

	Pages
liégeoise. Note de M. LAMBERMONT, Ingénieur des Ponts et Chaussées. — La standardisation des tuyauteries et appareils de distributions d'eau	855
CANADA. — La taxe des véhicules automobiles	866
ÉGYPTE. — Le canal de Suez en 1921.	867
FRANCE. — Ville de Paris. Transport en commun. Concours. — L'extension du port de Marseille par l'aménagement de l'étang de Caronte. — L'activité du port de Rouen en 1921. — Le canal de Montbéliard à la Haute-Saône. — Trafic des ports de Calais et de Dieppe en 1921	869
ITALIE. — Gazogène en béton armé, type Verity, pour la gazéification du lignite	872
DIVERS. — Ascenseur à sas submersible pour bateaux. — Nouveau type de joint pour conduite en béton armé. — Pelle mécanique rotative, système Clère, pour les travaux de manutention et de terrassement.	873

Comptes Rendus :

BELGIQUE. — <i>Moniteur belge</i> . — Transport de l'huile de pétrole, du naphte et des autres hydrocarbures sur les rivières et canaux administrés par l'État	877
FRANCE. — La Conférence internationale des grands réseaux de transport d'énergie électrique à très haute tension. Note de M. LASSALLE, ff. d'ingénieur en chef, Directeur des Ponts et Chaussées de Belgique	878

Bibliographie :

L'alimentation de l'Agglomération bruxelloise et de la Basse Belgique en eau potable, par E. WALIS, Directeur général des Ponts et Chaussées de Belgique, et A. DEBLON, Ingénieur en chef honoraire de l'Intercommunale bruxelloise des Eaux. — L'annuaire hydrographique de la Suisse pour 1922	903
--	-----

VUES HORS TEXTE :

Les nouvelles écluses de la Meuse namuroise et liégeoise.

PLANCHES XIV à XVI et XVIII à XIX

MÉMOIRES

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE THÉORIQUE

DES

FLEUVES A MARÉE

ET

APPLICATION AUX RIVIÈRES A MARÉE

DU

BASSIN DE L'ESCAUT MARITIME

PAR

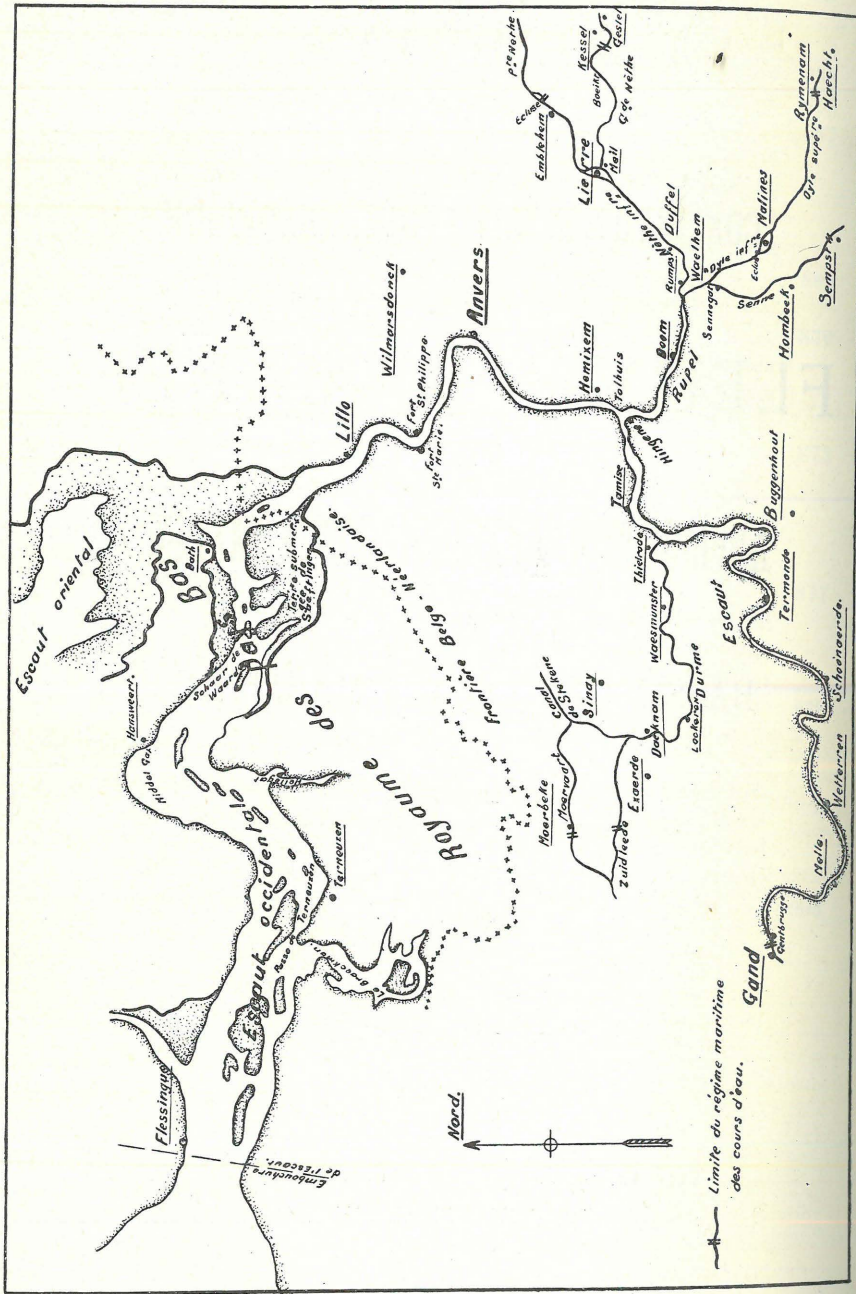
L. BONNET

Ingénieur en chef Directeur des Ponts et Chaussées.

(Suite).

PL. XIV A XVI.

Voir *Annales des Travaux Publics de Belgique*
3^e et 4^e fascicules de 1922.



Carte de l'Escaut maritime et de ses affluents à marée.

TROISIÈME PARTIE

Application de la théorie des marées fluviales aux rivières à marée du Bassin de l'Escaut maritime

CHAPITRE PREMIER

DESCRIPTION SOMMAIRE DES RIVIÈRES DU BASSIN DE L'ESCAUT MARITIME (v. carte ci-contre).

L'Escaut maritime mesure 159 kilomètres de long et s'étend depuis son embouchure, devant Flessingue, jusqu'au barrage éclusé de Gentbrugge. En amont de ce barrage, commence la partie fluviale qui reçoit, dans la traverse hydraulique de Gand, un affluent très important : *La Lys*.

Anciennement l'Escaut communiquait avec la mer par le seul bras oriental mais, lors de l'irruption des eaux de la mer dans une ancienne crique, qui est devenue depuis l'Escaut occidental ou Hont, une nouvelle embouchure vint s'ajouter à la première. Le nouveau bras étant beaucoup plus puissant que le premier, ce fut lui seul qui alimenta dans la suite et l'Escaut belge et une partie de l'Escaut oriental. Cette situation se maintint jusqu'en 1867, époque à laquelle l'Escaut oriental fut barré par une des digues du chemin de fer Flessingue-Rozendael. Depuis cette date, l'Escaut belge n'a de nouveau plus qu'un seul débouché à la mer : soit l'Escaut occidental ou Hont.

Entre l'embouchure et la frontière Hollando-Belge, le fleuve présente le caractère d'un véritable estuaire; les largeurs y sont grandes : 4.000 à 6.000 mètres, le lit y est encombré de bancs de sable séparés par des chenaux et des faux-chenaux, appelés *schaar*, et les rives y sont bordées de *schorres* d'une étendue parfois très considérable.

Plusieurs bras de mer se détachent de cette partie du fleuve, tels : l'Escaut oriental, le Hellegat, le Braeckman et le Sloe, dont l'importance actuelle n'est plus comparable à celle du passé. Ainsi le Sloe, qui constituait autrefois une grande voie de communication par eau entre le Hont et l'Escaut oriental, est barré depuis 1867 par une des digues du chemin de fer de Flessingue à Roozendael. L'Escaut oriental n'est plus la com-

munication directe de l'Escaut belge avec la mer, mais à subi le même sort que le Sloe. Quant au Braeckman, il mesurait au xvii^e siècle une largeur double de celle de nos jours et sa passe navigable, qui donnait accès au canal de Gand, valait encore en 1800 l'Escaut devant Anvers. Aujourd'hui, la puissance hydraulique de ce bras a fortement diminué et un jour viendra où elle aura complètement disparu comme celle de tant d'autres dérivations, parmi lesquelles on peut citer le Melkader, qui avait une dimension comparable à celle du fleuve principal, et la rivière de Hulst qui, partant en amont d'Osse-nisse, se raccordait avec le Braeckman et mesurait, à marée basse, 250 mètres de large et à marée haute, 750 mètres, soit presque le double de la largeur devant Anvers.

En aval de Lillo, l'aspect du fleuve change complètement : le profil en travers devient plus régulier et la largeur est beaucoup moindre. En face de Lillo, le fleuve mesure 820 mètres de large, 432 devant Anvers et environ 33 mètres à l'extrémité de la partie maritime près du barrage de Gentbrugge.

L'Escaut maritime reçoit en Belgique deux affluents importants qui sont soumis aux oscillations de la marée : le Rupel et la Durme, et un affluent à régime exclusivement fluvial : la Dendre.

Le Rupel a une longueur de 11km.5 et s'étend jusqu'à Rumpst où il est formé par la jonction de la Dyle et de la Nèthe inférieure. Le régime de cette rivière est entièrement maritime.

La Nèthe inférieure, qui débouche dans le Rupel, a une longueur de 15 kilomètres et remonte jusqu'au confluent de la Grande et de la Petite Nèthe à Lierre. Une dérivation barragée, qui a été creusée au Nord de la ville de Lierre, établit une communication directe entre la partie amont de la Nèthe inférieure et la partie aval de la Petite Nèthe. Elle est mise en service chaque fois que la ville de Lierre est menacée d'une inondation par les fortes crues d'amont. La Nèthe inférieure est complètement maritime.

La Petite Nèthe n'est soumise aux fluctuations de la marée que jusqu'à l'écluse barragée d'Emblehem, située à 6 kilomètres de l'embouchure de la rivière. A partir de ce point, le régime de la rivière est exclusivement fluvial.

La marée peut se propager librement dans la Grande Nèthe mais, par suite de la faible énergie que possède encore l'onde

fluviale, les variations de niveau deviennent inappréciables à partir du pont de Boekt à 8km.4 de l'embouchure à Lierre.

La Dyle, qui forme par sa jonction avec la Nèthe inférieure le Rupel, est soumise au régime maritime jusqu'à Haecht à 23km.4 en amont de Rumpst, mais pour faciliter la navigation intérieure en amont de Malines, la marée est arrêtée certains jours dans cette ville. La partie de la Dyle comprise dans la traversée de la ville de Malines est transformée depuis quelques années en bassin à flot. La propagation de la marée de l'aval jusqu'à l'amont de la ville est assurée par une dérivation qui contourne l'agglomération. Cette modification apportée au cours naturel de la rivière, met la ville de Malines à l'abri des inondations produites, soit par une crue d'amont, soit par une marée haute extraordinaire; elle améliore en outre notablement la navigation dans la traversée de la ville.

La Senne, qui est un affluent de la Dyle, est soumise aux oscillations de la marée jusqu'au barrage de Hombeek à 6km.8 de l'embouchure. En ouvrant les vannes automobiles du barrage, la marée peut remonter librement le cours de la rivière jusqu'à extinction complète du mouvement ondulatoire, ce qui se produit à environ 5 kilomètres en amont de Hombeek.

Le second affluent maritime de l'Escaut, la Durme, a son embouchure à Thielrode. Cette rivière est formée à Dacknam par la jonction du Moervaert et de la Zuidlede et mesure 26 kilomètres de long. Le Moervaert se réunit, à son extrémité amont, au canal de Gand à Terneuzen par l'intermédiaire de l'écluse du Rodenhuyze et subit les oscillations de la marée jusqu'à environ 10 kilomètres en amont de Dacknam.

La Zuidlede, qui rejoint de nouveau le Moervaert à son extrémité amont, a un régime maritime sur près de 10 kilomètres de long, soit jusqu'en amont de Mendonek.

La Durme a encore un sous affluent maritime : le canal de Stekene. Cette rivière débouche dans le Moervaert et est soumise aux fluctuations de la marée sur près de 5 kilomètres de long.

Les débits d'amont moyens des rivières du bassin de l'Escaut maritime ont été déterminés avec le plus de soin possible, en se servant de documents peu complets et pas toujours très précis, par M. Van Brabant, Ingénieur en chef Directeur des Ponts et Chaussées. Les résultats de ce travail sont rapportés dans une note intitulée *Études sur le régime des rivières du*

bassin de l'Escaut maritime et ils sont précédés du préambule, qu'il sera utile de reproduire ici :

« Ce débit (débit supérieur) est constitué, pour chaque rivière, par l'eau fluviale qui est amenée à l'amont de la région maritime ainsi que par les affluents, les ruisseaux et les fossés d'assèchement ou les sources débouchant dans la partie soumise à la marée.

Les débits de ces rivières ou de ces ruisseaux ne pourraient être déterminés d'une manière exacte qu'à l'aide d'observations hydrométriques comportant des jaugeages méthodiques à toute flottaison et s'étendant sur toute une série d'années. Malheureusement, nous ne disposons pas d'observations de l'espèce, ni du temps, ni du personnel nécessaires pour en organiser. Il a donc fallu se contenter d'évaluer les différents débits supérieurs à l'aide des rares données qu'on possédait quelque incertaines qu'elles fussent. Certes, les évaluations auxquelles nous avons abouti manquent de précision, mais il y a lieu de répéter ici ce qui a été dit plus haut : c'est que dans la région inférieure du fleuve, celle qui nous intéresse le plus, une erreur commise dans l'évaluation des débits supérieurs ne peut exercer une influence sensible sur le débit total, et ce, à cause de l'importance si considérable du volume de l'eau refoulée par la marée comparé à l'eau introduite en rivière par les affluents, les fossés et les sources ».

Ainsi qu'il résulte des explications données ci-dessus par M. Van Brabant, les débits d'amont de l'Escaut maritime et de ses affluents soumis à marée n'ont pu être déterminés avec toute la précision voulue. Les données fournies par M. l'Ingénieur en chef Directeur Van Brabant peuvent néanmoins servir dans la vérification de la loi des débits, car c'est le volume de remplissage qui y intervient et non le débit de flot. Nous verrons dans l'étude du niveau moyen des rivières maritimes comment certains chiffres fournis par M. Van Brabant doivent dans quelques rares cas, être corrigés, pour obtenir des résultats concordants avec les indications données par le fleuve.

DÉBITS D'AMONT MOYENS.

Escaut. — Le débit supérieur moyen à Gand est égal à 23 mètres cubes. En un point quelconque du fleuve le débit d'amont moyen est donné par la relation :

$$q = 23 \text{ m}^3 + \Sigma q' + 0,00259a^2 \quad (84)$$

dans laquelle $\Sigma q'$ représente la somme des débits d'amont amenés par les affluents principaux du fleuve, tels : la Dendre, la Durme et le Rupel, et a la distance en kilomètres mesurée à partir du barrage de Gentbrugge.

En appliquant la formule (84) aux points principaux de l'Escaut, tels les postes marégraphiques, on obtient les débits suivants :

Tableau 1.

Stations.	Débits d'amont.	Stations.	Débits d'amont.
Flessingue.	m ³ . 127	Thielrode.	m ³ . 40
Terneuzen.	114	Durme. {	Aval. 40
Hansweert.	105		Amont. 38
Bath.	96	Baesrode.	35.5
Lillo.	91	Termonde. {	Aval. {
Fort Philippe.	88		Dendre. { 33.5
Anvers.	85		Amont. {
Hemixem.	80.5		Dendre. { 26.5
Rupel. {	Aval. 80	Wetteren.	23.5
	Amont. 43	Gand.	23.0

Dendre. — Le débit supérieur moyen à l'embouchure de la rivière est de 7 mètres cubes.

Durme. — Le débit d'amont moyen est excessivement faible : il mesure environ 1 mètre cube au confluent du Moervaert et de la Zuidlede, 1^m3.5 à Waesmunster et 2 mètres cubes à l'embouchure.

Rupel, Nèthe inférieure, Grande et Petite Nèthe, Dyle et Senne. — En admettant que le débit supérieur moyen en chaque point de la rivière soit au débit supérieur total du cours d'eau, comme la superficie du bassin hydrographique au point considéré est à la superficie du bassin hydrographique total de la rivière, M. l'Ingénieur en chef Directeur Van Bra-

bandt a pu donner les valeurs suivantes du débit d'amont moyen :

Tableau 2.

Stations.		Débits d'amont.	Stations.		Débits d'amont.
		m ³			m ³
Rupel.	Embouchure.	37	Grande Nèthe.	Confluent Lierre.	5
	Rumpst.	35.5		Limite de la marée.	5
Nèthe inférieure.	Rumpst.	44		Dyle.	Rumpst.
	Confluent Lierre.	40	Aval. Senne.		24.5
Petite Nèthe.	Confluent Lierre.	5	Amont. Senne.		16.5
	Emblehem.	5			

Stations.		Débits d'amont.
		m ³
Dyle.	Malines.	16.5
	Limite de la marée.	16.5
Senne.	Embouchure.	8
	Limite de la marée.	8

CHAPITRE II

DOCUMENTS QUI ONT SERVI A FAIRE L'ÉTUDE THÉORIQUE DE L'ESCAUT MARITIME ET DE SES AFFLUENTS SOUMIS A LA MARÉE

Les profils en travers dont nous nous sommes servi sont ceux qui ont permis à M. l'Ingénieur en chef Directeur Van Brabandt de faire la cubature d'une marée moyenne. Il n'y a d'exception que pour le Rupel et la Senne. Pour le Rupel,

nous n'avons pu retrouver les documents dont s'est servi M. Van Brabandt et pour la Senne nous avons dû faire lever de nouveaux profils correspondant à la situation réellement existante, car les profils employés par M. l'Ingénieur en chef Directeur Van Brabandt furent ceux qui avaient été dressés pour les travaux d'amélioration de la Senne et ne tiennent pas compte des envasements survenus depuis la mise en service du nouveau lit de la rivière.

Escaut maritime. — De Gentbrugge à Wetteren et de Mariakerke à Thielrode : Profils levés par le service spécial de l'Escaut.

De Wetteren à Mariakerke : Profils levés par le service des études en 1897.

De Thielrode à la frontière Belge-Néerlandaise : Profils levés par le service des études en 1897-1898.

De la frontière à la mer : Profils levés sur la carte hydrographique néerlandaise dressée en 1891-1892.

Rupel. — Profils levés par le service spécial de l'Escaut en 1910.

Nèthe inférieure. — Profils levés par le service spécial de l'Escaut.

Grande Nèthe et petite Nèthe. — Profils levés par le service des Ponts et Chaussées de la Province.

Dyle. — De l'embouchure à Malines : Profils levés par le service spécial de l'Escaut. Partie de la rivière en amont de Malines : Profils levés par le service des Ponts et Chaussées de la Province.

Senne. — Profils levés en 1919.

Durme. — Profils levés par le service spécial de l'Escaut.

Nous nous basons encore sur les observations marégraphiques moyennes de la période 1888-1895, dont s'est également servi M. l'Ingénieur en chef Directeur Van Brabandt pour faire son étude détaillée de la marée moyenne. Par exception, nous avons recours aux observations marégraphiques de la période 1900-1910; celles-ci sont très précises, mais elles ont été faites longtemps après le levé des profils en travers des rivières maritimes.

CHAPITRE III.

ÉTUDE DE L'ESCAUT MARITIME (1).

S. I. — Calcul des sections à marée haute.

Nous avons figuré planche XIV les profondeurs moyennes à mi-marée, depuis l'embouchure devant Flessingue jusqu'à Gentbrugge.

Au profil en long ainsi tracé, qui a une allure forte irrégulière, nous avons substitué un autre profil régulier, composé d'éléments droits qui sont tracés de telle manière que la profondeur moyenne générale du fleuve soit sensiblement conservée.

Les profondeurs vraies et admises sont réunies dans les tableaux III¹ et III², ci-dessous.

(1) Tous les calculs sont faits à l'aide de la règle à calculer.

Tableau 3'

Indication des postes du fleuve		Entre-distances	Profondeur à mi-marée admise aux postes	Indication des sections du fleuve		Profondeur moyenne admise pour les sections du fleuve	
		Km.	Mèt.				
Gand			2.8	Gand-Wetteren	$(2,80 + 3,51) : 2 =$		3,15
Wetteren		14.730	3.51	Wetteren-Termonde	$(3,51 + 4,60) : 2 =$		4,06
Termonde		22.960	4.60	Termonde-Baesrode	$4,6 \times \frac{6,75}{2} + 5,4 \frac{6,75 + 4,0}{2} +$		
4 kilom. amont de Baesrode		6.750	5.40	Baesrode	$4,3 \times \frac{4}{2} = x (6,75 + 4,00) \quad x =$		4,94
Baesrode		4.000	4.30	Baesrode-Durme	$(4,3 + 5,00) : 2 =$		4,25
Durme		8.870	5.00	Durme-Rupel	$(5,00 + 5,40) : 2 =$		5,20
Rupel		40.500	5.40	Rupel-Hemixem	$(5,40 + 8,03) : 2 =$		6,715
Hemixem		2.625	8.03	Hemixem-Lillo			8,03
Lillo		26.225	8.03	Lillo-Bath	$8,03 \times 1,00 + \frac{8,03 + 4,5}{2} \times 5$		
1 kilomètre aval Lillo		1.000	8.03	Bath	$+ 5,00 \times 4,5 = x (1 + 5 + 5) \quad x =$		5,62
5 kilomètres amont Bath		5.000	4.50	Bath-Hansweert	$\frac{8,98 + 8,5}{2} \times 4,1 + \frac{8,5 + 4,5}{2} \times$		
Bath		5.000	4.50	Hansweert	$10 + 4,5 \times 2 = x (4,1 + 10 + 2) \quad x =$		6,81
2 kilom. aval Bath		2.000	4.50	Hansweert-Flessingue	$\frac{8,98 + 10,8}{2} \times 15,3 +$		
4km.1 amont Hansweert		10.000	8.50	Flessingue	$\frac{10,8 + 13}{2} \times 18,5 = x (15,3 + 18,5) \quad x =$		11,00
Hansweert		4.100	8.98				
Terneuzen		15.300	10.80				
Flessingue		18.500	13.00				

Tableau 3^a

SECTIONS	Profondeurs moyennes	
	vraies	admises
Gand-Wetteren	3.03	3.15
Wetteren-Termonde	3.76	4.06
Termonde-Baesrode	4.94	4.94
Baesrode-Durme	4.63	4.65
Durme-Rupel	5.2	5.2
Rupel-Hemixem	6.70	6.715
Hemixem-Lillo.	8.03	8.03
Lillo-Bath	5.75	5.62
Bath-Hansweert	7.55	6.81
Hansweert-Flessingue	11.00	11.00
<i>Moyenne générale.</i>	6.74	6.72

Il résulte des tableaux III qu'il y a une concordance très satisfaisante entre les profondeurs moyennes vraies du fleuve et celles admises ; il n'y a d'écarts appréciables que pour les sections Gand-Termonde et Lillo-Hansweert. En amont de Termonde, la profondeur admise est un peu plus grande que celle qui existe, le contraire se présente entre Lillo et Hansweert. Comme les profondeurs moyennes adoptées ont été choisies de telle manière que le calcul des sections donne des résultats concordants d'un bout à l'autre du fleuve, on pourrait déduire des modifications apportées, que la résistance du fleuve est plus faible en amont de Termonde et plus grande dans le coude de Bath. Quand cela serait, la chose serait parfaitement admissible, car la partie du fleuve en amont de Termonde a subi d'importants travaux d'amélioration et de rectification qui ont dû faciliter la propagation de l'onde marée, tandis que le coude de Bath, qui est encombré de bancs de sable et bordé

d'immenses *schorres*, doit présenter des résistances plus grandes que partout ailleurs sur le fleuve. Mais pour que cette conclusion fût vraiment valable, il faudrait être certain que la profondeur moyenne réelle du fleuve, qui a existé pendant la période des observations marégraphiques 1888-1895, est bien celle dont nous tenons compte dans nos études. Or, cette certitude n'existe pas. Les données dont nous disposons correspondent à la situation d'un jour : celui des sondages, et non pas à la situation moyenne de plusieurs années. Ainsi, les profondeurs en amont de Termonde résultent d'un sondage fait en 1897, soit deux ans après la période des observations de marée. Or, ces sondages ont démontré que les sections réalisées au cours des travaux d'amélioration du fleuve, ne se sont pas maintenues, mais ont subi des envasements notables. Il est donc probable que les profondeurs du fleuve, qui ont existé pendant la période des observations marégraphiques 1888-1895, ont été plus grandes que pendant la période postérieure de 1897. Quant au coude de Bath, où les profondeurs moyennes sont plus petites à marée haute qu'à marée basse, elles ont été déterminées d'après une carte hydrographique néerlandaise dressée en 1891-1892.

Dans ces conditions, nous avons cru judicieux de ne pas introduire dans nos études une résistance variable et d'admettre aux quelques rares endroits, où la résistance semble être différente de la résistance moyenne, une profondeur un peu différente de celle donnée par les sondages. C'est en opérant de cette manière que nous avons pu attribuer au coefficient de résistance du fleuve la valeur moyenne : 0.792, le kilomètre étant pris pour unité.

La planche XV montre : que la section de marée haute à l'embouchure, devant Flessingue, peut être prise égale à 86.000 mètres carrés et que la profondeur moyenne de mi-marée, au même point est sensiblement égale à 13,00 mètres. Le diagramme des sections montre encore, qu'il n'y a pas de discontinuités dans la loi de variation des sections au droit des affluents soumis à marée, de sorte que c'est la vitesse du courant qui y change brusquement. Connaissant la section à l'embouchure du fleuve et le mode de variation de la vitesse, qui se fait brusquement au droit des affluents à marée, nous pouvons calculer toutes les sections d'égale vitesse du fleuve par application des formules 29,30 et 31.

Calcul des sections.

FLESSINGUE JUSQUE 4KM.1 EN AMONT D' HANSWEERT.

Profondeur moyenne à mi-marée à Flessingue : 13 mètres ;
à 4km 1 en amont d'Hansweert : 8^m.5.

Distance entre les deux points : 37km.9.

Loi des profondeurs moyennes à mi-marée :

$$H = 13^m,00 - ax$$

$$a = \frac{13 - 8,5}{37,9} = 0,1188.$$

Profondeur moyenne à mi-marée à :

Terneuzen : 13^m — 0.1188 × 18.5 = 10^m.80.

Hansweert : 13 — 0.1188 × 33.8 = 8^m.98.

Section à Flessingue : 86.000 mètres carrés.

$$\log. 86.000 = 4.93450.$$

Section à Terneuzen.

$$\log \ell = 4,93450 - \frac{0,688}{0,1188} \left(\frac{1}{\sqrt{40,8}} - \frac{1}{\sqrt{13}} \right) = 4,77780.$$

$$\ell = 59950^m^2.$$

Section à Hansweert.

$$\log \ell = 4,93450 - \frac{0,688}{0,1188} \left(\frac{1}{\sqrt{8,98}} - \frac{1}{\sqrt{13}} \right) = 4,61050$$

$$\ell = 40785^m^2.$$

Section à 4 km. 1 en amont d'Hansweert.

$$\log \ell = 4,93450 - \frac{0,688}{0,1188} \left(\frac{1}{\sqrt{8,5}} - \frac{1}{\sqrt{13}} \right) = 4,55200$$

$$\ell = 55645^m^2.$$

4 KM.1 EN AMONT DE HANSWEERT JUSQUE 2 KILOMÈTRES EN AVAL DE BATH.

Profondeur moyenne à mi-marée à 4 km.1 en amont d'Hansweert 8^m5; à 2 kilomètres en aval Bath : 4^m5.

Distance entre les deux points : 10 kilomètres.

Loi des profondeurs moyennes à mi-marée :

$$H = 8^m,5 - ax$$

$$a = \frac{8,5 - 4,5}{10} = 0,4.$$

Section à 2 kilomètres en aval de Bath.

$$\log \ell = 4,55200 - \frac{0,688}{0,4} \left(\frac{1}{\sqrt{4,5}} - \frac{1}{\sqrt{8,5}} \right) = 4,53140$$

$$\ell = 21448^m^2.$$

2 KILOMÈTRES EN AVAL DE BATH JUSQUE 5 KILOMÈTRES EN AMONT DE BATH.

Profondeur moyenne à mi-marée constante : 4^m5.

Valeur du coefficient d'usure de l'onde marée :

$$\frac{R \log e}{\lambda^{\frac{3}{2}}} = \frac{0,344}{4,5^{\frac{3}{2}}} = \frac{0,344}{9,55} = 0,0362.$$

Section à Bath.

$$\log \ell = 4,53140 - 0,0362 \times 2 = 4,25940$$

$$\ell = 18172^m^2.$$

Section à 5 kilomètres en amont de Bath.

$$\log \ell = 4,53140 - 0,0362 \times 7 = 4,07910$$

$$\ell = 11998^m^2.$$

5 KILOMÈTRES EN AMONT DE BATH JUSQUE 1 KILOMÈTRE EN AVAL DE LILLO.

Profondeur moyenne à mi-marée à 5 kilomètres en amont de Bath : 4^m5; à 1 kilomètre en aval Lillo : 8^m03.

Distance entre les deux points : 5 kilomètres.

Loi des profondeurs moyennes à mi-marée :

$$H = 4,5 + ax$$

$$a = \frac{8,03 - 4,5}{5} = 0,706.$$

Section à 1 kilomètre en aval de Lillo.

$$\log \ell = 4,07910 - \frac{0,688}{0,706} \left(\frac{1}{\sqrt{4,5}} - \frac{1}{\sqrt{8,03}} \right) = 3,96350$$

$$\ell = 9194^m^2.$$

1 KILOMÈTRE EN AVAL DE LILLO JUSQUE HEMIXEM.

Profondeur moyenne à mi-marée constante : 8^m03.

Valeur du coefficient d'usure de l'onde marée :

$$\frac{R \log e}{\lambda^{\frac{3}{2}}} = \frac{0,344}{8,03^{\frac{3}{2}}} = \frac{0,344}{22,76} = 0,01512.$$

Section à Lillo.

$$\log \ell = 3,96350 - 0,01512 \times 1 = 3,94838$$

$$\ell = 8879^m^2.$$

Section à Fort Philippe.

$$\log \ell = 3,96550 - 0,01512 \times 7,65 = 3,84770$$

$$\ell = 7042^{\text{m}^2}.$$

Section à Anvers-Kattendyk.

$$\log \ell = 3,96550 - 0,01512 \times 14,85 = 3,73920$$

$$\ell = 5485^{\text{m}^2}.$$

Section à Anvers à 9 km.95 en amont de Fort Philippe.

$$\log \ell = 3,96550 - 0,01512 \times 17,60 = 3,69750$$

$$\ell = 4985^{\text{m}^2}.$$

Section à Hemixem.

$$\log \ell = 3,96550 - 0,01512 \times 27,225 = 3,55200$$

$$\ell = 3565^{\text{m}^2}.$$

HEMIXEM JUSQU'À L'EMBOUCHURE DU RUPEL OU HINGENE (TOLHUYS).

Profondeur moyenne à mi-marée à Hemixem : 8^m03 ; à Hingene : 5^m40.

Distance entre les deux points : 2 km. 625.

Loi des profondeurs moyennes à mi-marée :

$$H = 8,03 - ax$$

$$a = \frac{8,03 - 5,4}{2,625} = 1.$$

Section à l'embouchure du Rupel.

$$\log \ell = 3,55200 - \frac{0,688}{1} \left(\frac{1}{\sqrt{5,4}} - \frac{1}{\sqrt{8,03}} \right) = 3,49905$$

$$\ell = 3155^{\text{m}^2}.$$

EMBOUCHURE DU RUPEL JUSQU'À L'EMBOUCHURE DE LA DURME.

Profondeur moyenne à mi-marée au Rupel : 5^m40 ; à la Durme : 5 mètres.

Distance entre les deux points : 10 km.5.

Loi des profondeurs moyennes à mi-marée :

$$H = 5,4 - ax$$

$$a = \frac{5,4 - 5,0}{10,5} = 0,0381.$$

Profondeurs moyennes à mi-marée à :

Tamise : 5^m4 - 0,0381 × 6,52 = 5^m15 ;

Thielrode : 5^m4 - 0,0381 × 9,5 = 5^m04.

Section à Tamise.

$$\log \ell = 3,49905 - \frac{0,688}{0,0381} \left(\frac{1}{\sqrt{5,15}} - \frac{1}{\sqrt{5,4}} \right) = 3,31815$$

$$\ell = 2080^{\text{m}^2}.$$

Section à Thielrode.

$$\log \ell = 3,49905 - \frac{0,688}{0,0381} \left(\frac{1}{\sqrt{5,04}} - \frac{1}{\sqrt{5,4}} \right) = 3,22775$$

$$\ell = 1690^{\text{m}^2}.$$

Section à la Durme.

$$\log \ell = 3,49905 - \frac{0,688}{0,0381} \left(\frac{1}{\sqrt{5}} - \frac{1}{\sqrt{5,4}} \right) = 3,19205$$

$$\ell = 1556^{\text{m}^2}.$$

EMBOUCHURE DE LA DURME JUSQUE BAESRODE.

Profondeur moyenne à mi-marée à la Durme : 5 mètres ; à Baesrode : 4^m3.

Distance entre les deux points : 8 km. 870.

Loi des profondeurs moyennes à mi-marée :

$$H = 5,00 - ax$$

$$a = \frac{5,00 - 4,30}{8,87} = 0,079.$$

Section à Baesrode.

$$\log \ell = 3,19205 - \frac{0,688}{0,079} \left(\frac{1}{\sqrt{4,3}} - \frac{1}{\sqrt{5}} \right) = 2,88705$$

$$\ell = 771^{\text{m}^2}.$$

BAESRODE JUSQUE 4 KILOMÈTRES EN AMONT DE BAESRODE.

Profondeur moyenne à mi-marée à Baesrode : 4^m3 ; à 4 kilomètres en amont de Baesrode : 5^m4.

Distance entre les deux points : 4 kilomètres.

Loi des profondeurs moyennes à mi-marée :

$$H = 4,3 + ax$$

$$a = \frac{5,4 - 4,3}{4} = 0,275.$$

Section à 4 kilomètres en amont de Baesrode.

$$\log \ell = 2,88705 - \frac{0,688}{0,275} \left(\frac{1}{\sqrt{4,3}} - \frac{1}{\sqrt{5,4}} \right) = 2,75695$$

$$\ell = 571^{\text{m}^2}, 4.$$

4 KILOMÈTRES EN AMONT DE BAESRODE JUSQUE TERMONDE.

Profondeur moyenne à mi-marée à 4 kilomètres en amont de Baesrode : 5^m4 ; à Termonde : 4^m60.

Distance entre les deux points : 6 km. 750.

Loi des profondeurs moyennes à mi-marée :

$$H = 5,4 - ax$$

$$a = \frac{5,4 - 4,6}{6,75} = 0,1186.$$

Section à Termonde.

$$\log \epsilon = 2,75695 - \frac{0,688}{0,1186} \left(\frac{1}{\sqrt{4,6}} - \frac{1}{\sqrt{5,4}} \right) = 2,54795$$

$$\epsilon = 353^{\text{m}^2}, 1.$$

TERMONDE-GAND.

Profondeur moyenne à mi-marée à Termonde : 4^m60 ; à Gand : 2^m80.

Distance entre les deux points : 37 km. 690.

Loi des profondeurs moyennes à mi-marée :

$$H = 4,6 - ax$$

$$a = \frac{4,6 - 2,8}{37,690} = 0,0477.$$

Profondeur moyenne à mi-marée à

Schoonaerde : 4,6 - 0,0477 × 10,63 = 4^m,09

Wetteren : 4,6 - 0,0477 × 22,96 = 3^m,51

Melle : 4,6 - 0,0477 × 29,045 = 3^m,21.

Section à Schoonaerde.

$$\log \epsilon = 2,54795 - \frac{0,688}{0,0477} \left(\frac{1}{\sqrt{4,09}} - \frac{1}{\sqrt{4,6}} \right) = 2,14445$$

$$\epsilon = 139^{\text{m}^2}, 5.$$

Section à Wetteren.

$$\log \epsilon = 2,54795 - \frac{0,688}{0,0477} \left(\frac{1}{\sqrt{3,51}} - \frac{1}{\sqrt{4,6}} \right) = 1,57395$$

$$\epsilon = 37^{\text{m}^2}, 49.$$

Section à Melle.

$$\log \epsilon = 2,54795 - \frac{0,688}{0,0477} \left(\frac{1}{\sqrt{3,21}} - \frac{1}{\sqrt{4,6}} \right) = 1,21695$$

$$\epsilon = 16^{\text{m}^2}, 48.$$

Section à Gand.

$$\log \epsilon = 2,54795 - \frac{0,688}{0,0477} \left(\frac{1}{\sqrt{2,8}} - \frac{1}{\sqrt{4,6}} \right) = 0,65795$$

$$\epsilon = 4^{\text{m}^2}, 55.$$

Tableau 4. — Récapitulation des sections calculées et existantes aux points principaux de l'Escaut.

Stations.	Sections		Stations.	Sections	
	cal- culées.	exis- tantes.		cal- culées.	exis- tantes.
Flessingue . . .	M ² 86.000	M ² 89.300	Hemixem . . .	M ² 3565	M ² 2926.
Terneuzen . . .	59950	64590	Rupel	3155	2845
Hansweert . . .	40785	47640	Tamise	2080	2100
4.1 Km. amont Hans- weert	35645	40700	Thielrode	1690	1701
2 Km. aval Bath . .	21448	34500	Durme	1556	1890
Bath	18172	30370	Baesrode	771	883
5 Km. amont Bath . .	11998	11500	4 Km. amont Baes- rode	571.4	805
1 Km. aval Lillo . .	9194	9800	Termonde	353.1	590
Lillo	8879	8416	Schoonaerde . . .	139.5	417
Fort Philippe . . .	7042	6935	Wetteren	37.49	249
Anvers-Kattendyk . .	5485	4935	Melle	16.48	146
Anvers (9.95 Km. amont fort Philippe).	4983	4835	Gand	4.55	103.

Si l'on examine le tableau ci-dessus et surtout la planche XV, on voit qu'il y a une concordance très satisfaisante entre les sections calculées et celles existantes. Il n'y a d'exception qu'au droit de la situation troublée de Bath et en amont de Baesrode où les sections réelles sont beaucoup plus grandes que celles données par la théorie. Mais, c'est aussi en ces endroits que la constance de la vitesse ne se vérifie pas. A Bath, la vitesse est plus petite que dans les autres sections du fleuve situées en aval du Rupel et, en amont de Baesrode, la vitesse suit une loi décroissante. Cela ressort très nettement du tableau V des vitesses moyennes générales du courant pendant une marée complète, telles qu'elles résultent de l'opération de cubature de la marée moyenne faite par M. l'Ingénieur en chef Directeur Van Brabandt.

Tableau 5.

Stations.	Vitesses moyennes générales du courant de marée.	Stations.	Vitesses moyennes générales du courant de marée.
Flessingue	0.627	Aval Rupel	0.864
Terneuzen	0.615	Thielrode	0.69
Hansweert	0.553	Amont Durme	0.441
Bath	0.444	Baesrode.	0.454
Lillo	0.646	Termonde	0.388
Fort Philippe	0.615	Wetteren	0.21
Anvers	0.671	Gand.	0.31
Hemixem.	0.855		

Si donc on trouve à Bath et en amont de Baesrode des écarts entre les résultats de la pratique et ceux de la théorie, c'est que les formules 29, 30 et 31 ne sont plus d'application et qu'il faille se servir des relations 32, 33 et 34.

Faisons les corrections voulues.

Section Terneuzen-Hansweert. — Admettons que la vitesse varie suivant une loi rectiligne de la forme : $v = v_0 - wx$.

À Terneuzen, la vitesse est égale à 0^m.615 et à Hansweert 0^m.553 donc :

$$w = \frac{0.615 - 0.553}{15,5} = 0,00406$$

et

$$w' = \frac{0,00406}{4,15 \times 0,615} = 0,00575.$$

Le terme supplémentaire à ajouter au logarithme de la section à Hansweert, calculée dans l'hypothèse d'une vitesse constante, est égal à :

$$\begin{aligned} \log \left(\frac{1}{1 - 0,00575 \times 15,5} \right) &= \log \left(\frac{1}{1 - 0,0877} \right)^2 = \\ &= \log \left(\frac{1}{0,9123} \right)^2 = \log (1,096)^2 = \log 1,202 = 0,07990. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \log \xi &= 4,61050 + 0,07990 = 4,69040 \\ \xi &= 49020^{m^2}. \end{aligned}$$

Le résultat ci-dessus se rapproche de la section existante qui est de 47.640 mètres carrés.

Section Hansweert-Bath. — En disposant les calculs comme ci-dessus, on obtient :

$$\begin{aligned} w &= \frac{0.553 - 0.444}{16,1} = 0,00677 \\ w' &= \frac{0,00677}{4,15 \times 0,555} = 0,01067 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \log \left(\frac{1}{1 - 0,01067 \times 16,1} \right)^2 &= \log \left(\frac{1}{0,8283} \right)^2 = 0,46256 \\ \log \xi &= 4,25940 + 0,07990 + 0,46256 = 4,50186 \\ \xi &= 31760^{m^2}. \end{aligned}$$

Cette section est sensiblement égale à celle qui existe réellement, soit : 30.570 mètres carrés.

Section Baesrode-Wetteren. — Ici le problème se complique par suite de l'influence du débit d'amont, dont il n'a pas été possible de tenir compte dans l'établissement des formules théoriques. Les calculs de correction de la partie *Terneuzen-Bath* ont pu être faits en se servant directement des chiffres du tableau V, parce que ceux-ci sont peu ou pas influencés par l'existence du débit supérieur qui est négligeable vis-à-vis de l'énorme débit de la marée. Mais pour la partie amont du fleuve, où les eaux supérieures augmentent d'une manière appréciable la vitesse moyenne générale du courant pendant une marée complète, il faut corriger les vitesses du tableau V, de manière à éliminer l'influence du débit d'amont, avant de s'en servir dans le calcul des sections. C'est, par exemple, sous l'effet du débit supérieur que la vitesse moyenne du courant de marée augmente depuis Wetteren jusqu'à Gand, après avoir diminuée depuis Baesrode jusqu'à Wetteren. Si donc, nous néglignons de corriger pour cette partie du fleuve les chiffres du tableau V, la théorie conduirait à des sections trop petites. Ceci est pleinement confirmé dès qu'on procède au calcul. Vitesse à Baesrode : 0^m.454; à Wetteren : 0^m.21.

$$\begin{aligned} w &= \frac{0.454 - 0.21}{22,96 + 10,75} = 0,00724 \\ w' &= \frac{0,00724}{4,15 \times 4,54} = 0,01387. \end{aligned}$$

Le terme supplémentaire à ajouter au logarithme de la section à Wetteren, calculée dans l'hypothèse d'une vitesse moyenne de marée constante, est égal à :

$$\log \left(\frac{1}{1 - 0,01387 \times 33,71} \right)^2 = 0,54654$$

$$\log \epsilon = 1,57395 + 0,54654 = 2,12049$$

$$\epsilon = 132^{m^2}.$$

Section beaucoup plus petite que la section réelle qui mesure 249 mètres carrés.

Pour pouvoir traiter la question exactement, il faudrait connaître la vitesse moyenne du courant de marée à Baesrode et à Wetteren, en supposant qu'il n'y ait plus de débit d'amont. Or cette vitesse moyenne ne peut être déterminée exactement que par la cubature du fleuve, abstraction faite du débit d'amont, ce qui est une opération longue et difficile et qui exige que tout le problème de la marée fluviale soit résolu. La loi des vitesses moyennes nous fournit, il est vrai, des formules qui permettent de calculer la vitesse moyenne avec une certaine précision, mais l'exactitude n'est pas suffisante pour que les formules puissent être appliquées au cas qui nous préoccupe. Il suffit, en effet, d'une erreur de quelques pour cent dans le calcul de la vitesse moyenne pour obtenir des erreurs très importantes, soit le carré du pour cent, dans le calcul des sections. La difficulté peut être écartée d'une manière simple de deux façons différentes.

1° On se donne la section à la limite de la partie maritime, soit à Gentbrugge. Cette section étant exclusivement entretenue par le débit d'amont, sa surface dépend uniquement du régime fluvial du fleuve.

Cette section peut donc être trouvée en étudiant la partie fluviale de l'Escaut. Quand on fait cela, on trouve que la section, que l'Escaut fluvial est capable d'entretenir à lui seul à Gentbrugge, est d'environ 120 mètres carrés. Connaissant ainsi la section à Gentbrugge et à Baesrode, on peut calculer la valeur du coefficient w' du terme supplémentaire dans les formules 32, 33 et 34 et terminer la résolution du problème des sections définitives du fleuve.

2° On connaît la section d'équilibre d'égale vitesse à Gentbrugge, c'est $4^{m^2,55}$. Partant de ce chiffre, on peut calculer

par la loi de l'amplitude la largeur du fleuve de manière à réaliser l'amplitude observée, soit $1^m,42$. Cette largeur est indiquée plus loin et est égale à $30^m,90$. Cette dimension donne une section à marée haute égale à $30^m,90$ ($2^m,80 + 0,71$ (demi-amplitude)) = $108^{m^2,46}$, soit environ 110 mètres carrés.

Nous trouvons ainsi à nouveau la section d'équilibre à Gentbrugge. En partant du chiffre ci-dessus, nous pouvons calculer le coefficient w' et déterminer toutes les sections intermédiaires entre Gand et Baesrode.

Nous allons faire le calcul avec 110 mètres carrés qui nous paraît être le chiffre le mieux établi.

$$\text{Log } 110 = 2,04139.$$

$$\text{Log } 4^{m^2,55} = 0,65795.$$

Différence = $1,38344$ ou la valeur du terme supplémentaire dans la formule (33).

Distance entre Baesrode et Gentbrugge : 48km,44.

$$1,38344 = \log \left(\frac{1}{1 - w' \times 48,44} \right)^2$$

$$w' = 0,01646.$$

Section à Termonde.

$$\log \left(\frac{1}{1 - 0,01646 \times 10,75} \right)^2 = 0,16879$$

$$\log \epsilon = 2,54795 + 0,16879 = 2,71674$$

$$\epsilon = 52^{(m^2,90)}.$$

Section à Schoonaerde.

$$\log \left(\frac{1}{1 - 0,01646 \times 21,58} \right)^2 = 0,57566$$

$$\log \epsilon = 2,14445 + 0,57566 = 2,52011$$

$$\epsilon = 331^{m^2,2}.$$

Section à Wetteren.

$$\log \left(\frac{1}{1 - 0,01646 \times 33,71} \right)^2 = 0,70200$$

$$\log \epsilon = 1,57395 + 0,70200 = 2,27595$$

$$\epsilon = 188^{m^2,80}.$$

Section à Melle.

$$\log \left(\frac{1}{1 - 0,01646 \times 39,795} \right)^2 = 0,92169$$

$$\log \epsilon = 1,21695 + 0,92169 = 2,13864$$

$$\epsilon = 137^{m^2,60}.$$

En portant les sections ci-dessus sur le diagramme planche XV, on voit qu'il y a une concordance très satisfaisante entre la courbe des sections vraies et celle des sections calculées

Considérations particulières. — Il résulte des calculs ci-dessus que l'onde marée de l'Escaut arrivant devant le barrage de Gentbrugge ne possède plus qu'une très faible partie de son énergie primitive. Elle est représentée par une section de 4^m25 , ce qui peut être aisément absorbée par des remous, des frottements extraordinaires ou une transformation de l'énergie cinétique en énergie potentielle par un relèvement de l'onde marée fluviale. L'Escaut maritime est donc un fleuve en équilibre dynamique, c'est-à-dire un fleuve maritime dont la puissance hydraulique est entièrement absorbée, par les travaux résistants dus aux phénomènes de frottement, quand l'onde marée fluviale arrive à la fin de sa course. Nous pouvons dire ici que l'équilibre dynamique des fleuves à marée est la condition primordiale et essentielle à laquelle tout fleuve maritime doit satisfaire pour qu'il soit viable. Pas d'équilibre, pas de régime stable. En effet, si une partie de l'énergie de l'onde fluviale n'est pas absorbée par les résistances du fleuve, l'énergie encore disponible, qui doit être amortie coûte que coûte en vertu des lois générales de la mécanique, se dépensera en créant des remous, labourant le plafond, attaquant les rives, déplaçant les bancs de sable, creusant de nouvelles passes ou fausses passes, relevant le fond, etc., et cela jusqu'au moment où des résistances nouvelles créées assureront l'équilibre entre la puissance hydraulique de l'onde marée fluviale et le travail à produire pour propager l'onde. Les ruptures de digues, les grands élargissements accompagnés d'un relèvement du fond sont des indices d'un manque d'équilibre local qui a dû exister à un certain moment sur le fleuve. Nous avons sur l'Escaut un exemple typique d'une situation de l'espèce : c'est l'élargissement formidable et l'exhaussement non moins extraordinaire du plafond du fleuve dans le coude de Bath, qui se sont produits au cours de grandes inondations des xiv^e , xv^e et xvi^e siècles. Pour bien montrer l'influence des immenses schorres et des bancs de sables, qui encombrant en cet endroit le lit du fleuve, nous allons supposer un instant qu'ils aient disparu et nous allons calculer pour cette nouvelle situation les sections d'égale vitesse depuis Flessingue jusqu'au Rupel.

Admettons que la profondeur moyenne à mi-marée varie d'une manière continue, suivant une loi rectiligne, depuis Flessingue, où elle serait de 13 mètres, jusque Hemixem, où elle mesurerait 8 mètres. Nous aurions donc :

$$\lambda = 15^m,00 - ax.$$

D'où :

$$a = \frac{13^m - 8}{87^{\text{km}},125} = 0,0574.$$

De sorte que les profondeurs aux points principaux de l'Escaut seraient :

Terneuzen . . .	11 ^m .94.
Hansweert . . .	11 ^m .06.
Bath	10 ^m .14.
Lillo	9 ^m .50.
Fort Philippe . .	9 ^m .12.
Anvers	8 ^m .71.
Hemixem	8 ^m .00.

Les sections d'égale vitesse aux mêmes points sont données par les calculs suivants :

Flessingue. = 86,000 mètres carrés, soit la même section d'égale vitesse que celle qui existe actuellement :

$$\log \epsilon = \log 86000 = 4,93450.$$

Terneuzen.

$$\log \epsilon = 4,93450 - \frac{0,688}{0,0574} \left(\frac{1}{\sqrt{11,94}} - \frac{1}{\sqrt{13}} \right)$$

$$\log \epsilon = 4,79050$$

$$\epsilon = 61730^{\text{m}^2}.$$

Hansweert.

$$\log \epsilon = 4,93450 - \frac{0,688}{0,0574} \left(\frac{1}{\sqrt{11,06}} - \frac{1}{\sqrt{13}} \right)$$

$$\log \epsilon = 4,64650$$

$$\epsilon = 44510^{\text{m}^2}.$$

Bath.

$$\log \epsilon = 4,93450 - \frac{0,688}{0,0574} \left(\frac{1}{\sqrt{10,14}} - \frac{1}{\sqrt{13}} \right) = 4,49100$$

$$\epsilon = 30980^{\text{m}^2}.$$

Lillo.

$$\log \epsilon = 4,95450 - \frac{0,688}{0,0574} \left(\frac{1}{\sqrt{9,5}} - \frac{1}{\sqrt{15}} \right) = 4,5475$$

$$\epsilon = 2226 \text{ m}^2.$$

Fort Philippe.

$$\log \epsilon = 4,95450 - \frac{0,688}{0,0574} \left(\frac{1}{\sqrt{9,12}} - \frac{1}{\sqrt{15}} \right) = 4,2880$$

$$\epsilon = 19410 \text{ m}^2.$$

Anvers.

$$\log \epsilon = 4,95450 - \frac{0,688}{0,0574} \left(\frac{1}{\sqrt{8,74}} - \frac{1}{\sqrt{15}} \right) = 4,196$$

$$\epsilon = 15550 \text{ m}^2$$

Hemixem.

$$\log \epsilon = 4,95450 - \frac{0,688}{0,0574} \left(\frac{1}{\sqrt{8}} - \frac{1}{\sqrt{15}} \right) = 4,0225$$

$$\epsilon = 10550 \text{ m}^2.$$

Tableau 6. — Tableau récapitulatif des sections calculées et existantes.

Stations.	Sections	
	calculées.	existantes.
	M ²	M ²
Flessingue	86000	89300
Terneuzen	61730	64590
Hansweert	44310	47640
Bath	30980	30570
Lillo	22260	8416
Fort Philippe	19410	6935
Anvers	15530	4935
Hemixem	10530	2926

Les calculs ci-dessus montrent que les nouvelles sections sont sensiblement les mêmes que celles qui existent, depuis

Flessingue jusque Bath. Cette similitude ne s'applique évidemment pas à la forme de la section, mais seulement à la surface, car les nouvelles profondeurs réalisées sont plus grandes que celles qui existent actuellement. Ainsi à Bath, la nouvelle profondeur est égale à 10^m.14, alors qu'on n'y sonde aujourd'hui que 4^m.50. A partir du seuil de Bath, la situation change complètement. Aux postes de Lillo, Fort Philippe, Anvers et Hemixem, les sections nouvelles sont environ trois fois plus grandes que celles qui existent et comme la même conclusion est valable pour les débits, quand l'amplitude de la marée ne change pas, nous pouvons dire que les volumes du flot sont augmentés dans le même rapport.

Ceci montre que l'onde fluviale qui s'engage dans l'Escaut à Flessingue est trop puissante pour pouvoir être reçue par la partie du fleuve située sur le territoire belge. Il est dès lors tout naturel, puisque indispensable, qu'un amortisseur d'énergie se soit créé en un endroit du fleuve et que la vague marée s'y soit proportionnée aux dimensions du cours d'eau situé plus en amont. Cet amortisseur d'énergie est le seuil de Bath.

La situation troublée de Bath est donc un mal nécessaire, puisqu'il assure l'équilibre dynamique du fleuve. Ceci ne veut pas dire que le coude de Bath ne puisse pas être amélioré, surtout au point de vue de la navigation maritime. Des modifications, même profondes, peuvent être apportées en cet endroit du fleuve, tel l'aménagement d'un chenal navigable par tout état de marée entre deux digues submersibles ou insubmersibles (c'est une question à examiner, qui sort du cadre de la présente étude), pourvu que les changements apportés ne détruisent pas l'équilibre existant du fleuve ou pourvu qu'ils en réalisent un autre susceptible d'être admis. Si on ne veut, par exemple, pas modifier l'équilibre existant, il faudra avoir soin de maintenir les schorres latéraux qui jouent en quelque sorte le rôle de frein; et, si l'on emploie des digues insubmersibles, il faudra prévoir tant du côté amont qu'aval, des communications entre le fleuve et les bassins latéraux d'épanchement, il faudra même assurer le maintien de la profondeur et de la surface de ces bassins si l'on veut combattre une diminution lente, mais progressive, de la puissance hydraulique du fleuve situé plus en aval.

L'analyse de l'élargissement de Bath montre encore que nous disposons en cet endroit d'une énergie considérable qui,

recupérée, peut permettre d'améliorer dans de vastes proportions les rivières maritimes existantes ou de rendre maritimes des rivières à régime fluvial. On pourrait, par exemple, rendre maritime le Démer et donner accès aux grands bateaux rhénans jusqu'au delà de Hasselt, sans qu'ils aient à franchir une seule écluse. On comprendra aisément tout l'intérêt que présente cette question pour le port d'Anvers, quand on remarquera que sa solution permettrait d'établir, entre Anvers et la Meuse, une voie de grande communication par eau qui ne comporterait plus que deux écluses : l'une située au delà de Hasselt, l'autre à la Meuse. Le port d'Anvers, lui-même, verrait la largeur de sa rade plus que doublée et sa profondeur majorée d'au moins 25 p. c. D'autres rivières, telles que le Rupel, verraient leur puissance hydraulique augmentée dans des proportions gigantesques : il ne serait, par exemple, pas difficile d'y entretenir 8 mètres sous marée basse et de maintenir 6 mètres jusque devant Malines.

En un mot, la récupération de l'énergie hydraulique disponible à Bath peut permettre de modifier complètement l'aspect et les éléments caractéristiques des rivières du bassin maritime de l'Escaut. Mais toutes ces transformations doivent entraîner des travaux gigantesques, qui absorberont forcément des centaines de millions et dureront des dizaines d'années. Ils ne pourront donc jamais être entrepris qu'après mûr examen et à des époques où leur nécessité se fera nettement sentir.

La propriété de l'énergie de l'onde fluviale permet aussi d'expliquer comment un fleuve maritime est condamné à s'ensabler s'il n'est pas entretenu par une énergie supplémentaire, comme un dragage ou un courant d'eaux supérieures suffisamment important.

Soit, en effet, une rivière maritime en équilibre dynamique, sous l'action d'une onde moyenne déterminée. Pour toute autre onde moins puissante, par exemple une onde de quadrature, qui s'amortit plus rapidement que l'onde moyenne, il y aura à l'amont du fleuve une partie qui ne sera plus entretenue par le jeu régulier des courants de marée. Si pendant ces périodes, la partie de la rivière, qui n'a plus qu'un régime exclusivement fluvial, n'est pas tenue à profondeur, par un dragage ou un courant d'amont suffisamment intense, cette partie, dis-je, s'ensablera et présentera à l'onde moyenne suivante, ou à toute autre onde plus puissante, une résistance plus grande que

précédemment. Dans ces conditions, la marée s'éteindra avant d'avoir atteint la limite primitive de la partie maritime et le premier pas aura été fait vers l'ensablement lent, mais continu et progressif, du fleuve. A chaque marée de faible amplitude suivante, le même phénomène se répétera et ainsi de suite jusqu'à ensablement complet du fleuve.

Cette action extinctrice des fleuves maritimes est encore renforcée par le jeu des courants de marée même. En effet, la vitesse moyenne du flot, qui est sensiblement égale à celle du jusant dans la partie aval d'un fleuve à marée, devient notablement plus grande que cette dernière, quand on fait abstraction du débit supérieur, dans la région amont, par suite de la durée plus courte du flot. Les matières qui sont donc entraînées au flot sont plus volumineuses et sont à plus gros grains que celles qui sont reportées vers l'aval pendant le jusant. Par suite de cette circonstance, il se dépose à chaque marée, en commençant par l'amont, un certain volume d'alluvions qui produit à la longue l'ensablement complet du fleuve.

C'est aux deux causes définies ci-dessus, qui commencent toutes les deux leur action par l'amont, qu'il faut attribuer la disparition des fleuves à marée. En résumé, le mouvement oscillatoire de la marée fluviale tend à s'éteindre au même titre que le mouvement pendulaire et il faut une énergie supplémentaire, comme un courant d'amont assez important ou un travail de dragage, pour conserver au fleuve toute sa puissance hydraulique.

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

Nous avons figuré à la planche XIV le diagramme des largeurs à mi-marée. Ce diagramme montre que les largeurs varient d'un point à l'autre du fleuve, et parfois d'une manière très appréciable sur une distance très courte. Cela est principalement le cas entre Anvers et Baesrode et dans le coude de Bath, où il y a même une différence considérable entre la largeur à marée basse : 3 000 mètres et celle à marée haute : 10.000 mètres.

L'étude par observation directe des marées montre que l'amplitude de l'onde fluviale ne suit pas exactement les variations de la largeur du fleuve, mais qu'elle est régularisée par des écoulements secondaires dont les lois sont inconnues

et par conséquent dont il n'a pas été tenu compte dans la théorie des marées fluviales. La hauteur totale de la marée ne dépend donc pas de la largeur mesurée exactement au point considéré, mais d'une largeur moyenne qui est en rapport avec l'allure générale du diagramme des largeurs véritables. Quelle est cette largeur moyenne? La théorie ne permet pas de répondre à cette question. Nous pourrions opérer ici comme pour les profondeurs variables du fleuve, c'est-à-dire substituer au diagramme des largeurs vraies, une courbe dont l'allure générale et la surface soient les mêmes que celles du diagramme; mais, cette courbe s'écarterait forcément en certains points du fleuve d'une manière notable de la largeur vraie et ne s'y prêterait pas à une vérification sérieuse de la hauteur de la marée. Nous avons préféré vérifier la loi de l'amplitude en calculant les largeurs du fleuve, qui correspondent aux hauteurs de marée observées et en les comparant à celles qui existent réellement.

SECTION FLESSINGUE-RUPEL.

Flessingue. — Données :

Amplitude : 3^m.68.

Profondeur moyenne à mi-marée : 13 mètres.

Section d'équilibre à marée haute : 86.000 mètres carrés.

Largeur théorique du fleuve l :

$$l = \frac{86000}{15 + \frac{3.68}{2}} = 5795^m.$$

Terneuzen. — Données :

Amplitude : 3^m.94.

Profondeur moyenne à mi-marée : 10^m.80.

Valeur de a pour la section Flessingue-Terneuzen : 0.1188 (voir calcul des sections).

Section d'équilibre à marée haute : 59.950 mètres carrés.

Le coefficient de réduction φ est égal à :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0.125}{0.1188} \left(\frac{1}{10.8} - \frac{1}{15} \right)} = \frac{1}{1 + 0.01651} = 0.983.$$

La largeur théorique du fleuve l_2 à Terneuzen est donnée par la relation :

$$3.94 = 0.983 \times 3.68 \times \frac{15}{10.8} \sqrt{\frac{5795}{l_2} \times \frac{59950}{86000}}$$

$$l_2 = 4940^m.$$

Hansweert. — Données :

Amplitude : 4^m.16

Profondeur moyenne à mi-marée : 8^m.98.

Valeur de a pour la section Terneuzen-Hansweert : $a = 0.1188$ (voir calcul des sections).

Section d'équilibre à marée haute : 40785 mètres carrés.

Coefficient de réduction φ :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0.125}{0.1188} \left(\frac{1}{8.98} - \frac{1}{15} \right)} = \frac{1}{1 + 0.0362} = 0.964.$$

Largeur théorique du fleuve l_2 :

$$4.16 = 0.964 \times 3.68 \times \frac{15}{8.98} \sqrt{\frac{5795}{l_2} \times \frac{40785}{86000}}$$

$$l_2 = 4250^m.$$

Bath. — Données :

Amplitude : 4^m.41.

Profondeur moyenne à mi-marée : 4^m.5.

Valeurs des coefficients a entre Hansweert et Bath : 0.1188 et 0.4 (voir calcul des sections).

Section d'équilibre à marée-haute : 18172 mètres carrés.

Coefficient de réduction φ :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0.125}{0.1188} \left(\frac{1}{8.5} - \frac{1}{15} \right) + \frac{0.125}{0.4} \left(\frac{1}{4.5} - \frac{1}{8.5} \right) + \frac{0.125}{4.5^2} \times 2}$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0.0427 + 0.0327 + 0.0124} = \frac{1}{1 + 0.0878} = 0.918.$$

Largeur théorique du fleuve :

$$4.41 = 0.918 \times 3.68 \times \frac{15}{4.5} \sqrt{\frac{5795}{l_2} \times \frac{18172}{86000}}$$

$$l_2 = 6015^m.$$

Lillo. — Données :

Amplitude : 4^m.45.

Profondeur moyenne à mi-marée : 8^m.03.

Section d'équilibre à marée-haute : 8879 mètres carrés.

Valeur du coefficient a entre Bath et Lillo : $a = 0.706$.

Coefficient de réduction φ :

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,0427 + 0,0327 + \frac{0,125 \times 7}{20,25} + \frac{0,125}{0,706} \left(\frac{1}{4,5} - \frac{1}{8,05} \right) + \frac{0,125 \times 1}{8,05^2}}$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,0427 + 0,0327 + 0,0432 + 0,0173 + 0,0019} = \frac{1}{1,1378} = 0,878.$$

Largeur théorique du fleuve :

$$4,43 = 0,878 \times 3,68 \times \frac{15}{8,05} \sqrt{\frac{5795}{l_2} \times \frac{8879}{86000}}$$

$$l_2 = 827^m.$$

Fort Philippe. — Données :

Amplitude : 4^m,41.

Profondeur moyenne à mi-marée : 8^m,03.

Section d'équilibre à marée haute : 7042 mètres carrés.

Coefficient de réduction φ :

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,0427 + 0,0327 + 0,0432 + 0,0173 + \frac{0,125 \times 7,65}{8,05^2}}$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,1359 + 0,0148} = \frac{1}{1 + 0,1507} = 0,868.$$

Largeur théorique du fleuve :

$$4,41 = 0,868 \times 3,68 \times \frac{15}{8,05} \sqrt{\frac{5795}{l_2} \times \frac{7042}{86000}}$$

$$l_2 = 654^m.$$

Anvers. (9km.95 de Fort Philippe). — Données :

Amplitude : 4^m,36.

Profondeur moyenne à mi-marée : 8^m,03.

Section d'équilibre à marée haute : 4983 mètres carrés.

Coefficient de réduction φ :

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,0339 + \frac{0,125 \times 17,60}{8,05^2}} = \frac{1}{1,1359 + 0,0341} = 0,853.$$

Largeur théorique du fleuve :

$$4,36 = 0,853 \times 3,68 \times \frac{15}{8,05} \sqrt{\frac{5795}{l_2} \times \frac{4983}{86000}}$$

$$l_2 = 439^m.$$

Hemixem. — Données :

Amplitude : 4^m,31.

Profondeur moyenne à mi-marée : 8^m,03.

Section d'équilibre à marée haute : 3565 mètres carrés.

Coefficient de réduction φ .

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,1359 + \frac{0,125 \times 27,225}{8,05^2}} = \frac{1}{1,1559 + 0,0527}$$

$$\varphi = \frac{1}{1,1886} = 0,841.$$

Largeur théorique du fleuve :

$$4,31 = 0,841 \times 3,68 \times \frac{15}{8,05} \sqrt{\frac{5795}{l_2} \times \frac{5565}{86000}}$$

$$l_2 = 525 \text{ mètres.}$$

Tableau 7. — Tableau récapitulatif des largeurs vraies et calculées.

Stations.	Largeurs		Observations.
	calculées.	moyennes existantes (2).	
Flessingue	5795	5795	(1) Le point considéré est pris à 9.95 Km. en amont de Fort Philippe, c'est-à-dire en dehors de la fosse qui existe en rade d'Anvers.
Terneuzen	4940	5136	
Hansweert	4250	4232	
Bath	6015	5122	
Lillo	827	794	(2) Les largeurs moyennes sont calculées sur 1 Km. de longueur du fleuve : 500 m. en aval et 500 m. en amont de la station considérée.
Fort Philippe	654	690	
Anvers (1)	459	415	
Hemixem	325	318	

Si nous portons sur le diagramme des largeurs de la planche XIV les largeurs calculées du tableau 7 et si nous réunissons par une courbe les extrémités des ordonnées ainsi obtenues, nous voyons qu'il y a une concordance très satisfai-

sante entre la loi des largeurs théoriques et celle des largeurs vraies.

La vérification de l'amplitude de la marée au droit du Rupel n'est pas aussi simple qu'aux autres points de l'Escaut, car l'énergie de l'onde fluviale y diminue brusquement et il est impossible d'y définir avec exactitude la largeur du fleuve par suite du débouché d'un affluent à marée. Tout ce qui peut être fait en ce point : c'est déterminer l'amplitude théorique de la marée immédiatement en amont du confluent de manière à réaliser exactement la section d'égale vitesse, soit 3153 mètres carrés, calculée plus haut. La hauteur, ainsi déterminée, aura la même signification que celle enregistrée à l'embouchure du fleuve devant Flessingue et pourra servir à la vérification de la loi de l'amplitude depuis le Rupel jusqu'à la Durme.

Déterminons d'abord la section ϵ'_1 immédiatement en amont du Rupel qui soit à l'énergie de l'onde fluviale comme la section ϵ en aval du confluent est à l'énergie de l'onde marée en ce point.

La section ϵ'_1 satisfait à la relation :

$$\frac{F_1 + A_1}{\epsilon'_1} \times h = c$$

C étant la valeur de la constante immédiatement en aval du Rupel. Nous avons d'autre part les formules 49, 51 et 52 déterminées plus haut.

$$\frac{F_1 + A_1}{\epsilon'_1} \times h = \frac{F_2 + A_2}{\epsilon_2} = c' \quad (49)$$

$$(F_1 + A_1 + F_2 + A_2) h = c \epsilon \quad (51)$$

$$c' = c \frac{\epsilon}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \quad (52)$$

c' est la valeur de la constante immédiatement en amont du Rupel. Ce qui permet d'écrire les deux relations suivantes :

$$\epsilon'_1 = \epsilon \frac{F_1 + A_1}{F_1 + A_1 + F_2 + A_2} \quad (a)$$

$$\epsilon'_1 = \epsilon \frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \quad (b)$$

ou bien en remplaçant $\epsilon = \epsilon_1$ par sa valeur : 3153 mètres.

$$\epsilon'_1 = 3153 \frac{F_1 + A_1}{F_1 + A_1 + F_2 + A_2} \quad (a)'$$

$$\epsilon'_1 = 3153 \frac{3153}{3153 + \epsilon_2} \quad (b)'$$

En appliquant, soit l'une soit l'autre formule, on peut trouver la valeur de ϵ'_1 . Comme les études de M. l'ingénieur en chef Directeur Van Brabandt donnent d'une manière très exacte la valeur des débits de flot et d'amont, nous ferons usage de la formule (a)' :

$$F_1 + A_1 + F_2 + A_2 = 40.004.400 \text{ m}^3$$

$$F_1 + A_1 = 29.520.940 \text{ m}^3.$$

(Voir vérification de la loi des débits.)

$$\epsilon'_1 = 3153 \times \frac{29.520.940}{40.004.400} = 2323 \text{ m}^2.$$

L'amplitude de l'onde marée et la largeur du fleuve correspondant à la section 3153 mètres carrés, immédiatement en amont du Rupel, sont données par les deux équations

$$1. \left\{ \begin{array}{l} h_1 = \varphi \times 3,68 \times \frac{15}{5,4} \sqrt{\frac{5795}{l_1}} \times \frac{2323}{86000} \\ 5,4 \times l_1 + l_1 \times \frac{h_1}{2} = 3153. \end{array} \right.$$

En vue de faciliter les calculs, nous avons supprimé dans les équations ci-dessus les triangles supplémentaires résultant de l'inclinaison des talus, qui sont situés au-dessus du niveau de mi-marée, et dont il faudrait tenir compte pour déterminer exactement la surface de la section ; mais comme ces triangles sont très petits vis-à-vis de la surface totale de la section, l'erreur ainsi commise n'est pas appréciable en pratique.

$$\varphi = \frac{1}{1 + N + \frac{0,125}{1} \left(\frac{1}{5,4} - \frac{1}{8,03} \right)}$$

N étant le second terme du dénominateur de la fonction φ pour le poste d'Hemixem, soit : 0.1886.

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,1886 + 0,0076} = 0,855$$

$$2. \left\{ \begin{array}{l} h_1 = 0,855 \times 3,68 \times \frac{15}{5,4} \sqrt{\frac{5795}{l_1}} \times \frac{2323}{86000} \\ l_1 \times 5,4 + l_1 \times \frac{h_1}{2} = 3153 \end{array} \right.$$

$$h_1 = 4^m,58$$

$$l_1 = \frac{2 \times 3153}{10,8 + 4,58} = 411 \text{ mètres.}$$

Les éléments dont il faut donc tenir compte, en amont du Rupel, pour la vérification de la loi de l'amplitude sont :

Section : $\epsilon_1 = 3155$ mètres carrés.

Largeur $l_1 = 411$ mètres.

Hauteur de la marée $h_1 = 4^m.58$.

SECTION RUPEL-DURME.

Tamise. — Données :

Amplitude : $4^m.08$.

Profondeur moyenne à mi-marée : $5^m.15$.

Valeur de a pour la section Rupel-Durme : 0.0381 .

Section d'équilibre à marée haute : 2.080 mètres carrés.

Coefficient de réduction φ :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0.125}{0.0381} \left(\frac{1}{5.15} - \frac{1}{5.4} \right)} = \frac{1}{1 + 0.0295} = 0.97.$$

Largeur théorique du fleuve :

$$4.08 = 0.97 \times 4.58 \times \frac{5.4}{5.15} \sqrt{\frac{411}{l_2} \times \frac{2080}{3155}}$$

$$l_2 = 354 \text{ mètres.}$$

Thielrode. — Données :

Amplitude : $3^m.99$.

Profondeur moyenne à mi-marée : $5^m.04$.

Valeur de a pour la section Rupel-Durme : 0.081 .

Section d'équilibre à marée haute : 1690 mètres carrés.

Coefficient de réduction φ :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0.125}{0.0381} \left(\frac{1}{5.04} - \frac{1}{5.40} \right)} = \frac{1}{1 + 0.0427} = 0.958.$$

Largeur théorique du fleuve :

$$3.99 = 0.958 \times 4.58 \times \frac{5.4}{5.04} \sqrt{\frac{411}{l_2} \times \frac{1690}{3155}}$$

$$l_2 = 306 \text{ mètres.}$$

Tableau 8. — Tableau récapitulatif des largeurs vraies et calculées.

Stations.	Largeurs		Observations.
	calculées.	moyennes vraies (1).	
Tamise	354	294	(1) Voir notice du tableau 7.
Thielrode	306	244	

En regard de la Durme il faut opérer comme au droit du Rupel.

$$F_1 + A_1 + F_2 + A_2 = 16.665.000 \text{ m}^5$$

$$F_1 + A_1 = 12.885.440 \text{ m}^5$$

$$\epsilon = \epsilon_1 = 1556 \text{ m}^2.$$

(Voir vérification de la loi des débits.)

$$\epsilon'_1 = 1556 \times \frac{12.885.440}{16.665.000} = 1202 \text{ m}^2.$$

L'amplitude de l'onde marée et la largeur du fleuve correspondant à la section d'égale vitesse : 1556 mètres carrés sont données par les deux équations :

$$1. \left\{ \begin{array}{l} h_1 = \varphi \times 4.58 \times \frac{5.4}{5} \sqrt{\frac{411}{l_1} \times \frac{1202}{3155}} \\ l_1 \left(5.00 + \frac{h_1}{2} \right) = 1556 \end{array} \right.$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0.125}{0.0381} \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{5.4} \right)} = 0.953.$$

$$2. \left\{ \begin{array}{l} h_1 = 0.953 \times 4.58 \times \frac{5.4}{5} \sqrt{\frac{411}{l_1} \times \frac{1202}{3155}} \\ l_1 = (10.00 + h_1) = 3112 \end{array} \right.$$

$$h_1 = 3^m.95.$$

$$l_1 = \frac{3112}{10 + 3.95} = 223 \text{ mètres.}$$

Les données dont il faut donc tenir compte en amont de la Durme sont :

Section $\epsilon_1 = 1.556$ mètres carrés.

Largeur $l_1 = 223$ mètres.

Amplitude de la marée $h_1 = 3^m.95$.

SECTION DURME-GAND.

Nous disposerons les calculs comme pour la partie aval de l'Escaut, sauf à Wetteren et à Gand où la largeur du fleuve varie régulièrement et où il est possible de déterminer assez exactement la largeur dont il faut tenir compte dans le calcul de l'amplitude, soit : 52^m.86 à Wetteren et 33 mètres à Gand.

Baesrode. — Données :

Amplitude : 3^m.36.

Profondeur moyenne à mi-marée : 4^m.30.

Valeur de a pour la section Durme-Baesrode : 0,079.

Section d'équilibre à marée haute : 771 mètres carrés.

Coefficient de réduction φ :

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0,125}{0,079} \left(\frac{1}{4,5} - \frac{1}{5,0} \right)} = \frac{1}{1 + 0,0507} = 0,951.$$

Largeur théorique du fleuve :

$$5,36 = 0,951 \times 3,95 \times \frac{5}{4,5} \sqrt{\frac{225}{l_2} \times \frac{771}{1556}}$$

$$l_2 = 187^m.$$

Termonde. — Données :

Amplitude : 2^m.76.

Profondeur moyenne à mi-marée : 4^m.60.

Valeurs de a pour la section Baesrode-Termonde : 0,275 et 0,1186.

Section d'équilibre à marée haute : 353 m²,1.

Coefficient de réduction φ :

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,0507 + \frac{0,125}{0,275} \left(\frac{1}{4,5} - \frac{1}{5,4} \right) + \frac{0,125}{0,1186} \left(\frac{1}{4,6} - \frac{1}{5,4} \right)}$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,0507 + 0,0448 + 0,0184} = \frac{1}{1 + 0,0839} = 0,921.$$

Largeur théorique du fleuve :

$$276 = 0,921 \times 3,95 \times \frac{5}{4,6} \sqrt{\frac{225}{l_2} \times \frac{353,1}{1556}}$$

$$l_2 = 104^m.$$

Schoonaerde. — Données :

Amplitude : 2^m.18.

Profondeur moyenne à mi-marée : 4^m.09.

Valeur de a pour la section Termonde-Gentbrugge : 0,0477.

Section d'équilibre à marée haute : 139 m² 5.

Coefficient de réduction φ :

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,0839 + \frac{0,125}{0,0477} \left(\frac{1}{4,09} - \frac{1}{4,6} \right)}$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,0839 + 0,0699} = \frac{1}{1 + 0,1538} = 0,865.$$

Largeur théorique du fleuve :

$$2,18 = 0,865 \times 3,95 \times \frac{5}{4,09} \sqrt{\frac{225}{l_2} \times \frac{139,5}{1556}}$$

$$l_2 = 75^m,6.$$

Wetteren. — Données :

Largeur moyenne du fleuve : 52^m.86.

Profondeur moyenne à mi-marée : 3^m.51

Valeur de a pour la section Termonde-Gentbrugge : 0,0477.

Section d'équilibre à marée haute 37 m² 49.

Coefficient de réduction φ :

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,0839 + \frac{0,125}{0,0477} \left(\frac{1}{3,51} - \frac{1}{4,6} \right)}$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,0839 + 0,177} = \frac{1}{1 + 0,2609} = 0,793.$$

Amplitude théorique :

$$h_2 = 0,793 \times 3,95 \times \frac{5}{3,51} \sqrt{\frac{225}{52,86} \times \frac{37,49}{1556}}$$

$$h_2 = 1^m,42.$$

Gentbrugge. — Données :

Largeur moyenne : 33 mètres.

Profondeur moyenne à mi-marée : 2^m.80

Valeur de a pour la section Termonde-Gentbrugge : 0,0477.

Section d'équilibre à marée haute : 4 m² 55.

Coefficient de réduction φ :

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,0839 + \frac{0,125}{0,0477} \left(\frac{1}{2,8} - \frac{1}{4,6} \right)}$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,0839 + 0,367} = \frac{1}{1 + 0,4509} = 0,688.$$

Amplitude théorique :

$$h_2 = 0,688 \times 3,95 \times \frac{5}{2,8} \sqrt{\frac{223}{33} \times \frac{4,55}{1556}}$$

$$h_2 = 0^m,68.$$

Tableau récapitulatif 9.

STATIONS.	LARGEURS		AMPLITUDES	
	calculées.	moyennes vraies.	calculées.	moyennes vraies.
Baesrode . . .	187m.	156m.		
Termonde. . .	104	97		
Schoonaerde . .	73.6	77		
Wetteren . . .		52,86	1 ^m .48	1 ^m .57
Gentbrugge . .		33	0.68	1.42

Si nous examinons les résultats des calculs depuis le Rupel jusque Gand et surtout si nous comparons la courbe des largeurs théoriques au diagramme des largeurs vraies (planche XIV), nous voyons que la loi de l'amplitude se vérifie d'une manière très satisfaisante pour toute cette partie de l'Escaut, exception faite pour Gentbrugge, où il y a une différence de près de 100 p. c. Cet énorme écart provient de ce que l'amplitude calculée correspond à une onde marée qui remonterait librement le fleuve, alors qu'à Gentbrugge, l'onde fluviale est arrêtée contre les parois d'un barrage. Par suite de cette circonstance, l'énergie cinétique de l'onde de translation n'est plus absorbée par les résistances de frottement du fleuve, mais doit être amortie devant le barrage par une résistance locale ou doit être transformée en énergie potentielle. Il n'est guère possible de détruire l'énorme quantité d'énergie cinétique, encore disponible devant le barrage de Gentbrugge, par des résistances locales suffisamment grandes. Il faut donc que l'énergie cinétique se transforme en énergie potentielle par une augmen-

tation de la hauteur de l'onde. Comme l'énergie cinétique est égale à l'énergie potentielle, l'augmentation de l'amplitude de la marée doit être sensiblement égale à l'amplitude même, c'est ce qui se vérifie à Gentbrugge. C'est encore à l'existence du barrage de Gentbrugge qu'il faut attribuer le relèvement du lieu géométrique de marée haute à partir de Wetteren, et une montée moins rapide du lieu géométrique de marée basse, à partir du même point (planche XVI).

Si on calcule à Wetteren et à Gentbrugge les largeurs théoriques correspondant aux amplitudes observées, on trouve :

Wetteren :

$$1,57 = 0,795 \times 3,95 \times \frac{5}{3,51} \sqrt{\frac{223}{l_2} \times \frac{37,49}{1556}}$$

$$l_2 = 43^m,4.$$

Gentbrugge :

$$0,71 = 0,688 \times 3,95 \times \frac{5}{2,8} \sqrt{\frac{223}{l_2} \times \frac{4,55}{1556}}$$

$$l_2 = 30,90.$$

Ce sont les dimensions du tableau 9 que nous avons portées sur le diagramme des largeurs.

Considérations particulières. — Nous verrons plus loin, par l'étude du niveau moyen de l'Escaut maritime, que l'influence du débit d'amont est inappréciable entre l'embouchure à Flessingue et Baesrode, de sorte que le niveau de mi-marée pour cette partie du fleuve reste sensiblement invariable à toute époque de l'année. En amont de Baesrode, au contraire, les grandes pluies de l'hiver ont pour effet de relever le niveau de mi-marée et les sécheresses de l'été de l'abaisser, de sorte que la profondeur du fleuve est plus grande en hiver qu'en été. Comme la hauteur de l'onde fluviale est inversement proportionnelle à la profondeur moyenne du fleuve, l'amplitude de la marée doit être invariable pendant toute l'année, depuis Flessingue jusque Baesrode, et être plus grande l'été que l'hiver en amont de Baesrode. C'est ce qui se vérifie parfaitement sur l'Escaut maritime, comme on peut le voir par l'examen du tableau 10, qui donne les cotes de niveau de la mi-marée et les amplitudes moyennes observées pendant les périodes d'été et d'hiver de la décade 1891-1900.

Tableau 10.

Stations.	Niveau moyen de la mi-marée pendant la décade 1891-1900.		Amplitude moyenne de la marée pendant la décade 1891-1900.	
	Été.	Hiver.	Été.	Hiver.
Flessingue	2 ^m ,22	2 ^m ,20	3 ^m ,70	3 ^m ,66
Terneuzen	2,23	2,21	3,94	3,92
Hansweert	2,21	2,20	4,16	4,14
Bath	2,36	2,34	4,39	4,39
Lillo	2,51	2,47	4,39	4,46
Fort Philippe	2,55	2,52	4,35	4,43
Anvers	2,58	2,55	4,37	4,42
Hemixem	2,58	2,57	4,34	4,36
Rupel	2,52	2,55	4,27	4,26
Baesrode	2,76	2,85	3,48	3,28
Termonde	2,91	3,09	2,91	2,64
Wetteren	2,86	3,37	1,91	1,51
Gand	2,99	3,80	1,98	1,54

La différence de hauteur entre la marée d'été et celle d'hiver se remarque déjà à partir de Baesrode, mais elle est très importante à Wetteren et à Gand. L'écart existant à Gand ne provient toutefois pas uniquement du relèvement du niveau de mi-marée en hiver, mais aussi de l'ouverture du barrage pendant les crues d'hiver, qui a pour conséquence de diminuer de moitié l'amplitude de la marée.

Nous avons vu au paragraphe précédent que la section d'égale vitesse à Bath mesure 18172 mètres carrés, tandis que la section existante est de 30570 mètres carrés et donne lieu à une réduction notable de la vitesse moyenne du courant

de marée. On peut se proposer de réaliser la section d'égale vitesse, non pas dans le but de faire disparaître le haut-fond de Bath, puisqu'il est nécessaire à l'équilibre dynamique du fleuve, mais en vue d'augmenter la vitesse de l'eau et de faciliter l'entretien de la passe navigable. La loi de l'amplitude permet de résoudre ce problème. La hauteur de la marée et la largeur du fleuve sont données, dans ce cas, par les deux équations suivantes :

$$h_1 = \varphi \times 3,68 \times \frac{15}{4,5} \sqrt{\frac{5795}{l_1} \times \frac{18172}{86000}}$$

$$l_1 \left(4,5 + \frac{h_1}{2} \right) = 18172$$

$\varphi = 0,918$ (voir calcul de l'amplitude de la marée à Bath).

$h_1 = 7^m,25$ (hauteur actuelle 4,41 mètres).

$$l_1 = \frac{2 \times 18172}{9 + 7,25} = 2259^m \text{ (largeur actuelle environ 6000 m.)}$$

Il résulte des calculs ci-dessus que la réalisation de la section d'égale vitesse augmente considérablement la hauteur de la marée et diminue dans une proportion non moindre la largeur du fleuve. Comme le niveau de mi-marée varie fort peu par suite du changement étudié, l'accroissement de la hauteur de la marée aura pour conséquence de diminuer la profondeur moyenne à basse mer d'environ :

$$\frac{7^m,25 - 4,41}{2} = 1^m,41$$

et d'augmenter de la même quantité celle de haute mer. Au point de vue de la navigation, la situation serait donc plus favorable à marée haute et plus mauvaise à marée basse.

En résumé, un rétrécissement du fleuve dans le coude de Bath, non accompagné de l'exécution des travaux nécessaires pour permettre d'abaisser le seuil sans nuire à l'équilibre dynamique du fleuve, doit être considéré comme un mauvais travail et pour ce motif doit être condamné.

(A suivre.)