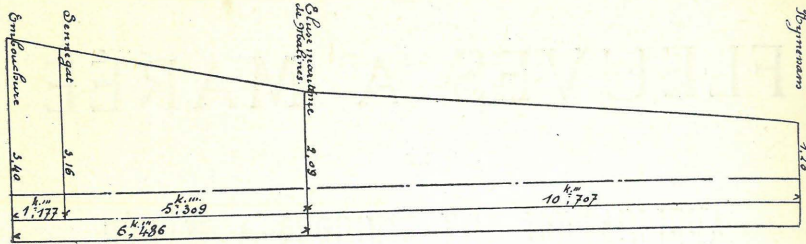


Fig. 25.

§ 1, que le profil des profondeurs moyennes à mi-marée est conforme au croquis ci-dessous :

Connaissant ces éléments nous pouvons faire l'étude de la rivière.

I. PREMIÈRE PARTIE.

Rumpst-Sennegat.

Section à l'embouchure : 353 m². $\log 353 = 2,54777$.

Largeur théorique à l'embouchure : $\frac{353}{3,4 + \frac{3,49}{2}} = 68^m.60$.

Coefficient de variation de la profondeur entre l'embouchure et l'écluse maritime à Malines :

$$a = \frac{3,4 - 2,09}{6,486} = 0,202.$$

Profondeur au Sennegat :

$$\lambda = 3,4 - 1,177 \times 0,202 = 3^m.16.$$

Section à marée haute d'égale vitesse au Sennegat :

$$\log \epsilon = 2,54777 - \frac{0,688}{0,202} \left(\frac{1}{\sqrt{3,16}} - \frac{1}{\sqrt{3,4}} \right)$$

$$\log \epsilon = 2,54777 - 0,0682 = 2,47957$$

$$\log \epsilon = 301,8 \text{ m}^2.$$

Déterminons la largeur de la rivière et l'amplitude de la marée qui correspondent à la section d'égale vitesse ci-dessus.

La valeur du coefficient de réduction φ de l'amplitude est égale à :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0,125}{0,202} \left(\frac{1}{3,16} - \frac{1}{3,4} \right)} = 0,984.$$

La largeur de la rivière et l'amplitude de la marée sont données par le système d'équations suivantes :

$$\left. \begin{aligned} h &= 0,984 \times 3,49 \times \frac{3,4}{3,16} \sqrt{\frac{68,6}{l} \times \frac{301,8}{353}} \\ l \left(3,16 + \frac{h}{2} \right) &= 301,8. \end{aligned} \right\}$$

D'où :

$$h = 3^m.64 \qquad l = 60^m.5.$$

La section existante mesure un peu plus que 261 mètres carrés et la largeur existante un peu plus que 55 mètres.

Au delà du Sennegat, la rivière se partage en deux bras. D'une part, nous avons la partie amont de la Dyle, d'autre part, la Senne. Le partage de la section à marée haute se fait proportionnellement aux énergies des ondes marées qui s'engagent dans chacune des rivières. Comme l'amplitude est la même dans les deux bras, les énergies sont proportionnelles aux volumes de remplissage. Ces volumes sont connus par l'étude de la marée moyenne faite par M. l'Ingénieur en chef Directeur Van Brabandt. Cet ingénieur a trouvé :

Dyle.

Débit de la marée :	608490 m ³
Débit d'amont : 16,5 (4 × 3600 + 32 × 60) =	269280
Total :	878770 m ³

Senne :

Débit de la marée :	520080 m ³
Débit d'amont : 8 (4 × 3600 + 32 × 60) =	130560
Total :	650640 m ³

Section d'équilibre à marée haute au Sennegat dans la :

Dyle :

$$\epsilon = 301,8 \frac{878770}{878770 + 650640} = 173^{\text{m}^2}, 2.$$

Senne :

$$\epsilon = 301,8 \frac{650640}{878770 + 650640} = 128^{\text{m}^2}, 6.$$

Vérifions à présent la loi du débit pour cette partie de la rivière.

Nous avons déterminé plus haut que le volume de remplissage de la Dyle à Rumpst est égal à 1.712.630 mètres cubes. Nous avons dès lors comme valeur de la constante à Rumpst :

$$c = \frac{1.712.630 \times 3,49}{553} = 16920.$$

Au Sennegat, nous avons comme volume de remplissage : 878770 + 650640 = 1.529.410 mètres cubes ; comme amplitude de la marée, donnée par M. Van Brabant : 3^m,29. D'où :

$$c = \frac{1.529.410 \times 3,29}{301,8} = 16650,$$

soit sensiblement la même valeur qu'à Rumpst.

Il nous est impossible de vérifier la loi du débit pour les quatre marées extraordinaires qui ont été étudiées par M. Van Brabant, car le recueil des documents relatifs à l'Escaut maritime ne fournit pas de renseignements complets au Sennegat. Les débits donnés ci-dessus permettent encore de vérifier les vitesses moyennes du courant de flot et de jusant à Rumpst et au Sennegat.

Rumpst. Données :

Profondeur moyenne à marée basse : 1^m,28.

Largeur à mi-marée : 53^m,20.

Durée du flot : $T_f = 4 \times 3600'' + 48 \times 60 = 17280''$.

Durée du jusant : $T_j = 7 \times 3600 + 37 \times 60 = 27420''$.

Débit du flot : $D_f = 1.289.130 \text{ m}^3$.

Débit du jusant : $D_j = 2.384.280 \text{ m}^3$

Vitesse moyenne de flot :

$$v_f = \frac{1.289.130}{53,2 \left[1,28 + 1,745 \left(1 + \frac{4800}{17280} \right) \right] 17280} = 0^{\text{m}}, 399.$$

Vitesse moyenne de jusant :

$$v_j = \frac{2.384.280}{53,2 \left[1,28 + 1,745 \left(1 - \frac{4800}{27420} \right) \right] 27420} = 0^{\text{m}}, 60.$$

Sennegat. (Dyle).

Profondeur moyenne à marée basse : 1^m,45.

Largeur à mi-marée : 38^m,2.

Durée du flot : $T_f = 4 \times 3600 + 32 \times 60 = 16320''$.

Durée du jusant : $T_j = 7 \times 3600 + 53 \times 60 = 28380''$.

Débit de flot : $D_f = 608490 \text{ m}^3$.

Débit de jusant : $D_j = 1.346.040 \text{ m}^3$.

Vitesse moyenne de flot :

$$v_f = \frac{608490}{38,2 \left[1,45 + 1,645 \left(1 + \frac{4800}{16320} \right) \right] 16320} = 0^{\text{m}}, 272.$$

Vitesse moyenne de jusant :

$$v_j = \frac{1.346.040}{38,2 \left[1,45 + 1,645 \left(1 - \frac{4800}{28380} \right) \right] 28380} = 0^{\text{m}}, 44.$$

Sennegat (Senne).

Profondeur moyenne à marée basse : 1^m,20.

Largeur à mi-marée : 32^m,9.

Durée du flot : 16320''.

Durée du jusant : 28380''.

Débit de flot : 520080 m³.

Débit de jusant : 877680 m³.

Vitesse moyenne de flot :

$$v_f = \frac{520080}{32,9 \left[1,20 + 1,645 \left(1 + \frac{4800}{16320} \right) \right] 16320} = 0,291 \text{ m.}$$

Vitesse moyenne de jusant :

$$v_j = \frac{877.680}{32,9 \left[1,20 + 1,645 \left(1 - \frac{4800}{28380} \right) \right] 28380} = 0,366 \text{ m.}$$

Tableau 40. — Tableau récapitulatif des vitesses moyennes de flot et de jusant.

Stations.	Vitesse moyennes de flot obtenues par		Vitesse moyennes de jusant obtenues par		Observations.
	calcul.	cubature.	calcul.	cubature.	
Rumpst	0.399	0.378	0.60	0.553	
Sennegat (Dyle)	0.272	0.251	0.441	0.44	
Sennegat (Senne)	0.291	0.29	0.366	0.341	

Il résulte du tableau ci-dessus qu'il y a une concordance très grande entre le résultat du calcul et celui de la cubature.

Déterminons maintenant le relèvement du niveau moyen.

A. Relèvement dû au phénomène de la marée.

Amplitude de la marée à l'embouchure : 3^m.49 ; au Sennegat : 3^m.64 (corrigée).

Loi de variation de l'amplitude :

$$h = 3,49e + 0,0357x$$

Profondeur moyenne à mi-marée à l'embouchure : 3^m,40 ; au Sennegat : 3^m,16.

Loi de variation de la profondeur moyenne :

$$\lambda = 3,40e^{-0,06215x}$$

Largeur à l'embouchure : 68^m,60 ; au Sennegat : 60^m,5 (corrigée).

Loi de variation de largeur :

$$l = 68,60e^{-0,1044x}$$

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

$$\left[\frac{68,6}{68,6+2 \times 3,4} + \frac{60,5}{60,5+2 \times 3,16} \right] : 2 = (0,908+0,906) : 2 = 0,907.$$

Valeur moyenne du coefficient b :

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,908 \times 3,40} \right) = 0,395$$

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,906 \times 3,16} \right) = 0,403$$

Valeur moyenne : 0,796 : 2 = 0,398.

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$dz_m = \frac{0,398 \times 0,093 \times 5,49^2 \times e + 2 \times 0,0357x}{0,907 \times 3,4^{5/2} \times e^{-5/2} \times 0,06215x} dx$$

Relèvement total au Sennegat :

$$z_m = \frac{0,398 \times 0,093}{0,907 \times 0,10194} \times \frac{12,18}{21,38} \left(e^{0,10194 \times 1,177} - 1 \right) = 0^m,029.$$

B. Relèvement dû au débit d'amont :

Débit d'amont : 26^{m3}.

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\tau_a = \frac{0,398 \times 26^2 \times dx}{68,6^2 \times e^{-2 \times 0,1044x} \times 3,4^3 \times e^{-3} \times 0,06215x \times 0,907}$$

Relèvement total au Sennegat :

$$\tau_a = \frac{0,398}{0,907 \times 0,3952} \times \frac{676}{4720 \times 39,3} \left(e^{0,3952 \times 1,177} - 1 \right) = 0^m,024.$$

C. Relèvement dû à l'action combinée du débit d'amont de la marée :

Relèvement élémentaire :

$$d\tau_{ma} = \frac{0,398 \times 2 \times \sqrt{0,093} \times 5,49 \times e + 0,0357x \times 26}{0,907 \times 68,6 \times e^{-0,1044x} \times 3,4^{11/4} \times e^{-11/4} \times 0,06215x} dx.$$

Relèvement total au Sennegat :

$$\tau_{ma} = \frac{0,398 \times 2 \times \sqrt{0,093} \times 5,49 \times 26,0}{0,907 \times 0,1708} \times \frac{1}{68,6 \times 28,84} \left(e^{0,1708 \times 1,177} - 1 \right) = 0^m,025.$$

Relèvement total du niveau moyen de la rivière depuis son embouchure à Rumpst jusqu'au Sennegat :

$$z = z_m + z_a + z_{ma} = 0^m,029 + 0,024 + 0,025 = 0^m,078.$$

Le relèvement le plus exact constaté est de 0,11.

Vitesses de propagation de la marée.

La vitesse moyenne du courant de la marée à considérer est 0.485 mètre. (Voir recueil des documents relatifs à l'Escaut maritime.)

Embouchure à Rumpst :

Vitesse de propagation à marée haute :

$$W_{mh} = \left[\frac{1}{1 + \frac{0.70}{(1.655 + 3.49)^2}} \sqrt{9.81 (1.655 + 3.49)} + 0.8 \times 0.485 \right] \frac{1.655 + 3.49}{1.655 + 2 \times 3.49}$$

$W_{mh} = 4^m, 36.$

Vitesse de propagation à marée basse :

$$W_{mb} = \frac{1}{1 + \frac{0.70}{(1.655)^2}} \sqrt{9.81 \times 1.655 - 0.8 \times 0.485}$$

$W_{mb} = 2^m, 822.$

Sennegat.

Vitesse de propagation à marée haute :

$$W_{mh} = \left[\frac{1}{1 + \frac{0.70}{(1.34 + 3.64)^2}} \sqrt{9.81 (1.34 + 3.64)} + 0.8 \times 0.485 \right] \times \frac{1.34 + 3.64}{1.34 + 2 \times 3.64} = 4^m, 165.$$

Vitesse de propagation à marée basse :

$$W_{mb} = \frac{1}{1 + \frac{0.70}{(1.34)^2}} \sqrt{9.81 \times 1.34 - 0.8 \times 0.485} =$$

$W_{mb} = 2^m, 222.$

Tableau 41.

STATIONS.	Vitesse de propagation.		Vitesse moyenne de propagation.		Distance.	Temps de la propagation.		Heure de la marée calculée.		Heure moyenne de la marée observée en 1901-1910.	
	Marée haute	Marée basse	Marée haute	Marée basse		Marée haute	Marée basse	haute	basse	haute	basse
	m.	m.	m.	m.	m.						
Embouch. Rupel								3h.00'	3h. 35'	3h.0'0"	3h.35'0"
Rumpst	4.36	2.822	4.262	2.522	1177	4' 36"	7'46"	3h.40'37"	4h.36'44"	3 h.37"	4 h. 44'
Sennegat. . . .	4.165	2.222						3h.45'31"	4h.44'30"	3 h.40"	4 h. 5'

La concordance est très satisfaisante, surtout à marée haute, entre le résultat du calcul et celui de l'observation.

II. DEUXIÈME PARTIE.

SENNEGAT-RYMENAM.

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

Nous avons vu plus haut que la section d'équilibre à marée haute au Sennegat est 173^m2, et que le coefficient de variation de la profondeur *a* entre le Sennegat et l'écluse maritime à Malines est égal à 0,202. Ces données permettent de calculer les sections à marée haute d'égale vitesse depuis le Sennegat jusqu'à Malines. La section à Malines est notamment égale à :

$$\log \xi = 173,2 - \frac{0,688}{0,202} \left(\frac{1}{\sqrt{2,09}} - \frac{1}{\sqrt{3,16}} \right)$$

$$\log \xi = 2,23855 - 0,44 = 1,79855$$

$$\xi = 62,88^m2.$$

Pour la section à marée haute d'égale vitesse à Rymenam, il faut appliquer à partir de Malines le coefficient de variation de la profondeur *a* égal à :

$$a = \frac{2,09 - 1,20}{10,707} = 0,0841.$$

Section à Rymenam.

$$\log \xi = 1,79855 - \frac{0,688}{0,0841} \left(\frac{1}{\sqrt{1,2}} - \frac{1}{\sqrt{2,09}} \right)$$

$$\log \xi = 1,79855 - 1,812 = -0,01345$$

$$\xi = 0^m2, 9695.$$

Les sections obtenues ci-dessus sont notablement plus petites que celles qui existent réellement sur la rivière, soient : 109^m2 à Malines et 25^m2 à Rymenam. Cela provient de ce que, pour cette partie de la rivière, la vitesse moyenne générale du courant de marée ne reste pas constante, ce que l'on suppose dans les calculs ci-dessus. Si l'on voulait retrouver les sections existantes en se basant sur les vitesses moyennes générales du courant de marée, il faudrait connaître celles-ci, abstraction faite du débit d'amont. Or, ces éléments ne sont pas connus. Nous déterminerons donc les sections à marée haute réelles

en calculant les largeurs de la rivière correspondant aux amplitudes de la marée observée. Moyennant la connaissance de ces éléments, nous pourrions calculer le coefficient w' du terme supplémentaire à ajouter aux logarithmes des sections ci-dessus et ensuite les sections existant réellement.

§ 2. — Calcul des amplitudes de la marée et des sections réelles à marée haute.

Les documents relatifs à l'Escaut maritime donnent l'amplitude moyenne de la marée pendant la période 1888-1895 au pont Wincket à Malines et à Rymenam. Ils renseignent notamment à Malines (Pont Wincket) : 2^m,20 et à Rymenam : 0^m,70.

Ces données diffèrent notablement de celles fournies par les observations marégraphiques très précises qui ont été faites pendant la période 1901-1910. En effet, on a pour cette période : 2^m,75 à Malines (écluse maritime) et 0^m,58 à Rymenam.

Nous croyons que l'amplitude de 2^m,20 de la période 1888-1895, au pont Wincket à Malines, est entâchée d'erreurs, car elle a été relevée dans la traverse hydraulique de Malines qui comprenait, à l'époque considérée, une série de canaux latéraux dans lesquels la marée pouvait se répandre librement. Or, cette ramification de la marée devait provoquer un abaissement de l'onde marée. Cette distribution de la marée dans plusieurs bras ne s'est plus produite (ou seulement pendant de courtes périodes) durant la période 1901-1910. A cette époque, la Dyle coulait dans un bras unique et l'amplitude observée devait se rapprocher beaucoup de celle de la marée cheminant dans une rivière à lit unique. Nous estimons donc, que l'amplitude de 2^m,75 à Malines est celle qu'il faut considérer pour vérifier la loi de l'amplitude.

En ce qui concerne la station de Rymenam, il y a lieu de remarquer que l'amplitude de 0.70 a été obtenue par observation directe, qui est toujours un procédé incertain et peu précis, tandis que l'amplitude de 0^m,58 a été enregistrée par marégraphe qui donne certes le maximum de la précision. On doit donc attribuer plus de valeur au chiffre 0^m,58 qu'à celui de 0^m,70. C'est le premier que nous allons considérer dans nos calculs de vérification.

Section à marée haute au Sennegat : 173,2 m².

Largeur à mi-marée :

$$l \left(3,16 + \frac{3,64}{2} \right) = 173,2$$

$$l = 34,7 \text{ m.}$$

Écluse maritime de Malines :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0,125}{0,202} \left(\frac{1}{2,09} - \frac{1}{3,16} \right)} = \frac{1}{1 + 0,1} = 0,9075$$

$$2,75 = 0,9075 \times 3,64 \times \frac{3,16}{2,09} \sqrt{\frac{34,7}{l} \times \frac{62,88}{173,2}}$$

$$l = 41^m,50.$$

Section à marée haute :

$$41,50 \left(2,09 + \frac{2,75}{2} \right) = 144 \text{ m}^2.$$

Rymenam.

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,1 + \frac{0,125}{0,0841} \left(\frac{1}{1,2} - \frac{1}{2,09} \right)} = \frac{1}{1 + 0,6275} = 0,614$$

$$0,58 = 0,614 \times 3,64 \times \frac{3,16}{1,2} \sqrt{\frac{34,7}{l} \times \frac{0,9695}{173,2}}$$

$$l = 20^m.$$

Section à marée haute :

$$20 \left(1,20 + \frac{0,58}{2} \right) = 29,8 \text{ m}^2.$$

A Malines, la largeur et la section sont notablement plus grandes que celles qui existent réellement. En effet, la largeur n'y mesure que 33^m,4 et la section 109 mètres carrés. Il est fort probable que l'amplitude de 2^m,75 qui ne correspond qu'à une période d'observations de trois années, comprises entre 1901 et 1910, n'est pas tout à fait l'amplitude moyenne. D'autre part, il est possible que le bassin des canaux intérieurs de la ville de Malines, bien que soustrait à l'action permanente de la marée, continue à exercer une certaine influence sur l'amplitude de la marée, par suite de manœuvres exercées

aux barrages de la ville. Si on calcule l'amplitude théorique qui correspond à la largeur existante, on obtient :

$$h = 0,9075 \times 3,64 \times \frac{3,16}{2,09} \sqrt{\frac{34,7}{33,4} \times \frac{62,88}{173,2}}$$

$$h = 3^m 06.$$

et pour la section à marée haute :

$$33,4 \left(2,09 + \frac{3,06}{2} \right) = 120^m 2,9,$$

soit sensiblement la section existante de 115 mètres carrés. C'est avec la largeur de 33^m,4 et la section de 120^m2,9 que nous avons tracé le diagramme des sections (planche V). A Rymenam, la largeur obtenue par calcul est plus grande que celle existant réellement, soit : 16^m2,2. Mais comme la profondeur admise est plus petite que celle qui existe, la section à marée haute est sensiblement égale à celle qu'on relève réellement dans la rivière, soit : 29^m2,8 au lieu de 25^m2,2.

En admettant à Malines et à Rymenam les sections à marée haute de 120^m2,9 et de 29^m2,8 respectivement, le calcul des sections définitives sur la rivière peut se faire de la manière suivante.

Section Sennegat-Malines. — Le coefficient w' du terme supplémentaire à ajouter aux sections d'égale vitesse est donné par la relation :

$$\log 120,9 - \log 62,88 = \log \left(\frac{1}{1-w' \times 5,309} \right)^2$$

$$w' = 0,0524.$$

Section Malines-Rymenam. — Nouvelle section à marée haute d'égale vitesse à Malines : 120^m2,9.

Nouvelle section à marée haute d'égale vitesse à Rymenam.

$$\log \epsilon = \log 120,9 - 1,812$$

$$\log \epsilon = 2,08243 - 1,812 = 0,27043$$

$$\epsilon = 1,864 \text{ m}^2.$$

Valeur du coefficient w'

$$\log 29,8 - \log 1,864 = \log \left(\frac{1}{1-w' \times 10,707} \right)^2$$

$$w' = 0,0701.$$

Quand on examine à la planche II (voir fascicule n° 1) la courbe des sections à marée haute théoriques et le diagramme des sections existant réellement, on voit qu'il y a une concordance très grande entre les deux tracés.

§ 3. — Vérification de la loi du débit et des vitesses moyennes des courants de flot et de jusant.

Par suite d'une donnée inexacte pour l'amplitude de la marée à Malines, et de l'absence de tous renseignements pour les débits et les vitesses à Rymenam, il est impossible de procéder à une vérification de la loi du débit et des formules des vitesses du courant de marée. Nous sommes donc obligés de nous rapporter ici aux autres rivières du bassin maritime de l'Escaut pour nous rendre compte de la valeur pratique des lois et formules que nous avons établies dans la théorie des marées fluviales.

§ 4. — Relèvement du niveau moyen de la rivière.

I. — PARTIE COMPRISE ENTRE SENNEGAT ET MALINES.

A. — Relèvement dû au phénomène de la marée.

Amplitude de la marée au Sennegat : 3,64; à Malines : 3,06 (théorique).

Loi de variation de l'amplitude :

$$h = 3^m,64 e^{-0,0327x}.$$

Profondeur moyenne à mi-marée au Sennegat : 3^m.16; à Malines : 2^m.09.

Loi de variation de la profondeur moyenne :

$$\lambda = 3,16 e^{-0,0778x}.$$

Largeur au Sennegat : 34^m,7; à Malines : 33^m,4.

Loi de variation de la largeur :

$$l = 34,7 e^{-0,00723x}.$$

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

$$\left[\frac{34,7}{34,7 + 2 \times 3,16} + \frac{33,4}{33,4 + 2 \times 2,09} \right] : 2 = (0,845 + 0,889) : 2 = 0,867.$$

Valeur moyenne du coefficient b :

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,845 \times 3,16} \right) = 0,412$$

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,889 \times 2,09} \right) = 0,468$$

$$\text{Valeur moyenne : } \quad \quad \quad 0,880 : 2 = 0,440.$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\zeta_m = \frac{0,44 \times 0,093 \times 3,64^2 \times e^{-2 \times 0,0327x}}{0,867 \times 3,16^{5/2} \times e^{-5/2} \times 0,0778x} dx.$$

Relèvement total à Malines :

$$\zeta_m = \frac{0,44 \times 0,093}{0,867 \times 0,1296} \times \frac{13,25}{17,78} \left(e^{0,1296 \times 5,309} - 1 \right) = 0^m,264.$$

B. — Relèvement dû au débit d'amont.

Débit d'amont au Sennegeat: 17^m^3 ; à Malines: 16^m^3 .

Loi de variation du débit d'amont :

$$q = 17 e^{-0,01142x}.$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$dz_a = \frac{0,44 \times 17^2 \times e^{-2 \times 0,01142x} \times dx}{0,867 \times 34,7^2 \times e^{-2 \times 0,00723x} \times 3,16^3 \times e^{-3 \times 0,0778x}}.$$

Relèvement total à Malines :

$$\zeta_a = \frac{0,44}{0,867 \times 0,225} \times \frac{289}{1205 \times 31,55} \left(e^{0,225 \times 5,309} - 1 \right) = 0^m,04.$$

C. — Relèvement dû à l'action combinée du débit d'amont et de la marée.

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\zeta_{ma} = \frac{0,44 \times 2 \times \sqrt{0,093} \times 3,64 \times e^{-0,0327x} \times 17 \times e^{-0,01142x}}{0,867 \times 34,7 \times e^{-0,00723x} \times 3,16^{11/4} \times e^{-11/4} \times 0,0778x} dx.$$

Relèvement total à Malines :

$$\zeta_{ma} = \frac{0,44 \times 2 \times \sqrt{0,093}}{0,867 \times 0,1771} \times \frac{3,64 \times 17}{34,7 \times 23,77} \left(e^{0,1771 \times 5,309} - 1 \right)$$

$$\zeta_{ma} = 0^m,205.$$

Relèvement total du niveau moyen de la rivière depuis Sennegeat jusqu'à Malines :

$$\zeta = \zeta_m + \zeta_a + \zeta_{ma} = 0^m,264 + 0,04 + 0,205 = 0^m,509.$$

II. — PARTIE COMPRISE ENTRE MALINES ET RYMENAM.

A. — Relèvement dû à la marée.

Amplitude de la marée à Malines : $3^m,06$ (théorique) :

à Rymenam : $0^m,58$.

Loi de variation de l'amplitude :

$$h = 3,06 e^{-0,1536x}.$$

Largeur à Malines : $33^m,4$; à Rymenam : 20 mètres.

Loi de variation de la largeur :

$$l = 33,4 e^{-0,0477x}.$$

Profondeur moyenne à mi-marée à Malines : $2^m,09$; à Rymenam : $1^m,20$

Loi de variation de la profondeur moyenne :

$$\lambda = 2,09 e^{-0,0518x}.$$

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

$$\left[\frac{33,4}{33,4 + 2 \times 2,09} + \frac{20}{20 + 2 \times 1,2} \right] : 2 = \left(0,889 + 0,892 \right) : 2 = 0,8905$$

Valeur moyenne du coefficient b :

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,5}{0,889 \times 2,09} \right) = 0,468$$

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,892 \times 1,20} \right) = 0,607$$

$$\text{Valeur moyenne : } \quad \quad \quad 1,075 : 2 = 0,538.$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\zeta_m = \frac{0,538 \times 0,093 \times 3,16^2 \times e^{-2 \times 0,1536x}}{0,8905 \times 2,09^{5/2} \times e^{-5/2} \times 0,0518x} dx.$$

Relèvement total à Rymenam :

$$\zeta_m = \frac{0,538 \times 0,093}{0,891 \times 0,4814} \times \frac{9,36}{6,295} \left(1 - e^{-0,1814 \times 10,707} \right) = 0^m,395.$$

B. — Relèvement dû au débit d'amont.

Débit d'amont à Malines : 16 mètres cubes; à Rymenam : 15 mètres cubes.

Loi de variation du débit d'amont :

$$q = 16 e^{-0,00588x}$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$dz_a = \frac{0,538 \times 16^2 \times e^{-2 \times 0,00588x} \times dx}{53,4^2 \times e^{-2 \times 0,0477x} \times 2,09^3 \times e^{-3 \times 0,0518x} \times 0,8905}$$

Relèvement total à Rijmenam :

$$z_a = \frac{0,538}{0,8905 \times 0,259} \times \frac{256}{1117 \times 9,13} \left(e^{0,239 \times 10,707} - 1 \right)$$

$$z_a = 0^m,77.$$

C. — Relèvement dû à l'action combinée du débit d'amont et de la marée.

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$dz_{ma} = \frac{0,538 \times 2 \times \sqrt{0,095} \times 3,06 \times e^{-0,1556x} \times 16 \times e^{-0,00588x}}{0,8905 \times 53,4 \times e^{-0,0477x} \times 2,09^{11/4} \times e^{-11/4 \times 0,0518x}} \times dx.$$

Relèvement total à Rymenam :

$$\begin{aligned} \tilde{z}_{ma} &= \frac{0,538 \times 2 \times \sqrt{0,095}}{0,8905 \times 0,029} \times \frac{3,06 \times 16}{53,4 \times 7,585} \left(e^{0,029 \times 10,707} - 1 \right) = \\ &= 0,885 \text{ m.} \end{aligned}$$

Relèvement total du niveau moyen depuis Malines jusqu'à Rymenam :

$$\tilde{z} = \tilde{z}_m + \tilde{z}_a + \tilde{z}_{ma} = 0^m,595 + 0,77 + 0,885 = 2^m,05.$$

Tableau 42. — Tableau récapitulatif des relèvements totaux du niveau de la mi-marée et des cotes de niveau calculées et observées pour la mi-marée.

Stations.	Relèvements calculés		Cotes de niveau de la mi-marée pour la période 1901-1910 (1).	
	partiels.	totaux.	calculées.	observées.
Embouchure Rupel.	Mètres. 0.305	Mètres. 0.305	Mètres. 2.58	Mètres. 2.58
Rumpst	0.078	0.305	2.885	2.95
Sennegat	0.509	0.383	2.963	
Malines	2.05	0.892	3.472	3.62
Rymenam		2.942	5.522	5.62

Il résulte du tableau ci-dessus que la concordance est très grande entre les résultats du calcul et ceux de l'observation.

§ 5. — Vitesses de propagation de la marée fluviale.

Les vitesses moyennes générales du courant de marée à considérer au Sennegat sont : 0^m.485, à Malines : 0^m.38, à Rymenam : 0^m.648.

Sennegat. (Voir calculs plus haut.)

Vitesse de propagation à marée haute : 4^m.165.

Vitesse de propagation à marée basse : 2^m.222.

Malines :

Vitesse de propagation à marée haute :

$$W_{mh} = \left[\frac{1}{1 + \frac{0,70}{(0,56 + 3,06)^2}} \sqrt{9,81 (0,56 + 3,06)} + 0,8 \times 0,58 \right] \frac{0,56 + 3,06}{0,56 + 2 \times 3,06}$$

$$W_{mh} = 5,22 \text{ m.}$$

(1) Nous comparons les cotes de mi-marée calculées aux cotes observées pendant la période de 1901-1910 parce que ce sont celles-là qui ont été relevées avec le plus de précision surtout dans la partie amont de la rivière.

Vitesse de propagation à marée basse :

$$W_{mb} = \frac{1}{1 + \frac{0,70}{(0,56)^2}} \sqrt{9,81 \times 0,56 - 0,8 \times 0,58} = 0^m,421.$$

Rymenam :

Vitesse de propagation à marée haute :

$$W_{mh} = \left[\frac{1}{1 + \frac{0,70}{(0,91 + 0,58)^2}} \sqrt{9,81 (0,91 + 0,58)} + 0,8 \times 0,648 \right] \frac{0,91 + 0,58}{0,91 + 2 \times 0,58}$$

$$W_{mh} = 2,47 \text{ m.}$$

Vitesse de propagation à marée basse :

$$W_{mb} = \frac{1}{1 + \frac{0,70}{(0,91)^2}} \sqrt{9,81 \times 0,91 - 0,8 \times 0,648} = 1^m,102$$

Tableau 43.

Stations.	Vitesse de propagation.		Vitesse moyenne de propagation.		Distances.	Temps de la propagation.		Heure de la marée calculée.		Heure moyenne de la marée observée en 1901-1910.	
	Marée haute.	Marée basse.	Marée haute.	Marée basse.		Marée haute.	Marée basse.	Marée haute.	Marée basse.	Marée haute.	Marée basse.
Embouchure	—	—	—	—	—	—	—	3 h. 0	3 h. 35'	3 h. 0'	3 h. 35'
Rupel	—	—	—	—	—	—	—	3 h. 40'37"	4 h. 36'44"	3 h. 37'	4 h. 41'
Rumpst	—	—	—	—	—	—	—	3 h. 45'13"	4 h. 44'30"	3 h. 40'	4 h. 52'
Sennegat	4,165	2,222	3,693	1,322	5309	23'54"	1 h. 7'	4 h. 9' 7"	5 h. 51'30"	3 h. 59'	5 h. 40'
Malines	3,22	0,421	2,845	0,761	10,707	1h.2'40"	3 h. 54'30"	5 h. 11'47"	9 h. 46'	4 h. 49'	8 h. 51'
Rijmenam	2,47	1,102	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Nous analyserons les résultats obtenus dans le chapitre XI, paragraphe des vitesses de propagation.

CHAPITRE X.

SENNE.

Le profil en long des profondeurs moyennes est conforme au croquis ci-dessous.

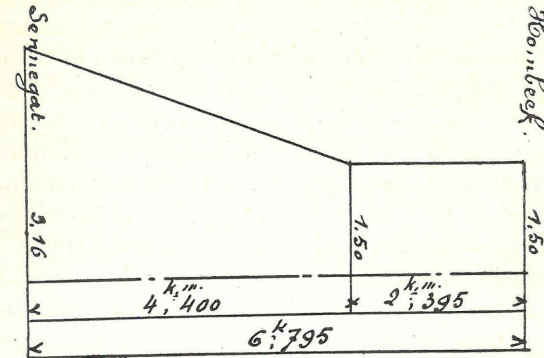


Fig. 26.

Nous avons établi plus haut que la section d'équilibre à l'embouchure de la Senne mesure 128^m2,6, ayant pour logarithme 2.10924, et que l'amplitude théorique est 3^m,64. Ces éléments correspondent à une largeur à mi-marée égale à :

$$l \left(3,16 + \frac{3,64}{2} \right) = 128,6.$$

$$l = 25,8 \text{ m.}$$

Moyennant la connaissance de ces éléments, nous pouvons calculer les sections et les largeurs aux différents points de la rivière.

§ 1. — Sections à marée haute et largeurs à mi-marée.

Section à marée haute d'égale vitesse au point situé à 4 k. 4 de Sennegat.

$$a = \frac{3,16 - 1,50}{4,4} = 0,377.$$

$$\log \ell = 2,10924 - \frac{0,688}{0,377} \left(\frac{1}{\sqrt{1,5}} - \frac{1}{\sqrt{3,16}} \right)$$

$$\log \ell = 2,10924 - 0,464 = 1,64524$$

$$\ell = 44^m3,18.$$

Section à marée haute d'égale vitesse à Hombeek.

$$1,5^{3/2} = 1,838$$

$$\log \epsilon = 1,64524 - 0,344 \times \frac{2,395}{1,838}$$

$$\log \epsilon = 1,64524 - 0,448 = 1,19724$$

$$\epsilon = 15^{m^2},75.$$

Les sections ci-dessus sont beaucoup plus petites que celles qui existent réellement parce que nous nous trouvons en présence d'une rivière où la vitesse moyenne générale du courant de marée suit une loi décroissante. Les données sur la marée moyenne, étudiée par M. l'Ingénieur en chef Directeur Van Brabant, ne donnent pas des indications précises quant aux valeurs des vitesses, abstraction faite du débit d'amont. Nous sommes donc obligé, comme dans les autres cas semblables du bassin maritime du Rupel, de déterminer la largeur théorique de la rivière à Hombeek qui correspond à l'amplitude observée en ce point; puis en déduire la valeur du coefficient w' qui figure dans le terme supplémentaire à ajouter aux logarithmes des sections d'égale vitesse trouvés ci-dessus.

L'amplitude moyenne durant la période 1901-1910, qui est celle des observations marégraphiques les plus rapprochées de l'époque du levé des profils en travers de la rivière dont nous nous servons dans nos études, mesure $1^m,84$.

La valeur du coefficient de réduction φ est égale à :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0,125}{0,377} \left(\frac{1}{1,5} - \frac{1}{3,16} \right) + \frac{0,125 \times 2,395}{1,5^2}} = \frac{1}{1 + 0,116 + 0,155} = 0,8$$

La largeur théorique de la rivière à Hombeek est donnée par la relation :

$$1,84 = 0,8 \times 3,64 \times \frac{3,16}{1,5} \sqrt{\frac{15,75}{128,6} \times \frac{25,8}{l}}$$

$$l = 35^m,05$$

Section à marée haute à Hombeek.

$$\epsilon = 55,05 \left(1,5 + \frac{1,84}{2} \right) = 84^{m^2},7.$$

La largeur et la section à marée haute trouvées ci-dessus sont sensiblement les mêmes que celles qui existent en réalité, soient : $33^m,2$ pour la largeur et 90 mètres carrés pour la section à marée haute. La valeur du coefficient w' correspondant aux résultats obtenus ci-dessus est égale à :

$$\log 84,7 - \log 15,75 = \log \left(\frac{1}{1 - w' \times 6,795} \right)^2$$

$$w' = 0,0837.$$

§ 2. — Débits et vitesses des courants de marée.

Par suite de l'absence de tous renseignements relatifs aux débits de flot et de jusant, il est impossible de vérifier la loi du débit ou les formules donnant les vitesses moyennes de flot et de jusant.

§ 3. — Relèvement du niveau moyen de la rivière.

I. — PARTIE COMPRISE ENTRE SENNEGAT ET UN POINT PRIS A 4,4 KILOMÈTRES EN AMONT.

A. Relèvement dû au phénomène de la marée.

Amplitude de la marée au Sennegat : $3^m,64$;

A Hombeek : $1^m,84$;

Loi de variation de l'amplitude :

$$h = 3,64 e^{-0,1004x}$$

Amplitude à 4,4 km. en amont du Sennegat :

$$h = 3,64 e^{-0,1004 \times 4,4} = 2^m,34.$$

Profondeur moyenne à mi-marée au Sennegat : $3^m,16$;

à 4,4 km. en amont : $1^m,50$.

Loi de variation de la profondeur moyenne :

$$\lambda = 3,16 e^{-0,1096x}$$

Largeur au Sennegat : $25^m,8$; à Hombeek : $35^m,05$.

Loi de variation de la largeur :

$$l = 25,8 e + 0,0452x$$

Largeur à 4,4 km. en amont du Sennegat :

$$l = 25,8 e + 0,0452 \times 4,4 = 31^m,4.$$

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

$$\left[\frac{25,8}{25,8 + 2 \times 3,16} + \frac{31,4}{31,4 + 2 \times 1,5} \right] : 2 = (0,803 + 0,915) : 2 = 0,858.$$

Valeur moyenne du coefficient b :

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,803 \times 3,16} \right) = 0,418$$

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,915 \times 1,5} \right) = 0,536$$

$$\text{Valeur moyenne : } \frac{0,954}{2} = 0,477.$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\zeta_m = \frac{0,477 \times 0,095 \times 3,64^2 \times e^{-2 \times 0,1004x}}{0,858 \times 3,16^{5,2} \times e^{-5/2 \times 0,1096x}} dx.$$

Relèvement total à 4,4 km. en amont du Sennegat :

$$\zeta_m = \frac{0,477 \times 0,095}{0,858 \times 0,073} \times \frac{15,25}{17,78} \left(e^{0,073 \times 4,4} - 1 \right)$$

$$\zeta_m = 0^m,199.$$

B. *Relèvement dû au débit d'amont.*

Débit d'amont constant : 9 m³.

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\zeta_a = \frac{0,477 \times 9^2}{0,858 \times 25,80^2 \times e^{+2 \times 0,0452x} \times 3,16^3 \times e^{-3 \times 0,1096x}} dx$$

Relèvement total à 4,4 km. en amont du Sennegat :

$$\zeta_a = \frac{0,477}{0,858 \times 0,2384} \times \frac{81}{666 \times 31,55} \left(e^{0,2384 \times 4,4} - 1 \right) = 0^m,017.$$

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

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\zeta_{ma} = \frac{0,477 \times 2 \times \sqrt{0,095} \times 3,64 \times e^{-0,1004x} \times 9 \times dx}{0,858 \times 25,6 \times e^{+0,0452x} \times 3,16^{11/4} \times e^{-11/4 \times 0,1096x}}$$

Relèvement total à 4,4 km. en amont du Sennegat :

$$\zeta_{ma} = \frac{0,477 \times 2 \times \sqrt{0,095}}{0,858 \times 0,1554} \times \frac{3,64 \times 9}{25,8 \times 25,77} \left(e^{0,1554 \times 4,4} - 1 \right) = 0^m,115.$$

Relèvement total général à 4,4 km. en amont du Sennegat :

$$\zeta = \zeta_m + \zeta_a + \zeta_{ma} = 0^m,199 + 0,017 + 0,115 = 0^m,331.$$

II. — PARTIE COMPRISE ENTRE UN POINT PRIS A 4,4 KM. EN AMONT DU SENNEGAT ET HOMBEEK.

A. — *Relèvement dû au phénomène de la marée.*

Amplitude de la marée à 4,4 km. en amont du Sennegat : 2^m,34; à Hombeek : 1^m,84.

Loi de variation de l'amplitude :

$$h = 2,34 e^{-0,1004x}.$$

Profondeur moyenne à mi-marée constante égale à 1^m,50.

Largeur à 4,4 km. en amont du Sennegat : 31^m,4; à Hombeek : 35^m,05.

Loi de variation de la largeur :

$$l = 31,4 e^{+0,0452x}.$$

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

$$\left[\frac{31,4}{31,4 + 2 \times 1,50} + \frac{35,05}{35,05 + 2 \times 1,5} \right] : 2 = (0,915 + 0,921) : 2 = 0,917.$$

Valeur moyenne du coefficient b :

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,913 \times 1,5} \right) = 0,536$$

$$b = 0,28 \left(1 + \frac{1,25}{0,921 \times 1,5} \right) = 0,534$$

$$\text{Valeur moyenne : } \frac{1,070}{2} = 0,535.$$

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\zeta_m = \frac{0,535 \times 0,095 \times 2,34^2 \times e^{-2 \times 0,1004x}}{0,917 \times 1,5^{5,2}} dx.$$

Relèvement total à Hombeek :

$$\zeta_m = \frac{0,535 \times 0,095}{0,917 \times 0,2008} \times \frac{5,47}{2,755} \left(1 - e^{-0,2008 \times 2,395} \right)$$

$$\zeta_m = 0^m,197.$$

B. — *Relèvement dû au débit d'amont :*

Débit d'amont constant : 9m³.

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$dz_a = \frac{0,535 \times 9^2}{0,917 \times 1,5^3 \times 31,4^2 \times e + 2 \times 0,0452x} dx.$$

Relèvement total à Hombeek :

$$z_a = \frac{0,535}{0,917 \times 0,0904} \times \frac{81}{985 \times 3,375} \left(1 - e^{-0,0904 \times 2,395} \right)$$

$$z_a = 0,031 \text{ m.}$$

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

Relèvement élémentaire du niveau moyen :

$$d\zeta_{ma} = \frac{0,535 \times 2 \times \sqrt{0,093} \times 2,34 \times e^{-0,4004x} \times 9}{0,917 \times 31,4 \times e + 0,0452x \times 1,5^{11/4}} dx.$$

Relèvement total à Hombeek :

$$\zeta_{ma} = \frac{0,535 \times 2 \times \sqrt{0,093}}{0,917 \times 0,0552} \times \frac{2,34 \times 9}{31,4 \times 3,041} \left(1 - e^{-0,0552 \times 2,395} \right)$$

$$\zeta_{ma} = 0,176 \text{ m.}$$

Relèvement total général pour la section considérée :

$$z = \zeta_m + \zeta_a + \zeta_{ma} = 0^m,197 + 0,031 + 0,176 = 0^m,404.$$

Relèvement total du niveau moyen depuis Sennegat jusqu'à Hombeek :

$$\zeta = 0^m,331 + 0,404 = 0^m,735.$$

Le relèvement obtenu ci-dessus par calcul est beaucoup plus faible que celui qui est observé et qui est d'environ 1 m. La différence peut difficilement être expliquée autrement que par l'incertitude dans laquelle nous nous trouvons quant à la variation exacte de l'amplitude de la marée et de la profondeur moyenne à mi-marée depuis le Sennegat jusqu'à Hombeek. D'autre part, la variation rapide de l'amplitude de la marée et celle encore plus rapide de la profondeur moyenne à mi-marée, peuvent occasionner des mouvements perturbateurs dont nous n'avons pas tenu compte dans l'établissement de notre théorie des marées fluviales et qui peuvent être cause du relèvement considérable du niveau de mi-marée. Cela est d'autant plus probable que pour la partie de la Dyle, comprise entre Rumpst et Malines, qui a sensiblement la même longueur que la Senne entre le Sennegat et Hombeek et où les sections ont sensiblement la même grandeur sur une bonne partie du parcours, le

relèvement du niveau moyen n'est, d'après les observations marégraphiques, que de 0^m,67 au lieu de 1 mètre sur la Senne. Nous croyons donc que le relèvement calculé correspond bien à une propagation normale de l'onde marée, et si différence il y a entre le résultat du calcul et celui de l'observation, elle doit être attribuée à des écoulements d'eau secondaires, engendrés par une variation trop brusque de l'amplitude de la marée et de la profondeur moyenne à mi-marée. A moins toutefois qu'une erreur existe dans le repérage de l'échelle de marée de Hombeek, ce qui serait à vérifier; ou bien encore dans le débit d'amont.

§ 4. — Vitesses de propagation de la marée fluviale.

Il nous reste encore à calculer la vitesse de propagation de la marée. Les vitesses moyennes générales du courant de marée à considérer sont : Sennegat : 0.485; 4.4 km. en amont du Sennegat : 0.263; à Hombeek : 0.142.

SENNEGAT.

Vitesse de propagation à marée haute :

$$W_{mh} = \left[\frac{1}{1 + \frac{0,70}{(1,34 + 3,64)^2}} \sqrt{9,81 (1,34 + 3,64)} + 0,8 \times 0,485 \right] \frac{1,34 + 3,64}{1,34 + 2 \times 3,64}$$

$$W_{mh} = 4,165 \text{ m.}$$

Vitesse de propagation à marée basse :

$$W_{mb} = \frac{1}{1 + \frac{0,70}{(1,54)^2}} \sqrt{9,81 \times 1,54 - 0,8 \times 0,485} = 2^m,222.$$

4,4 KM. EN AMONT DU SENNEGAT.

Vitesse de propagation à marée haute :

$$W_{mh} = \left[\frac{1}{1 + \frac{0,70}{(0,33 + 2,34)^2}} \sqrt{9,81 (0,33 + 2,34)} + 0,8 \times 0,263 \right] \frac{0,33 + 2,34}{0,33 + 2 \times 2,34}$$

$$W_{mh} = 2,61 \text{ m.}$$

Vitesse de propagation à marée basse :

$$W_{mb} = \frac{1}{1 + \frac{0,70}{(0,53)^2}} \sqrt{9,81 \times 0,53 - 0,8 \times 0,263} = 0^m,027.$$

HOMBEEK.

Vitesse de propagation à marée haute :

$$W_{mh} = \left[\frac{1}{1 + \frac{0,70}{(0,58 + 1,84)^2}} \sqrt{9,81 \times (0,58 + 1,84)} + 0,8 \times 0,142 \right] \frac{0,58 + 1,84}{0,58 + 2 \times 1,84}$$

$$W_{mh} = 2^m,55.$$

Vitesse de propagation à marée basse :

$$W_{mb} = \frac{1}{1 + \frac{0,70}{(0,58)^2}} \sqrt{9,81 \times 0,58 - 0,8 \times 0,142} = 0^m,662.$$

Tableau 44.

Stations.	Vitesse de propagation.		Vitesse moyenne de propagation.		Distances	Durée de la propagation à	
	Marée haute.	Marée basse.	Marée haute.	Marée basse.		Marée haute.	Marée basse.
Sennegat . .	m. 4,165	m. 2,222	m. 3,388	m. 1,125	4400	21'40"	1 ^h . 5'10"
4,4 km. amont Sennegat. .	2,61	0,027	2,580	0,345	2395	15'27"	1 ^h . 55'35"
Hombeek . .	2,55	0,662	Durée totale à Hombeek.			37'7"	3 ^h . 00'45"

La durée réelle de la propagation pour la marée haute est 23 minutes et pour la marée basse 2 h. 06.

CHAPITRE XI.

CONSIDÉRATIONS PARTICULIÈRES SUR LES RIVIÈRES
DU BASSIN MARITIME DU RUPEL.

Vitesses de propagation. — Quand on analyse l'ensemble des résultats obtenus par les formules théoriques, on constate que si ceux-ci concordent en certains points d'une manière très satisfaisante avec les résultats de l'observation, ils s'en écartent notablement en d'autres points.

Pour le Rupel, la théorie et l'observation sont sensiblement d'accord. Il n'y a qu'un écart à Rumpst d'environ 3 minutes et demie pour la marée haute et de 7 minutes pour la marée basse; l'heure de marée haute théorique est en retard sur celle de l'observation et celle de marée basse théorique est en avance.

Pour la Nèthe Inférieure, d'une longueur de plus de 16 kilomètres, la durée de propagation théorique de la marée haute dépasse d'environ 13 minutes la durée réelle de propagation et la durée de propagation théorique de la marée basse reste inférieure à la durée réelle d'environ 12 minutes. Ces résultats peuvent être considérés comme satisfaisants pour les besoins de la pratique. Mais il n'en est plus de même quand on passe à la Grande Nèthe et la Petite Nèthe. Là, on n'a de concordance satisfaisante que pour la durée de propagation de la marée haute de la Grande Nèthe : la théorie donne 42'40" et l'observation 49'. Pour les autres caractéristiques on a des écarts notables. Mais il faut remarquer que l'observation donne des résultats très bizarres. Ainsi la durée de propagation de la marée basse entre le confluent et Boeckt, parcours 6 km. 866 et profondeur moyenne 1^m,50, est de 2 h. 18', tandis qu'elle n'est que de 1 h. 24' pour la Petite Nèthe : parcours 4 km. 740; profondeur moyenne environ 1^m,50. Pour la marée haute de la Petite Nèthe, la durée de propagation d'observation n'est que de 12', alors qu'elle est de 49' dans la Grande Nèthe.

Les grands écarts qu'on constate pour ces deux rivières peuvent difficilement s'expliquer autrement que par les perturbations qu'introduit, dans le mouvement ondulatoire de la marée, l'écoulement des débits d'amont, qui ont notamment pour effet de faire disparaître pour un grand nombre de marées les courbes régulières locales de la marée à Boeckt et à

Emblehem, de sorte qu'il y est difficile de déterminer avec exactitude les instants précis de la marée haute et de la marée basse.

La Dyle ne donne aucune concordance parfaite entre la théorie et l'observation, mais non plus pas des résultats qui soient incompatibles avec les besoins de la pratique. C'est la Senne qui donne les plus mauvais résultats. Mais il est à remarquer qu'il y a une certaine incertitude quant à la profondeur moyenne; d'autre part, le tronçon de rivière considéré est peu important, la marée n'y est pas très puissante et les débits d'amont bouleversent à certaines époques le régime maritime de la rivière.

En résumé on peut dire que les formules théoriques des vitesses de propagation donnent pour le bassin maritime du Rupel des résultats tout aussi satisfaisants que pour l'Escaut maritime; dans ces conditions, elles peuvent rendre de signalés services dans toute étude d'amélioration d'une rivière maritime.

SITUATION DU RÉGIME DES RIVIÈRES

Le bassin maritime du Rupel constitue un exemple typique de la formation d'un réseau fluvial maritime par la seule intervention des forces brutales de la nature, sans programme arrêté. En faisant engager l'onde marée fluviale dans le Rupel, la nature n'a eu qu'une chose en vue : c'est d'amortir l'énorme quantité d'énergie que cette onde possède. Elle l'a fait d'une façon bien simple, en éparpillant l'onde marée dans une série de rivières peu profondes, telles que la Nèthe Inférieure et plus tard la Grande et la Petite Nèthe, la Dyle et la Senne. Ce procédé respecte en tous points les lois de l'hydrodynamique, mais ne s'occupe guère des besoins de la société et en particulier de ceux de la navigation. Or, la navigation, surtout la navigation moderne, demande des rivières profondes, navigables par tout état de marée. Si on veut réaliser cela, il faut être plus parcimonieux dans la distribution des ondes dérivées. A ce point de vue, il est certain que si un ingénieur de notre époque avait présidé à la formation du bassin maritime du Rupel, il aurait concentré l'onde marée fluviale dans une ou deux rivières, de manière à obtenir des voies d'eau larges et profondes pouvant donner passage aux bateaux par

tout état de marée. Il aurait, par exemple, choisi la Nèthe Inférieure (prolongée par la Petite Nèthe) et la Dyle, ou mieux encore, la Dyle prolongée par le Démer.

En concentrant la marée fluviale dans le Rupel, la Dyle et le Démer et en modifiant le calibrage de l'Escaut entre la Durme et Hemixem, de manière à réaliser devant le Rupel une profondeur moyenne à mi-marée de 8 mètres au lieu de 5^m,40, on peut aménager le Rupel, la Dyle et le Démer, de manière à placer la limite de la partie maritime dans le voisinage de Diest. Cette voie fluviale maritime aurait jusque Malines une profondeur de plus de 6 mètres sous basse mer et à Malines une largeur d'environ 90 mètres. Malines deviendrait un port de mer capable de recevoir par tout état de marée des cargo-boats d'environ 5 mètres de tirant. Au-delà de Malines jusqu'à Diest, la navigation serait assurée pour des bateaux de 2.000 tonnes. Par l'exécution de ce projet on pourrait donc, au moyen d'une voie d'eau large et puissante, ne comportant aucune écluse, arriver aux portes du bassin houiller de la Campine et se rapprocher considérablement du Centre industriel de Liège. Le projet esquissé ci-dessus est très vaste et exige l'exécution de travaux importants et coûteux. Il faudrait donc l'étudier de très près et le comparer à la construction de canaux avant d'en décréter l'exécution. Mais ce qui est peu avantageux aujourd'hui peut devenir une nécessité demain. C'est dans cet esprit que j'ai indiqué la solution ci-dessus. Ce n'est d'ailleurs pas la seule, il y en a une foule d'autres, ce qui nous permet de dire que les rivières du bassin maritime du Rupel sont susceptibles de recevoir de sérieuses améliorations et de répondre en tous points aux besoins de la navigation moderne.

(A suivre.)