

4

ROYAUME DE BELGIQUE

COMITE NATIONAL DE GEOGRAPHIE

COMMISSION DE L'ATLAS DE BELGIQUE

ATLAS DE BELGIQUE

(PLANCHES 18^A et 18^B)

MER DU NORD
LITTORAL/ESTUAIRE DE L'ESCAUT
ESCAUT MARITIME

PAR

R. CODDE et L. DE KEYSER



1967

BEG

TENNECO OIL COMPANY
EXPLORATION RESEARCH
LIBRARY

056 87m>

Q56.87m2

10,652

75278

ROYAUME DE BELGIQUE

COMITE NATIONAL DE GEOGRAPHIE

COMMISSION DE L'ATLAS DE BELGIQUE

ATLAS DE BELGIQUE

(PLANCHES 18^A et 18^B)

MER DU NORD
LITTORAL/ESTUAIRE DE L'ESCAUT
ESCAUT MARITIME

PAR

R. CODDE et L. DE KEYSER



1967

TENNECO OIL COMPANY
EXPLORATION RESEARCH
LIBRARY

VLIZ (vzw)
VLAAMS INSTITUUT VOOR DE ZEE
FLANDERS MARINE INSTITUTE
Oostende - Belgium

Sorti des presses
de l'Institut Géographique Militaire
Abbaye de La Cambre — Bruxelles

Le Comité national de Géographie et la Commission de l'Atlas laissent aux auteurs l'entièvre responsabilité des opinions émises dans les articles destinés aux Commentaires de l'Atlas de Belgique.

Texte original remis à la Commission de l'Atlas le 11 janvier 1966.

MER DU NORD ET ESCAUT MARITIME

La double planche — 18^A, mer du Nord, Littoral, Estuaire de l'Escaut et 18^B, Escaut Maritime — ainsi que le présent commentaire exposent les phénomènes maritimes qui intéressent la Belgique. Ils décrivent les mouvements que donnent à l'eau les marées et les courants; ils font connaître les qualités de l'eau marine, notamment sa salinité, sa température et sa densité.

Ils donnent le relief et la nature des fonds marins et spécialement les profondeurs; ils exposent en outre les conditions de navigation dans la mer du Nord, particulièrement à l'approche des ports belges, ainsi que celles qui se présentent dans l'Escaut maritime, sur les voies d'accès aux grandes écluses, portes d'entrée des navires de mer.

Ils traitent aussi des extensions portuaires, projetées ou en voie d'exécution, à Ostende, Zeebrugge et Anvers, ainsi que des problèmes que pose l'amélioration des valeurs nautiques de leurs chenaux d'accès.

Ce commentaire se termine par un exposé sommaire sur l'hydrologie du bassin maritime de l'Escaut.

I. — ETABLISSEMENT DES CARTES.

1. Canevas géographique.

Les planches 18^A et 18^B, sont basées sur des réductions de cartes hydrographiques, établies dans la projection de Mercator, du genre sécant. Comme on le sait, la projection se fait sur un cylindre qui coupe la sphère suivant un parallèle donné, que l'on conserve sans déformation (parallèle de référence).

Les parallèles de référence adoptés sont respectivement :

- pour la planche 18^A, celui de Zeebrugge (51°21');
- pour la planche 18^B, celui d'Anvers (51°13').

Ils sont projetés à 1 : 125.000.

La sphère de projection adoptée, ayant pour rayon la grande normale du parallèle de référence, est tangente à l'éllipsoïde géodésique (Hayford), le long de ce parallèle.

2. Historique.

Nous signalons, parmi les documents anciens concernant la zone littorale belge et l'Escaut maritime, ceux de Mercator (1512-1594), géographe belge, cartographe et inventeur de la projection qui porte son nom, et ceux de Snellius (1591-1626), géographe néerlandais, technicien du levé des cartes et créateur de la triangulation calculée.

Il faut attendre le début du XIX^e siècle, pour que paraissent les premières cartes hydrographiques, basées sur les résultats de levés bathymétriques complets et sur des techniques rationnelles.

La première fut publiée à Paris, en 1817, par le Dépôt de la Marine; elle est intitulée : Carte réduite des Pays-Bas, d'Ostende à Hellevoetsluis, par Beautemps-Beaupré, hydrographe de la Marine, membre de l'Institut de France.

Cette carte, exécutée en projection de Mercator, à l'échelle moyenne de 1 : 86.400, résulte de levés effectués depuis 1799 jusque 1811.

Dans l'« Avertissement » qui figure en vignette, l'auteur cite le général hollandais Krayenhoff, auquel il emprunta des données relatives aux « positions terrestres ». Les sondes sont données en pieds de France et « réduites au niveau des plus basses mers pour chaque point sondé ».

Quant à la première carte de l'Escaut, également publiée à Paris, fort probablement à la même époque, sous le titre de : « Reconnaissance des cours du Hont ou Wester Schelde depuis Antwerpen (Anvers) jusqu'à l'embouchure », elle fut également levée par Beautemps-Beaupré, en 1799 et 1800, exécutée au 1 : 41.500, sous forme de plan, dépourvue de canevas géographique. Les sondes, exprimées en pieds de France, sont « réduites à la plus basse mer observée à l'époque des équinoxes ».

Dans les débuts du XIX^e siècle, les méthodes du levé hydrographique, bénéficiant de l'incessante évolution progressive des sciences de base, se perfectionnent considérablement et ne tardent pas à créer une documentation qui, en raison de vissitudes historiques reste, du côté belge, fragmentaire et forcément locale.

Aussi n'est-ce qu'après l'achèvement de la première triangulation du Royaume et du premier niveling général, connu sous le nom de « Nivellement des Travaux publics » dont l'origine est le « zéro Z », c'est-à-dire à partir de 1866, que les bases du levé hydrographique, rationnellement conçu, purent être établies. Il devint dès lors possible de réaliser la coordination cartographique indispensable entre les importants levés hydrographiques néerlandais et les nôtres et de produire finalement des cartes générales, entièrement rattachées au canevas géographique belge, de l'Escaut et du littoral jusqu'à l'estuaire.

Celles-ci sont dressées dans la projection de Mercator, généralement au 1 : 000.000 pour la côte et au 1 : 50.000, pour le fleuve, de Vlissingen (1) à Anvers. Leur canevas géographique, rattaché au réseau géodésique de la triangulation du Royaume dépend, dès 1959 pour les levés de la côte et dès 1961 pour ceux de l'Escaut, du système géodésique européen unifié des « coordonnées européennes ».

II. — LA MAREE.

1. Historique.

L'homme a remarqué très tôt le phénomène de la marée, mais il faut remonter très haut dans le temps pour en découvrir son premier témoignage, qui semble avoir été apporté par Pythéas (IV^e siècle av. J.-C.) qui fit connaître l'existence des marées de l'Atlantique, de la Manche et de la mer du Nord.

Posidonius (I^{er} siècle av. J.-C.), observa le caractère semi-diurne de la marée, pourtant très faible, du bassin oriental de la Méditerranée.

Pline l'Ancien (I^{er} siècle) nous a laissé une description de la marée, non seulement remarquable par la justesse des faits observés, mais surtout par la clairvoyance de ses idées sur la cause du phénomène, qu'il attribue à l'action du soleil et de la lune.

Newton (Sir Isaac, 1642-1727), par sa découverte de la loi de la gravitation, put donner l'explication rationnelle des causes de la marée. Il créa la « Théorie statique de la marée » qui, quoique insuffisante, ouvrit l'ère de la recherche scientifique dans ce vaste domaine.

(1) En français Flessingue.

Laplace (Marquis de, 1749-1827), s'inspirant de la théorie statique, créa la « Théorie dynamique des marées ». Elle fut améliorée par Poincaré (Henri, 1854-1912).

Harris, s'inspirant des vues de Laplace, imagina une théorie remarquablement féconde, basée sur les phénomènes de la résonance. Il divisa les vastes domaines océaniques en « systèmes de résonance », qu'il fit connaître en 1904. Parmi ceux-ci figurait celui de la mer du Nord, où il révéla l'existence de deux points amphidromiques, les points A et C de la figure 1, dont il indiqua la position d'une manière remarquablement approchée.

Sterneck, en 1920, compléta le système de la mer du Nord, en y ajoutant le point amphidromique B.

Ce système fut, en 1924, amélioré et définitivement fixé par Proudman et Doodson.

Mais c'est à Kelvin (Lord W., 1824-1907) et Darwin (Sir G., 1845-1912) que nous devons l'élaboration des méthodes modernes d'analyse, d'investigation et d'application qui ont conduit, entre autres, à la solution pratique de la prédiction rationnelle des marées.

2. Théorie.

Pour l'intelligence de ce qui suit, il faut rappeler l'essentiel des principes fondamentaux de la théorie de la marée.

Les oscillations périodiques du niveau de la mer, sont dues à l'attraction combinée de la lune et du soleil, dont la force varie suivant les positions relatives de ces astres par rapport à la terre. Leur ampleur dépend essentiellement de la parallaxe et la déclinaison luni-solaire.

La force d'attraction, proportionnelle à la masse de l'astre considéré, varie en raison inverse du cube de la distance. Elle passe par un maximum au périgée, dont la période est de 27 j 13 h pour la lune, de 365 j 06 h pour le soleil (révolution anomalistique).

L'action lunaire est, en moyenne, 2,2 fois plus forte que celle du soleil.

Les marées de la mer du Nord sont du type semi-diurne, parce que leur période moyenne est de 12 h 25 m, durée de l'intervalle qui sépare deux pleines mers successives, de sorte qu'elles présentent généralement deux pleines mers et deux basses mers par jour.

L'action luni-solaire est maximum aux syzygies (pleine lune et nouvelle lune), qui engendrent les marées de vive-eau. Elles sont très fortes aux équinoxes, si la lune est à son périgée et sur l'écliptique.

Cette action est minimum aux quadratures (premier et dernier quartiers), qui engendrent les marées de morte-eau.

Sur nos côtes, les marées de vive-eau et de morte-eau ont lieu environ 2,5 jours après les syzygies et quadratures (âge).

L'action luni-solaire agit également sur l'écorce terrestre qu'elle déforme, en créant une marée solide semi-diurne, d'assez faible amplitude, dont la valeur moyenne est de l'ordre de 0,30 m.

La marée, telle qu'on l'observe, se réduit finalement à la différence entre le mouvement vertical de la marée océanique et celui de la marée de l'écorce.

La lune et le soleil dans leur mouvement apparent subissent, au cours de leur mouvement orbital, de nombreuses variations dues, en ordre principal, aux variations de déclinaison, de parallaxe (distance) etc., dont chacune d'elles peut se traduire par l'influence d'une force susceptible de donner naissance à une onde élémentaire (marée partielle), dont la période peut être calculée. Ce qui précède est conforme au principe fondamental de la théorie dynamique de Laplace, qui dit que :

« Sous l'action d'une force périodique sinusoïdale, le niveau de la mer est animé d'un mouvement de même période » et que :

« Le mouvement résultant de plusieurs forces composées est la somme algébrique des mouvements que produirait chacune d'elles ».

Comme l'astronomie nous fait connaître tous les éléments de ces influences luni-solaires, nous pouvons, en nous inspirant des principes de Laplace, imaginer qu'une courbe de marée observée n'est autre que le résultat de la somme algébrique d'un nombre déterminé de courbes composantes, provenant d'autant de marées élémentaires agissant simultanément. Dans cette manière de voir, tout se passe comme si aux astres réels, lune et soleil, on avait substitué des astres fictifs capables, par leur action simultanée, de produire une marée identique à la marée observée.

Ces vues théoriques de Laplace conduisent à la conception de l'analyse harmonique de la marée, dont nous verrons une importante application au paragraphe consacré à la pré-diction des marées.

MAREES DE LA MER DU NORD.

Système amphidromique trinodal (A, B, C) de la composante lunaire principale : M_2 .

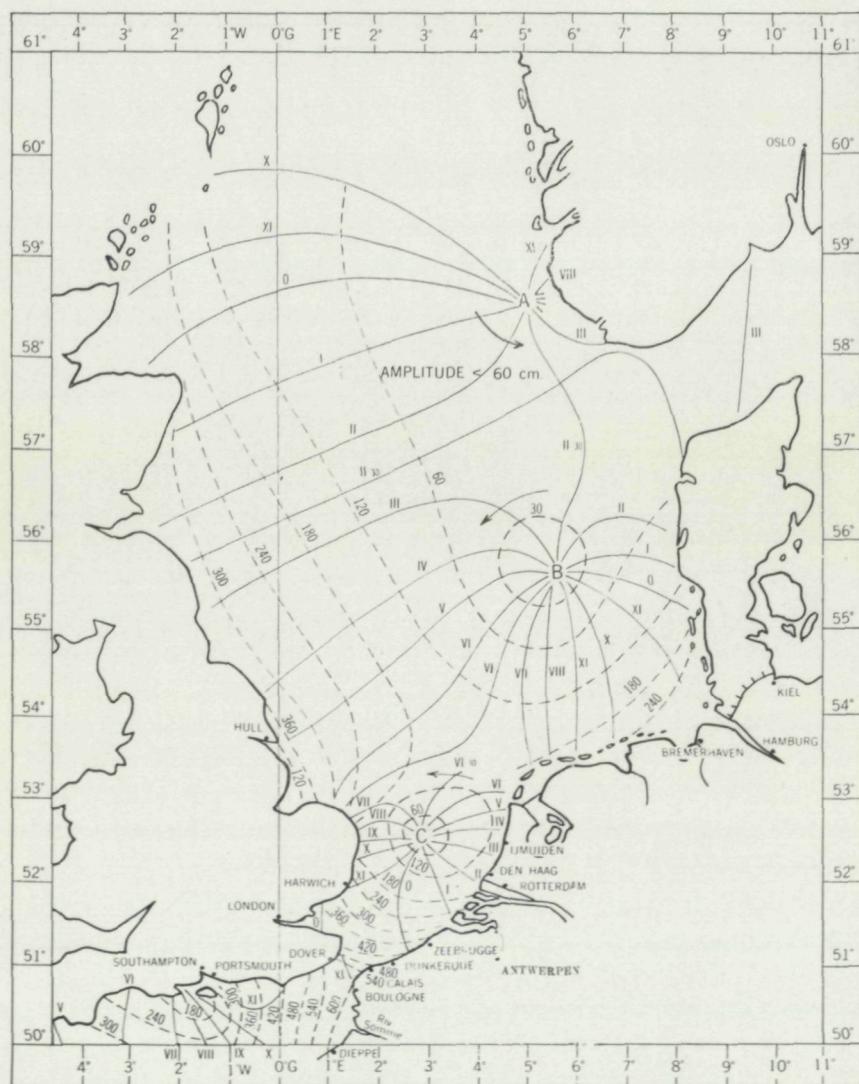


Fig. 1.

3. Les marées de la mer du Nord.

La mer du Nord est trop exiguë pour que l'attraction luni-solaire y exerce une influence marquante. La marée qu'on y observe s'explique par l'action d'ondes dérivées provenant de l'Atlantique.

Suivant la théorie moderne de la propagation de la marée, la mer du Nord, vaste étendue est un bassin de résonance, de caractère trinodal (*fig. 1*); les marées y prennent naissance et sont entretenues par les pulsations périodiques que lui communique, en ordre principal, l'onde de marée dérivée qui arrive de l'océan par le nord de l'Ecosse. Une autre onde dérivée débouche de la Manche; cette seconde onde, considérée généralement comme moins puissante, a la particularité d'être à peu près en phase avec celle du bassin C et de produire, par interférence avec cette dernière, un accroissement sensible des amplitudes, non seulement dans la zone du Pas-de-Calais mais, comme on l'admet généralement, le long de nos rivages, jusqu'au delta zélandais.

L'onde génératrice qui vient du nord, transmet son caractère semi-diurne aux marées qu'elle engendre dans les trois zones nodales, dans chacune desquelles on discerne, par suite de la rotation de la terre, une aire de faible étendue, appelée « point amphidromique », sorte de centre de giration autour duquel l'onde de marée se meut, dans le sens anti-horlogique, en l'espace de 12 h 25 m en moyenne. Il s'agit des trois points A, B, C, de la figure 1.

Aux points amphidromiques, l'amplitude est pratiquement nulle, tandis que les courants de marée y restent très sensibles.

La figure 1, montre la marée partielle engendrée par la seule onde semi-diurne M_2 , qui diffère quelque peu de la marée réelle ou totale. Aux points amphidromiques A, B, C, l'amplitude de l'onde semi-diurne principale, M_2 , est nulle et celle des autres ondes semi-diurnes y est très faible. Il n'en est pas de même des ondes supérieures (M_4 , M_6 , M_8 , ...) qui peuvent y entretenir une amplitude, d'ailleurs assez peu sensible, sauf au point C où l'influence de l'onde quart-diurne, M_4 , devient plus discernable (cf. II, 6).

4. Caractéristiques de la marée du littoral belge et néerlandais.

a) Système amphidromique.

La marée qui se propage le long du littoral belge et néerlandais jusqu'à l'île Texel (au nord de Den Helder) est régie par la zone de résonance méridionale de la mer du Nord (*Flemish Bight*) dont le point amphidromique C, est situé par : 52°32' de latitude et 2°55' de longitude E.G., à peu près à mi-distance des côtes anglaises et néerlandaises, à la hauteur du parallèle d'IJmuiden.

L'aspect giratoire du mouvement de l'onde de marée apparaît clairement par la disposition des lignes cotidales, issues du point amphidromique.

b) Lignes cotidales.

Les lignes cotidales de la figure 1 sont graduées de I à XII, en temps moyen lunaire et donnent l'image du mouvement de l'onde de marée partielle M_2 , dont l'effet est d'ailleurs nettement prépondérant (l'onde M_2 est engendrée par une lune fictive, dont la période est de 12 h 25 m). Aussi suffit-elle pour fixer les idées quant à la situation de la pleine mer, à tout moment.

Les lignes cotidales sont les lieux des points où la pleine mer se produit au même instant. Les chiffres romains donnent le temps lunaire moyen écoulé depuis le passage de la lune au méridien de Greenwich. Une heure lunaire = 1 h 02 m 05 s de temps moyen. La ligne cotidale, ainsi que le point amphidromique, sont des notions introduites par Whewell, (1784-1866), premier théoricien de la propagation des ondes de marée. La preuve expérimentale de l'existence du point C, est faite depuis 1910, par des observations directes et continues effectuées en ce lieu, au moyen du marégraphe plongeur, inventé à cet effet par l'ingénieur hydrographe français Favé. Cet appareil ingénieux y séjournait par 30 m de fond.

c) **Propagation. — Etablissement du port.**

La vitesse de propagation de la crête (marée haute) ou du creux (marée basse), de l'onde de marée le long du littoral, s'exprime le plus clairement, en citant les « établissements moyens » des principaux points de la côte.

Port	Etablissement moyen de la	
	pleine mer	basse mer
Dunkerque	h m 12 10	h m 6 50
Nieuport	0 00	7 00
Ostende	0 10	7 00
Zeebrugge	0 30	7 00
Vlissingen (1)	1 00	7 30
Hoek van Holland (2)	1 50	9 50

(1) A l'embouchure de l'Escaut.
(2) A l'entrée du « Nieuwe Waterweg », voie d'accès au port de Rotterdam.

L'établissement moyen du port est l'intervalle moyen, en temps universel, entre le passage de la lune au méridien de Greenwich et l'instant de la pleine ou de la basse mer. Observons que : 0 h 00 m \leqslant « Etablissement moyen » \leqslant 12 h. 25 m.

En considérant que Dunkerque se trouve à 161 km de Hoek van Holland, on peut estimer que sur ce trajet, l'ordre de grandeur de la vitesse moyenne de propagation du sommet de l'onde (pleine mer) est de 77 km/h (21 m/s), tandis que le creux (basse mer) suit à 53 km/h (14 m/s).

Cependant, sur le trajet Dunkerque-Vlissingen, en dépit de la présence des « Bancs des Flandres », la basse-mer se propage sensiblement plus vite que la pleine mer.

A priori, ce fait surprend quand on sait que la célérité d'une onde progressive varie comme la racine carrée de la profondeur. Mais quand on sait la complexité des hauts-fonds qui s'étalent sur ce trajet, on comprend que l'onde de marée y subisse des déformations, surtout lors de la basse-mer. On attribue ces perturbations à l'action de marées partielles, appelées ondes supérieures, qui apparaissent couramment sur les petits fonds.

En anglais, elles s'appellent : « Shallow water tides » et en néerlandais : « Ondiepwatergetijden ».

d) **Intensité de la marée (amplitude). — Variation de l'amplitude.**

L'intensité de la marée est caractérisée, en premier lieu, par son amplitude, différence de niveau entre la pleine mer et la basse mer qui suit. Elle varie en fonction de l'action lunisolaire qui, au cours du mois lunaire (révolution synodique) est la plus forte aux syzygies (vives-eaux) et la moins forte aux quadratures (mortes eaux) (cf. Les courbes de marées locales qui figurent sur les planches 18^A et 18^B).

Cette amplitude, pratiquement nulle aux points amphidromiques, augmente à mesure qu'on s'en éloigne, de sorte que le long de notre littoral, elle diminue d'ouest en est, jusqu'au Den Helder, où elle passe par un minimum, pour croître ensuite à nouveau quand on pénètre dans la zone B (*fig. 2*).

Il s'ensuit que, en direction de l'est, les niveaux de pleine mer descendent, tandis que ceux de basse mer montent.

Les quelques valeurs numériques qui suivent, fixent l'ordre de grandeur de ces variations d'amplitude.

AMPLITUDES MOYENNES DE LA MAREE LITTORALE DEPUIS LA MANCHE JUSQUE L'ILE TEXEL AVEC EMBRANCHEMENT DE L'ESCAUT MARITIME.

Amplitude moyenne de
vive-eau : (1) et (1')
morte-eau : (2) et (2')

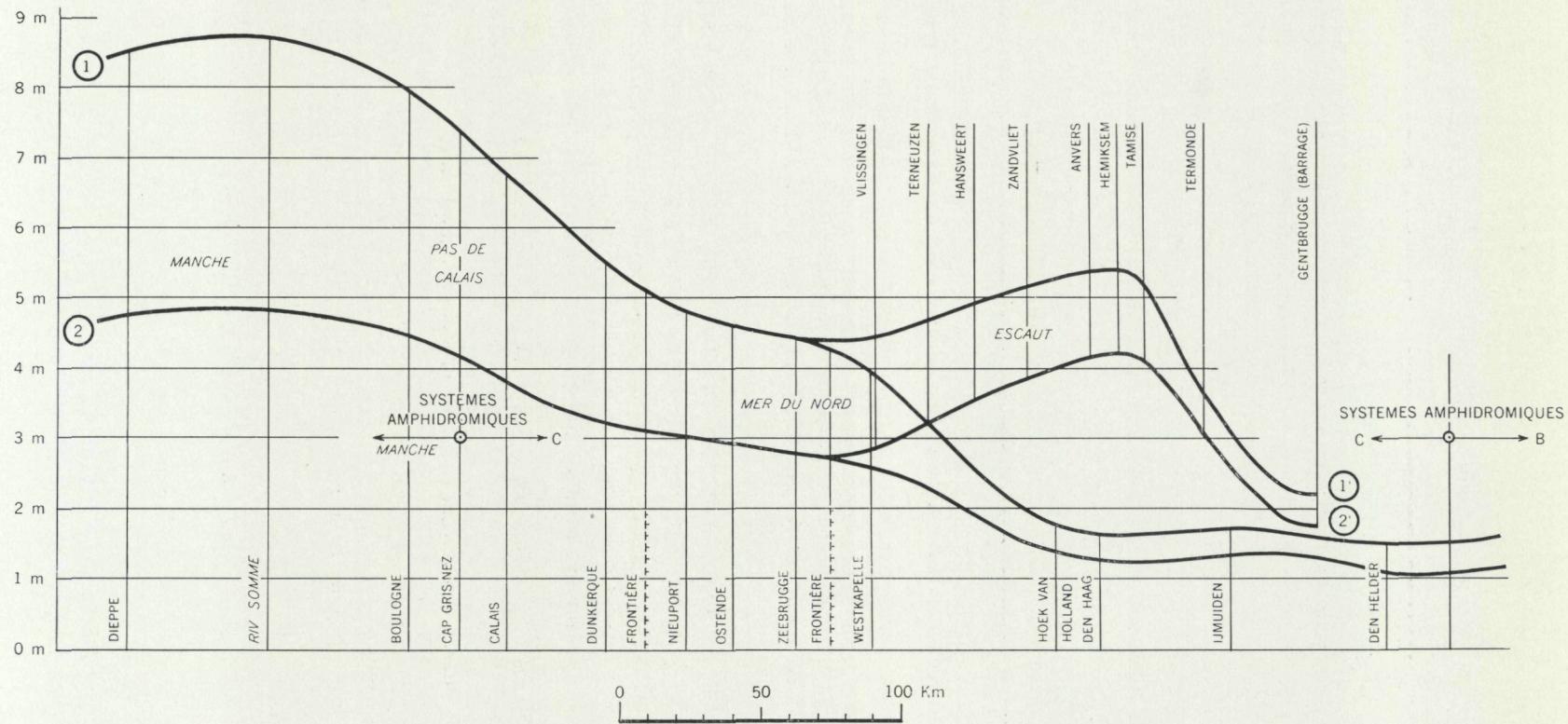


Fig 2

AMPLITUDES.

Ports	Moyennes de		de marée moyenne
	vive - eau	morte - eau	
Dunkerque	m 5,55	m 3,20	m 4,45
Nieuport	4,84	3,03	4,04
Ostende	4,68	2,93	3,90
Zeebrugge	4,43	2,78	3,68
Vlissingen	4,43	2,97	3,79
Hoek van Holland	1,75	1,37	1,56
Den Helder	1,52	1,05	1,34

e) Variation de la période de marée.

Les tableaux qui accompagnent les courbes de marées locales (cf. planches 18^A et 18^B), montrent que les périodes varient en moyenne, de 12 h 16 m aux vives-eaux, à 12 h 40 m aux mortes-eaux. Ces variations sont en corrélation avec celles des périodes dues à l'action lunaire, au cours de sa révolution synodique (29 j 12 h 22 m). En effet, l'intervalle de temps de deux passages consécutifs de la lune au méridien (supérieur ou inférieur) varie de 12 h 16 m aux syzygies, à 12 h 33 m aux quadratures.

L'action semi-diurne solaire intervient également, mais son effet est beaucoup moins important.

f) Inégalité diurne de la hauteur des marées.

L'inégalité diurne des hauteurs qu'on observe entre deux marées hautes ou basses consécutives, est due à l'action périodique déclinationnelle luni-solaire qui superpose à la variation semi-diurne, une faible variation diurne.

Il s'agit de l'influence des ondes élémentaires diurnes O₁ et K₁ (cf. II, 6).

Sur nos côtes, elles atteignent en moyenne, 0,15 m aux pleines mers et 0,25 m aux basses mers, valeurs qui correspondent aux inégalités moyennes d'équinoxe. Aux mortes-eaux d'été, lors des déclinaisons positives maxima de la lune, elles peuvent dépasser 0,50 m, dans les deux cas précités.

Ces valeurs numériques sont également valables pour l'Escaut, depuis l'estuaire jusqu'au Rupel, à partir d'où ces inégalités diminuent avec l'amplitude.

g) Inégalité de durée du « gagnant » et du « perdant ».

En mer du Nord, mer peu profonde, la courbe de la marée locale montre une dissymétrie par rapport à l'instant de la marée haute, en ce sens que la durée de la marée montante ou « gagnant » (flux) est plus courte que celle de la marée descendante ou « perdant » (reflux).

Le long de notre littoral et de l'Escaut maritime, ce phénomène se marque par les courbes de marées locales des planches 18^A et 18^B.

Sur le littoral belge, cette inégalité semble due à l'influence de l'onde quart-diurne, M₄, plutôt qu'à un effet de freinage lors de la marée basse lequel, en fait, n'existe pas (cf. II, 4, c).

h) Age de la marée.

L'âge de la marée est le retard que l'on observe entre l'instant de la syzygie ou de la quadrature et l'apparition de la marée la plus forte (vive-eau), ou la plus faible (morte-eau). Il représente une valeur locale. L'âge actuel de la marée du port d'Ostende, atteint 53 h 30 m.

Ce retard, dû à la plus importante des inégalités de la marée semi-diurne, provient du décalage de phase des ondes élémentaires M_2 , (lunaire moyenne, de période = 12 h 25 m) et S_2 , (solaire moyenne de période 12 h 00). Pour les marées semi-diurnes, on calcule l'âge de la marée ($M_2 + S_2$), onde combinée

$$\text{prédominante, par la formule } t = \frac{\alpha_{S_2} - \alpha_{M_2}}{\omega_{S_2} - \omega_{M_2}}$$

On observe que l'âge réel est en général légèrement plus grand, ce qui est normal. C'est ainsi que pour le littoral et le port d'Anvers on définit la pleine mer de vive-eau comme étant la première qui suit le cinquième passage (sup. et inf.) de la lune au méridien de Greenwich, à partir de la syzygie et comme basse-mer de vive-eau, celle qui suit. On applique la même règle pour la marée de morte-eau, en partant de la quadrature.

5. La marée de l'Escaut.

a) Exposé sommaire des traits essentiels de sa diversité fluvio-maritime.

L'Escaut, fleuve à marée, prend naissance vers les 100 m d'altitude, dans le département français de l'Aisne, draine les eaux de son bassin formé de basses plaines, dans un sol quartenaire argilo-sableux, vers la mer du Nord où, après un parcours de près de 430 km, il débouche dans un estuaire libre, favorablement disposé et relativement profond.

A partir de Gand (Gentbrugge), il subit progressivement l'influence de la marée, qui le soumet aussitôt au rythme de ses oscillations et peu après au mouvement alternatif de ses courants tout en mêlant ses eaux, par un puissant brassage, à celles du flot, ce qui les rend saumâtres dès Sint-Amants, pour atteindre une salinité déjà sensible à Anvers et fort proche de celle de la mer, dès Hansweert.

L'étendue totale de son bassin versant est de l'ordre de 19 500 km².

Sa partie fluviale non soumise à la marée, appelée Haut-Escaut, ne dépasse pas Gand, car à Gentbrugge, à la sortie de la ville, le barrage régulateur du premier bief amont, arrête la propagation de la marée qui, en ce lieu, garde une intensité non négligeable (amplitude moyenne : 2,00 m).

L'Escaut ne reçoit qu'un seul affluent important, la Lys, dont le confluent se trouve sur la rive gauche, près de Gand. Tributaire d'un bassin plutôt modeste, de quelque 8 425 km², le Haut-Escaut n'est guère favorisé par l'abondance de ses eaux; son débit moyen naturel est de l'ordre de 70 m³/s. Malgré cette modicité, on y prélève de l'eau pour alimenter divers canaux et notamment le canal de la dérivation de la Lys et le canal de Gand-Terneuzen.

Ces saignées diminuent le débit de l'Escaut au point qu'on peut y voir la cause principale des envasements qui se produisent en aval, dans la partie maritime du fleuve, particulièrement entre Gand et Termonde.

De Gand à l'estuaire, sur un parcours de près de 160 km, l'Escaut, on le sait, se trouve sous l'influence pratiquement exclusive de la marée, dont le prestigieux apport fait que celui de l'ensemble du débit supérieur, débit de la Dendre, de la Durme, du Rupel et du débit latéral, n'est plus qu'une contribution assez modeste, ainsi que le montre le tableau de la cubature de la marée, qui figure sur la planche 18^B.

On peut comparer les apports en question suivant la variation du rapport :

$$\frac{\text{volume du débit fluvial par marée}}{\text{volume du flot}}$$

dont nous donnons ci-dessous la valeur pour 6 points particuliers du fleuve :

Vlissingen	0,005	
Confluent du Rupel	0,085	
Confluent de la Durme	0,096	
Confluent de la Dendre	0,360	
Mi-distance entre Wetteren et Melle	1,000	
Barrage de Gentbrugge	∞	

Remarquons qu'il s'agit de la marée moyenne de 1950, année fort humide, qui n'eut pourtant qu'un faible coefficient d'écoulement (cf. IX, 2, b).

S'il est vrai que la marée de l'Escaut garde les caractéristiques de celle dont elle dérive, sa propagation fluviale, perturbée par d'importantes variations dimensionnelles des formes du lit : profondeur, largeur, courbure, subit l'action de résistances fort actives qui ne cessent d'affaiblir l'énergie de l'onde en la déformant.

C'est de ces phénomènes typiques que nous traiterons dans ce qui suit.

b) Propagation de l'onde de marée.

Pour suivre l'onde de marée dérivée qui remonte l'Escaut depuis le moment où elle franchit l'estuaire, nous disposons d'un réseau de postes marégraphiques particulièrement densés où les courbes de la marée locale, enregistrées en permanence, nous fournissent les données qui permettent de voir de près ce qui se passe au sein du phénomène.

Actuellement au nombre de 20, jusque Gand (cf. planche 18B). Le nombre total de marégraphes du bassin maritime de l'Escaut comprend, fin 1965, 35 postes dont 4 néerlandais. A ce sujet, nous renvoyons aux récapitulations statistiques annuelles et décennales des observations de la marée, faites dans le bassin maritime de l'Escaut, parues aux « Annales des Travaux publics de Belgique » depuis 1891 et spécialement, les données statistiques de la décennale 1951-1960, parues au n° 4 — 1963.

En dehors de la durée, sensiblement constante des périodes : moyenne (12 h 25 m), de vive-eau (12 h 18 m) et de morte-eau (12 h 40 m), la célérité de l'onde varie, influencée en ordre principal par les fluctuations de la profondeur moyenne du lit (*fig. 12 et 13*).

La crête de l'onde (marée haute) se propage nettement plus vite que le creux (marée basse).

De Vlissingen à Baarland, la célérité moyenne varie de 11 m/s à 8 m/s, croît ensuite et passe par un maximum à hauteur de Saaftinge, où elle atteint 15 m/s, décroît dès lors lentement avec un léger soubresaut entre Schoonaarde et Uitbergen, pour tomber à 5 m/s entre Melle et Gentbrugge.

Quant à la vitesse du creux, elle reste pratiquement égale à celle du sommet jusque Baarland, d'où elle varie en sens inverse, décroît en ondulant jusqu'au bout de la course où elle atteint 5 m/s.

Ajoutons que, par marée moyenne, la célérité de la marée haute, entre Vlissingen et Gentbrugge, est de 7,20 m/s. Celle de la marée basse atteint 5,10 m/s.

Ces données nous permettent de calculer la longueur moyenne de l'onde de marée λ , qui remonte le fleuve, en appliquant la formule : $\lambda = cT$, où c est la célérité, T la période, dont la valeur moyenne = 12 h 25 m ou 44 700 sec.

Nous obtenons ainsi, $\lambda = 7,2 \times 44\,700 = 321\,840$ mètres. Ce qui montre que sur le trajet de l'Escaut maritime, long de 160 km, on ne peut voir évoluer une onde de marée entière.

Tout au plus y observe-t-on un flot complet, c'est-à-dire la présence simultanée d'une marée basse et d'une marée haute.

On sait que la célérité d'une onde de marée fluviale, abstraction faite de l'influence perturbatrice des ondes supérieures, peut se calculer au moyen de la formule :

$$c = \left(1 + \frac{3h}{H} \right) \sqrt{gH} - U$$

où c = la célérité en m/s

H = la profondeur moyenne de la section considérée, sous le niveau moyen du fleuve

h = l'ordonnée de l'onde par rapport à ce niveau (hauteur de marée)

U = la vitesse du courant fluvial.

Remarquons, sur les graphiques des marées locales de la planche 18B, qu'aux instants de marée haute et de marée basse (maximum ou minimum de h) les courants de flot et de jusant restant très sensibles, la célérité du sommet de l'onde s'en trouvera nettement favorisée.

On voit que l'onde cesse d'exister dès que $C = 0$.

Ce cas limite se produit dès que, par forte crue, le débit d'amont devient assez puissant pour annuler le flot d'abord, le mouvement oscillatoire ensuite, de manière à créer progressivement le régime fluvial proprement dit.

Ce refoulement de la marée a été observé sur l'Escaut jusque Schoonaarde, sur la Basse-Nèthe jusqu'à près de Duffel.

La célérité de l'onde sur les affluents libres (non éclusés) suit évidemment la même loi de décroissance, toujours en fonction de l'exhaussement du lit.

Sur le Rupel, depuis le confluent jusque Boom, les célérités respectives de haute et basse mer sont de 5,3 m/s et 3,7 m/s. Plus en amont, de Boom à Walen (confluent de la Dyle), elles tombent à 4,9 m/s et 3,2 m/s.

Le profil en long du chenal de navigation du Rupel (fig. 12), montre que peu après Wintam, le relèvement des seuils se manifeste déjà nettement et, comme il est normal, ira en s'accentuant et on comprend dès lors qu'il en sera de même pour les écarts de célérité. Sur la Durme, on est frappé dès l'abord, par des écarts qui paraissent excessifs, mais qui s'expliquent par l'envasement spectaculaire dans lequel évolue cette rivière. Les vitesses de propagation y sont, entre le confluent et Waasmunster, de 8,30 m/s à 4,60 m/s, pour la marée haute et de 2,60 m/s à 0,60 m/s, pour la marée basse (décennale 1951-1960).

La Dendre, rivière éclusée depuis son confluent, sera laissée hors de propos dans le sujet qui nous occupe.

Remarquons que les courbes de propagation de la marée moyenne, qui figurent sur la planche 18B, montrent clairement les aspects de ce phénomène de célérité.

Parmi les valeurs extrêmes, citons les vitesses de translation des marées qui ont produit respectivement la plus forte marée haute et la plus basse marée basse connues à Anvers (fin 1963) :

- la marée tempête extraordinaire du 1^{er} février 1953, où la crête de l'onde mit 1 h 24 m pour franchir le trajet Vlissingen-Anvers, où elle atteignit la cote 7,85 m et arriva 0 h 45m plus tôt que prévu, en soulevant les eaux de 2,79 m au dessus de la cote prédicta. Ce trajet fut franchi par la marée haute, à la vitesse de 15,35 m/s;
- la marée tempête continentale (vent d'est), du 31 janvier 1956, où la marée basse parcourut ce même trajet en 3 h 20 m, à la vitesse de 6,45 m/s, arriva 0 h 40 plus tard que prévu et abaissa le niveau jusque 1,17 m sous le zéro, c'est-à-dire, 0,93 m plus bas que prévu.

Pour ce qui concerne l'évolution de la célérité de l'onde de marée fluviale, notons que depuis le début du siècle, la célérité moyenne n'a cessé de croître partout et, pour ne citer que le cas d'Anvers, le retard de l'instant de la marée haute, par rapport à Vlissingen, y décroît de 2 h 20 m à 2 h 00 m. Ces accroissements de célérité sont corrélatifs, non seulement de ceux des niveaux de marée haute, mais aussi certainement de l'amélioration constante des fonds, due à la conjonction de l'évolution naturelle et de l'action du dragage.

Beautemps-Beaupré nous a laissé la première valeur de célérité de la marée, observée vers 1800, au cours des levés qu'il exécuta dans le Bas-Escaut, exprimée par le retard de translation de l'onde, sur le trajet Vlissingen-Anvers, qui était de 3 h 22 m.

Le retard en question résulte d'observations faites le jour même de la conjonction luni-solaire équinoxale, pour déterminer ce qu'on appelait l'« Etablissement vulgaire du port » (notion tombée en désuétude), pour Vlissingen et Anvers.

Il ne s'agit donc pas du retard de la marée de syzygie proprement dite (ou de vive-eau), qui a lieu 2,5 jours plus tard.

Eu égard aux niveaux, qui étaient alors sensiblement plus bas et les amplitudes plus faibles, cette valeur ne devait pas différer notablement du retard moyen.

Après quoi il faut faire un bond de quelque septante ans, pour voir apparaître, dans un ouvrage de Rochet, une deuxième valeur, évaluée à 2 h 40 m, présentée comme une moyenne de l'ensemble des retards observés au cours de l'intervalle 1870-1875.

Rochet (E.), Ingénieur en chef, chef du Service hydrographique.

Cette succession de valeurs décroissantes de la durée de translation de l'onde de marée, montre combien furent efficaces les travaux exécutés systématiquement depuis le milieu du siècle passé, tant en Belgique qu'aux Pays-Bas, pour endiguer et approfondir le lit.

c) Variation du gagnant et du perdant.

Vu la constance de la période au cours de la translation de l'onde, l'irrégularité de célérité entre la marée haute et la marée basse, entraîne nécessairement celle des durées entre le gagnant et le perdant.

Comme le montrent les courbes des trois types principaux de la marée locale qui figurent sur les planches 18^A et 18^B, l'écart entre le gagnant et le perdant, varie avec l'intensité de la marée (amplitude). Au cours de la lunaison, la durée du gagnant décroît en effet, de la marée de morte-eau à celle de vive-eau.

Sensiblement constants en mer, sur le fleuve, ces écarts de caractère synodique varient en outre avec les conditions de stabilité hydraulique, de la profondeur notamment.

Pour la marée moyenne à Anvers, nous observons une décroissance décennale régulière du gagnant, depuis 1901-1910 à 1950-1960, de 5 h 23 m à 5 h 16 m.

Tout se passe comme si le sommet s'efforçait à rattraper le creux de l'onde et il y parviendrait en effet, si les conditions requises relativement à l'exhaussement des fonds étaient réalisées, comme cela se passe sur certains fleuves à marée.

Dans ces cas extrêmes, on assiste au phénomène bien connu qui porte le nom de mascaret.

L'exhaussement progressif du lit, de même que la présence d'importants hauts-fonds (seuils), entraînent gravement la propagation de l'onde et sont la cause principale des frottements qui dégradent son énergie jusqu'à engendrer la déformation limite, appelée mascaret, dont l'apparition sur l'Escaut n'est pas à craindre.

Comme l'on sait, on l'observe sur la Seine, sur les fleuves anglais Trent et Severn (où on l'appelle bore ou eage), en Amérique, aux Indes, en Chine.

Appellation néerlandaise, proposée par J.L. Luymens : « Brekende vloedgolf ».

d) Variation de l'amplitude.

L'amplitude varie, en commençant par croître régulièrement depuis Vlissingen (3,79 m) vers sa valeur maximum (4,91 m) atteinte à Hemiksem, pour décroître ensuite jusqu'au barrage de Gentbrugge, où elle descend à 1,98 m. Ces variations d'amplitude sont exposées sur la planche 18^B, accompagnées de constantes locales qui permettent de passer de la marée

moyenne à celles de vive-eau et de morte-eau. On conçoit qu'elles soient intimement liées à celles de l'énergie cinétique de l'onde.

Or, celle-ci s'affaiblit graduellement dès que les dimensions du lit diminuent (profondeur moyenne et largeur) et que les courbes deviennent plus nombreuses (réflexions), par suite de l'action du frottement et des remous qui en résultent. En fait, lorsque la perte d'énergie est négligeable ou reste petite, on peut se faire une idée de première approximation, de la loi qui régit ces variations, en faisant appel à la relation : $h/\sqrt{H} = C^t e$, où h est la hauteur de la marée et H , la profondeur moyenne au-dessous du niveau moyen.

Sous les réserves annoncées, elle montre que l'amplitude varie en raison inverse de la racine carrée de la profondeur.

Les profils en long du fleuve et du Rupel (fig. 12) permettent de saisir le mécanisme des importantes résistances que l'onde de marée rencontre sur son parcours et de voir notamment qu'elles s'accentuent à partir du confluent du Rupel, d'où les amplitudes décroissent en effet sensiblement.

En outre, l'amplitude moyenne de la marée fluviale n'est pas constante dans le temps. Elle varie, en effet, suivant l'évolution de la situation de l'hydraulique fluviale.

Le tableau qui suit donne, pour les points principaux, les valeurs moyennes décennales, depuis 1891-1900, des marées hautes et marées basses, dont les différences sont les amplitudes moyennes.

On voit que, sauf sur la Durme, elles ne cessent de croître partout. Cette constatation montre que l'énergie hydraulique de la marée de l'Escaut évolue actuellement d'une manière favorable.

EVOLUTION DE LA MAREE MOYENNE DECENNALE DEPUIS 1891.

	Lieu	1891 1900	1901 1910	1911 1920	1921 1930	1931 1940	1941 1950	1951 1960	
ESCAUT MARITIME	Vlissingen	m 4,12 0,44	m 4,19 0,44	m 4,19 0,47	m 4,24 0,48	m 4,26 0,54	m 4,28 0,55	m 4,35 0,56	m.h. m.b.
	Anvers	4,76 0,37	4,80 0,31	4,91 0,32	4,93 0,28	4,98 0,26	4,98 0,25	5,04 0,23	
	Termonde	4,45 1,68	4,57 1,76	4,72 1,77	4,74 1,70	4,77 1,63	4,82 1,61	4,95 1,65	
	Gentbrugge (Gand)	4,35 2,80	4,56 2,98	4,88 3,22	4,89 3,06	4,87 2,92	4,82 2,87	4,98 3,00	
RUPEL	Boom		4,80 0,67	4,90 0,63	4,92 0,61	4,98 0,58	5,10 0,55	5,21 0,55	
DURME	Tielrode			4,80 0,80	4,92 0,81	4,95 0,78	5,01 0,69	5,15 0,67	5,25 0,63
	Waasmunster	4,58 1,22	4,68 1,36	4,85 1,42	4,91 1,62	4,97 1,22	5,14 1,12	5,33 1,53	

Les cotes sont rapportées au « zéro N.D.G. » (cf. VII,1).

m.h. : marée haute.

m.b. : marée basse.

e) Lieux géométriques des niveaux de vive-eau et de morte-eau.

Pour compléter ce qui concerne l'évolution des niveaux, un graphique de la planche 18^B, donne les lieux géométriques des niveaux de vive-eau et de morte-eau, au cours de la décennie 1951-1960. Il montre que ces courbes, qui représentent les niveaux extrêmes normaux de la lunaison se développent régulièrement, celles de marée haute presque parallèlement avec une double courbure, des maxima près de Sint-Amands (5,62 m et 4,76 m) et des minima à Uitbergen (4,98 m et 4,36 m). Par contre, les lieux de marée basse, situés à 0,33 m et 0,89 m à Vlissingen convergent régulièrement vers l'amont et se coupent en effet, en un point caractéristique, situé à quelque 100 km de l'embouchure, également près de Sint-Amands, à partir duquel le lieu des basses mers de vive-eau se relève, passe et reste au-dessus de celui des basses mers de morte-eau.

Ce relèvement et cette intersection des lieux de basse-mer sont dûs à l'influence de l'exhaussement du lit, au débit d'amont ainsi qu'à l'effet de stockage de l'excédent du volume de flot sur celui de jusant.

Sur le Rupel, ce point d'intersection est situé pratiquement au confluent de la Dyle.

Sur la Durme, on le trouve à mi-chemin entre Waasmunster et Zele.

Ces points particuliers ont un intérêt pratique pour la navigation, la batellerie surtout, puisqu'ils délimitent les zones à partir d'où on est certain de trouver plus d'eau à marée basse de vive-eau, contrairement à ce qui se passe partout en aval où ces niveaux, connus pour être toujours les plus bas, sont particulièrement redoutés.

6. La prédition des marées.

Il n'est pas besoin de souligner l'immense intérêt pratique qu'a présenté pour les marins de tous les temps, le passionnant problème de la prédition des marées. Nous savons qu'il était basé autrefois sur des procédés locaux, de caractère empirique, mais que dès la fin du XVIII^e siècle, de sérieuses améliorations furent introduites par les notions telles que l'établissement du port, le coefficient de marée, l'observation directe durant le cycle des noeuds lunaires, de 18,61 ans, (souvent confondu avec le saros dont la durée, de 18,03 ans, concerne le retour des éclipses), suivies de méthodes mieux structurées, comme celle connue sous le nom de « méthode des équations » élaborée par l'amirauté anglaise (*Admiralty method*). Devant les exigences sans cesse croissantes des techniques intéressées de la navigation, du génie maritime et d'autres, ces procédés furent abandonnés aussitôt que les prédictions traitées par l'analyse harmonique firent leur apparition. Il est vrai que la nouvelle méthode apporta des précisions inconnues jusqu'alors et put être considérée, à juste titre, comme la solution la plus rationnelle de ce difficile problème.

Elle consiste à considérer la courbe de la marée observée, courbe qu'il s'agit précisément de reproduire par prédition, comme étant la résultante de la sommation d'autant de courbes élémentaires, dont le nombre varie avec le lieu, chacune d'elles représentant l'effet d'un astre fictif, lune fictive ou soleil fictif suivant le cas, répondant à une des nombreuses causes astronomiques connues, parmi lesquelles les principales résident dans la variation périodique de la parallaxe, la déclinaison, la précession.

Ces lunes et soleils fictifs, gravitent autour de la terre sur des orbites circulaires situées dans le plan de l'équateur, animés de mouvements uniformes.

Les ondes engendrées par ces astres fictifs, sont représentées par une relation de la forme :

$$Y = h \cos (\omega t - \alpha) \quad (1)$$

de sorte que la hauteur de la marée, à l'instant t , est donnée par :

$$H = h_1 \cos(\omega_1 t - \alpha_1) + h_2 \cos(\omega_2 t - \alpha_2) + \dots \quad (2);$$

où H , est la hauteur du niveau de la mer, par rapport au niveau moyen adopté, à l'instant t ;

h_1, h_2, h_3, \dots les demi-amplitudes des ondes 1, 2, 3...

t , l'intervalle, en temps universel, entre l'origine du temps adoptée et l'instant t ;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$ les vitesses angulaires des astres fictifs 1, 2, 3... calculées à partir

de la période T considérée : $\omega = \frac{2\pi}{T}$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ les décalages de phase avec les ondes astronomiques correspondantes, au méridien du lieu considéré

h et α sont les deux constantes harmoniques de l'onde considérée.

$2n$ est le nombre de constantes d'un ensemble de n ondes.

Ces paramètres ne peuvent être obtenus que par la décomposition (séparation) de courbes résultant de marées observées, sans interruption pendant une année au moins.

Cette décomposition consiste à extraire de ces marégrammes, les ondes de périodes fixées à l'avance, par ordre d'importance.

C'est ainsi qu'on sépare, en premier lieu, les ondes semi-diurnes, dont les symboles sont affectés de l'indice 2, telles que $M_2, S_2, N_2, K_2, \dots$, ondes dont les périodes oscillent autour de 12 h.

En second lieu, les ondes diurnes, identifiées par l'indice 1, telles que O_1, K_1, P_1, \dots , dont les périodes s'approchent de 24 h.

Suivent alors les ondes à longue période, M_f, M_m, \dots de 13 j 16 h, 27 j 13 h, ...

Notons que toutes ces ondes ont une amplitude constante et, comme il a été dit plus haut, traduisent l'effet d'une action astronomique connue.

La constante h , est fournie par l'amplitude de l'onde séparée et la constante angulaire, α , est obtenue en calculant le décalage entre le passage de l'astre fictif au méridien du lieu et l'instant de la marée haute qu'il engendre.

Afin de pouvoir tenir compte des distorsions qu'éprouvent les marées réelles, principalement celles qui se propagent sur les hauts-fonds, il y a lieu de décomposer à leur tour les ondes principales (fondamentales) M_2 (lunaire principale), S_2 (solaire principale), de manière à les séparer de leurs harmoniques M_4, M_6, \dots , et, si nécessaire les S_4, S_6, \dots , de périodes sous-multiples, qu'on appelle communément « ondes supérieures ». Les ondes diurnes O_1, P_1, K_1, \dots , n'échappent pas non plus à cette décomposition et on est même amené à devoir introduire des « ondes composées », telles que MS_4, MS_f, MK_3, \dots , symboles que l'on découvre parmi les 60 ondes, séparées par le Tidal Institute de Liverpool, pour les ports d'Ostende et d'Anvers, dont le groupe fondamental, composé de 26 ondes, a servi au calcul des prédictions de départ.

On sait que la prédiction se fait par la sommation des ondes partielles sélectionnées.

Ce calcul, autrefois extrêmement laborieux, a été réduit à une opération relativement simple, par l'emploi du « Tide predictor », inventé par Lord Kelvin, qui reproduit la courbe de la marée réelle d'une année, en quelques heures, avec une précision surprenante.

La précision de la prédiction obtenue au moyen de la relation (2) dépend du nombre et de la qualité des termes. En pratique, on dépasse rarement la trentaine. Pour Ostende et Anvers, on a utilisé 26 ondes (ce qui donne 52 constantes) pour le calcul des prédictions fondamentales. Ces constantes sont stables pour autant que les conditions physiques du lieu auxquelles elles s'appliquent, ne subissent pas de changements notables.

Aussi sont-elles sujettes à révision surtout pour les fleuves à marée, à fond mobile, par suite des fluctuations possibles du lit fluvial. C'est pourquoi celles qui se rapportent au port d'Anvers ont été revues et réadaptées (*shallow water corrections*), à quatre reprises depuis 1930, année de publication des premières prédictions faites au moyen de l'analyse harmonique.

Les résultats de la dernière correction, basée sur les observations marégraphiques faites en 1962, paraîtront en 1966.

Le tableau ci-dessous donne, pour les ports d'Ostende et d'Anvers, les constantes h et α , des ondes principales, calculées par le « Tidal Institute » de l'Université de Liverpool.

Ces constantes sont les plus importantes du groupe qui a servi à la prédition fondamentale de ces ports (*basic predictions*).

	Symbole	Période	ω^o	Ostende		Anvers	
				h	α^o	h	α^o
Semi-Diurnes	Lunaire moyenne	M ₂	12 25	28,98	1,76	5,0	1,96 86,9
	Solaire moyenne	S ₂	12 00	30,00	0,52	58,3	0,48 149,8
	Lunaire elliptique	N ₂	12 39	28,44	0,29	338,8	0,30 60,5
	Luni-solaire déclinationnelle .	K ₂	11 58	30,08	0,16	53,3	0,16 153,0
Diurnes	Luni-solaire déclinationnelle .	K ₁	23 56	15,04	0,04	346,4	0,06 29,0
	Lunaire principale	O ₁	25 49	13,94	0,08	173,7	0,09 223,2
	Solaire principale	P ₁	24 04	14,96	0,03	330,7	0,05 22,0
	Onde supérieure	M ₄	6 12	57,96	0,09	337,4	0,13 121,1

Pour Ostende : les constantes résultent d'observations complètes durant 1943-1944. Les hauteurs sont rapportées au zéro de référence $Ao = 2,328$ m au-dessus du zéro Z (valeur approchée du niveau moyen).

Pour Anvers : les constantes résultent d'observations complètes durant 1926-1927. Les hauteurs sont rapportées au zéro Ao , adopté par le « Tidal Institute » = 2,650 m au-dessus du zéro D.G. Kattendijk.

Pour des raisons d'uniformité, le « Tidal Institute » calcule ses constantes angulaires α , en réduisant leurs éléments : décalage et temps, au méridien de Greenwich.

Aux Pays-Bas, le *Waterstaat* désigne la constante angulaire, par κ (*kappagetal*), où le décalage de phase se rapporte au méridien de 5° E.G. et le temps, au méridien de 15° E.G.

Nous venons de voir que les constantes harmoniques, très sensibles aux modifications dimensionnelles des lieux de propagation de l'onde de marée, ne sont pas immuables.

Ces influences éventuelles sont l'objet d'une surveillance constante, qui consiste à suivre l'allure de l'écart entre la marée observée et la marée prédictive. Ces opérations statistiques ont montré que la précision de la prédition peut se résumer en disant que :

- à Ostende, elles est exacte à cinq minutes près pour le temps et à 10 centimètres pour les hauteurs
- à Anvers, ces écarts atteignent respectivement dix minutes et 20 centimètres.

Il s'agit de l'écart moyen quadratique, dont la probabilité est de 68 %.

III. — LES COURANTS DE MAREE.

La marée verticale, vue exclusivement sous l'angle des dénivellations périodiques, engendre d'importants déplacements horizontaux des masses d'eau, des courants de marée qu'on appelle communément la marée horizontale.

On le voit, marée verticale et marée horizontale sont des manifestations corrélatives d'un même phénomène.

Plus précisément, les courants de marée sont dûs, en ordre principal, à la pente du profil instantané de l'onde, au cours de sa propagation.

Nous savons qu'ils entraînent toute la masse d'eau, comme les courants fluviaux proprement dits, contrairement aux courants d'impulsion dûs au vent, ou de décharge, appelés courants de densité.

1. Courants de la mer du Nord.

a) Roses de courants.

Les courants de marée de la mer du Nord sont, en général, animés d'un mouvement giratoire, anti-horlogique, le long du littoral belge jusqu'au large de l'île de Walcheren, horlogique partout ailleurs, si l'on excepte les rares endroits où il est plutôt alternatif et rectiligne, comme dans la zone centrale et devant l'estuaire de la Tamise.

Le champ d'action et l'importance de ces courants dépendent du mouvement et de l'intensité de l'onde de marée autour du point amphidromique.

Aussi sont-ils, par analogie, de caractère semi-diurne et sinusoïdal, comme les oscillations de l'onde de marée.

L'image des vecteurs-vitesses, partant du point d'observation, se présente généralement sous forme d'ellipse déformée ou aplatie, communément appelée « Rose des courants », avec un grand axe orienté dans le sens de la propagation de l'onde, en l'occurrence, à peu près parallèlement à la côte (cf. planche 18^A et figure 3).

Sur nos côtes, il arrive fréquemment que cet axe se réduise à une ligne brisée, composée de vecteurs de courant maximum du flot et du jusant.

b) Courants de flot et de jusant. — Étales de courant.

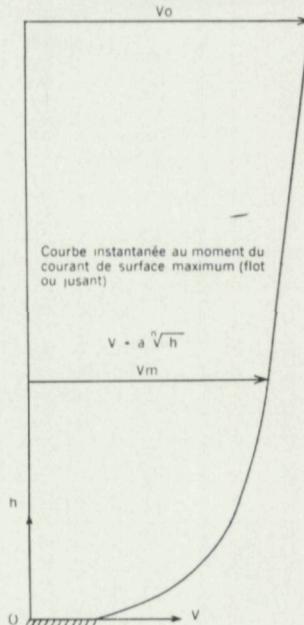
Le courant de flot est celui qui passe de la mi-marée montante à la mi-marée descendante (cf. planche 18^A et figure 3).

Pendant cet intervalle, les vecteurs restent groupés dans le sens de la propagation de l'onde de marée ou encore, vers l'est du petit axe de l'ellipse, sur lequel se produit d'ailleurs la renverse du courant au moment de l'étale (courants minima ou nuls). Les courants dirigés dans le sens opposé, c'est-à-dire à l'ouest de ce petit axe, appartiennent au courant de jusant.

Il est toutefois rare, dans les mers peu profondes, que la renverse du courant se produise précisément au moment du niveau moyen, comme c'est le cas à Ostende par marée moyenne. On sait, en effet, que les étales s'en éloignent dès que, par rapport au niveau moyen, la hauteur de la marée (demi-amplitude) n'est plus négligeable par rapport à la profondeur.

COURANTS DE FOND.

Schéma de parabole des vitesses appliqué au littoral belgo-néerlandais.



h = hauteur au-dessus du fond.

v_0 = vitesse de surface.

v_m = vitesse moyenne sur la verticale.

$4 \leq n \leq 6$.

a = paramètre instantané déduit des mesures de vitesse.

COURANTS DE SURFACE DE MAREE MOYENNE DANS LA PASSE DE WIELINGEN
(KADZAND).

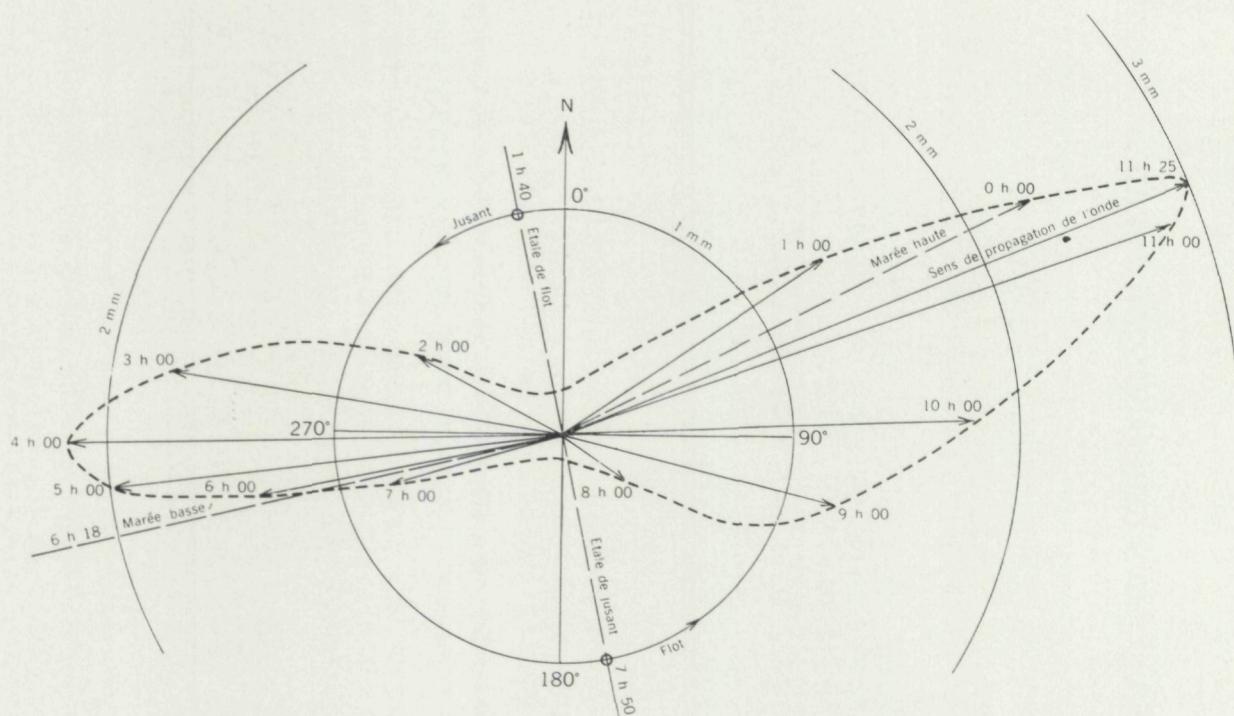


Fig. 3.

Vitesse horaire : 3 cm = 1 mille marin (m.m.) direction vraie.
Heures en temps lunaires : 1 h. 1. = 1 h. 02.05.

Les valeurs moyennes du tableau ci-dessous, permettent de fixer les idées sur l'importance de ces intervalles.

DUREES DES COURANTS DE FLOT ET DE JUSANT DE MAREE MOYENNE

Lieu	Etages (renversés)		Durée du	
	de flot	de jusant	flot	jusant
Nieuport	h m 3 35 après m.h.	h m 2 20 avant m.h.	h m 5 55	h m 6 30
Ostende	3 35 »	2 20 »	5 55	6 30
Zeebrugge	3 15 »	2 45 »	6 00	6 25
Estuaire de l'Escaut (*) . . .	1 45 »	4 20 »	6 05	6 20
Vlissingen	1 00 »	5 00 »	6 00	6 25

m.h. = marée haute.
(*) passe de Wielingen, à l'est de Zeebrugge.

Pendant le flot, les vitesses maxima s'observent vers l'instant de la pleine mer, avec des écarts qui varient suivant les conditions du lieu. Elles varient en moyenne de 1,0 à 2,0 milles aux mortes-eaux et de 1,5 à 3,0 milles aux vives-eaux.

Au jusant, les vitesses maxima ont lieu vers l'instant de la marée basse, mais quelquefois bien avant, surtout dans l'estuaire, et leurs valeurs moyennes varient de 1,0 à 1,5 milles aux mortes-eaux et de 1,3 à 2,2 milles aux vives-eaux.

Dans la zone Wielingen-Vlissingen (estuaire), les courants varient entre des limites plus larges et vont jusqu'à atteindre des valeurs qui s'écartent de plus de 50 % de leur valeur moyenne.

La planche 18^a donne la distribution des vecteurs-vitesses maxima de surface (direction et intensité en dixième de mille), pour la marée moyenne.

Comme on admet généralement que les vitesses maxima varient sensiblement comme les amplitudes de marée, les formules que portent les lignes d'égale amplitude moyenne qui figurent sur cette planche, permettent également de passer des vitesses maxima indiquées sur la carte, aux vitesses maxima de vives-eaux ou de mortes-eaux.

Le mille marin vaut 1 852 m et la vitesse exprimée en milles est une vitesse horaire, d'ailleurs équivalente à celle exprimée par le même nombre de nœuds.

c) **Courants de fond.**

Les courants de fond, dont nous ne donnons ici qu'un schéma, sont étudiés au moyen de mesures faites sur la verticale des lieux d'observation. Ils sont mesurés aujourd'hui presqu'exclusivement par des appareils enregistreurs fort perfectionnés, qui donnent d'une manière continue la vitesse et la direction du courant au niveau de la profondeur d'immersion.

Ils montrent une répartition des courants de fond généralement régulière pour ce qui concerne la vitesse, mais souvent complexe, en particulier sur les fonds irréguliers et le long du rivage, pour ce qui concerne la direction.

Dans les circonstances normales, la vitesse en profondeur varie généralement suivant une loi parabolique. Sa valeur maximum se trouve tantôt à la surface, tantôt plus bas, entre la surface et la mi-profondeur. Cette valeur maximum ne diffère généralement pas beaucoup de celle observée à la surface.

Vers les 6/10^e de la profondeur, elle atteint sa valeur moyenne dont elle ne s'écartera que très lentement, pour flétrir brusquement près du fond, vers ce qu'on appelle précisément la vitesse du fond, dont on ne possède d'ailleurs que fort peu de valeurs précises.

Pourtant, ces vitesses du fond, tout en étant très faibles, témoignent généralement d'une valeur maximum suffisante, de l'ordre de 0,30 m/s, pour y affouiller le fond.

La renverse du courant, au moment des étales, ne se produit pas toujours simultanément à tous les niveaux de la profondeur. Ces phénomènes particuliers sont généralement dûs aux différences de densité qui peuvent exister à ce moment, entre les eaux de surface et celles du fond.

J. Van Veen, se basant sur les résultats d'un important ensemble de près de 1 500 mesures exécutées dans le bassin méridional de la mer du Nord et en particulier entre le Pas-de-Calais et le Delta Zélandais, arrive à la conclusion qu'une parabole à axe vertical (h), du 5^e degré, de la forme : $v = a \sqrt[5]{h}$, représente le mieux et le plus simplement, la loi normale de répartition des vitesses le long de la verticale (fig. 3).

Cette méthode de calcul a été adoptée par le Service hydrographique de la côte, en partant de valeurs de courants enregistrées en des points déterminés à deux profondeurs types, généralement à 2 et 4 mètres au-dessus du fond.

Observons que le paramètre instantané a , qui n'est autre que la vitesse, à l'instant considéré, à 1 mètre au-dessus du fond, varie différemment suivant qu'il s'agit du flot ou du jusant.

De plus, les vitesses n'étant mesurées sur la verticale qu'entre la surface et une profondeur, généralement située à 0,25 m au-dessus du fond, on conçoit que cette formule n'est valable que pour des niveaux situés entre ces limites.

Enfin, les vitesses indiquées sur la carte étant des maxima de surface, de flot ou de jusant, de marée moyenne, cette formule permet également de calculer les paraboles de vitesses qui conviennent à ces instants.

2. Les courants de l'Escaut maritime.

a) Courants de flot et de jusant. — Renverses.

Ils sont naturellement de caractère périodique, comme la marée, mais non giratoire comme en mer.

Ils sont en effet exclusivement alternatifs, avec des renverses (étales) qui ont lieu, pour le flot, après l'instant de marée haute (sauf près de la zone semi-maritime, comme il est dit plus loin), et pour le jusant, toujours après la marée basse.

Ce retard de la renverse se présente comme suit :

- Pour le courant de flot, il atteint 1 h 00 m à Vlissingen, décroît et passe à 0 h 50 m à Anvers, continue de décroître jusqu'à s'annuler à Melle, devient négatif et accuse — 0 h 17 m à Heusden, où la renverse a lieu avant la marée haute et à partir d'où le flot tend à disparaître.
- Pour le courant de jusant, l'écart part de 0 h 55 m à Vlissingen, passe à 0 h 30 m à Anvers, décroît et passe par un minimum de 0 h 25 m au Rupel, croît ensuite et atteint 0 h 50 m à Tamise, 1 h 10 m à Heusden et pour finir croît au-delà de toute limite, le flot ayant disparu.

Sur le Rupel, ces retards varient de 0 h 30 m à 0 h 20 m pour la renverse du flot, et de 0 h 20 m à 0 h 25 m pour le jusant. Quant à la Durme, où l'envasement ne cesse de progresser, les valeurs observées en 1964 donnent, pour le flot entre Tielrode et Zele, 0 h 20 m à 0 h 25 m et pour le jusant, 0 h 10 m à 0 h 05 m.

Remarquons que sur une section transversale donnée, il est rare que la renverse ait lieu simultanément en tous les points, de rive à rive ou de la surface au fond.

Contrairement à ce qui se passe en mer, où les durées de flot et de jusant restent sensiblement constantes pour un type donné de marée, sur le fleuve ces durées sont intimement liées à celles du gagnant et du perdant.

Il s'ensuit que celles du courant de flot diminuent sans cesse vers l'amont, en faveur de celles du courant de jusant.

b) Vitesses de courant.

Quant aux variations locales du courant, elles se traduisent par des courbes analogues à celles des marées qui les engendent, comme le montrent, sur la planche 18^B, les courbes de vitesses qui figurent sur les graphiques des 6 marées locales principales de l'Escaut.

Il est clair que les valeurs maxima de courants de flot et de jusant qui figurent sur cette planche et qui se rapportent, nous le savons, à la marée moyenne, diminuent lorsque la marée est de morte-eau, augmentent lorsqu'elle est de vive-eau et subissent enfin des altérations sous l'effet de forts vents soutenus.

Ces influences furent observées et mesurées chaque fois que les circonstances le permirent.

Malheureusement, les données recueillies jusqu'à présent ne sont pas suffisantes pour formuler des conclusions ou règles précises.

En attendant, nous supposons que les courants maxima varient linéairement comme les amplitudes sachant que ce procédé approché, donne généralement des résultats trop faibles pour le flot.

En conséquence, les constantes locales indiquées sur la carte, qui permettent de passer des amplitudes moyennes à celles de vive ou de morte-eau, sont également applicables aux courants.

Quant à l'effet du vent, il accélère ou freine le courant suivant l'orientation de sa translation; il le dérive généralement de sa trajectoire normale, mais n'influence guère que les couches superficielles. Ces phénomènes ne sont pas simples et sont peu connus, parce que les mesures par mauvais temps, par temps houleux, sont difficiles.

La vitesse maximum de flot, relevée dans le thalweg, est de l'ordre de 120 m/min. Elle se constate entre Hoboken et le confluent du Rupel, au moment où la pente de l'onde de marée y atteint également sa valeur maximum, qui est de l'ordre de 7 cm/km. La situation de l'onde de marée à ce moment, est celle qui se présente environ 1 h 35 m après la marée haute à Vlissingen, ou à 0 h 25 m avant la marée haute à Anvers.

Les vitesses maxima au flot ont lieu pratiquement 1 h 00 m avant la marée haute, depuis l'estuaire jusqu'au confluent du Rupel, mais cet écart croît vers l'amont et à Tamise, il atteint 1 h 30 m, valeur qu'il garde alors jusque Heusden, pour tendre ensuite vers 0, avec la disparition du courant de flot à l'approche de la section semi-maritime.

La vitesse maximum du jusant, de l'ordre de 105 m/min, s'observe sur le travers de Hoek van Baarland, mais les vitesses de 100 m/min ne sont pas rares en aval

d'Anvers. La pente qui correspond à ces vitesses est de l'ordre de 6 cm/km, valeur qui correspond également à la dénivellation maximum de l'onde de marée au jusant.

Ces vitesses se constatent pratiquement aux environs de la mi-marée descendante, tout au moins entre l'estuaire et Anvers, où elles se produisent en effet entre 4 h 00 m et 3 h 00 m après la marée haute.

Plus en amont, cet écart diminue graduellement, passe par un minimum de 1 h 30 m à Wetteren, croît ensuite rapidement pour atteindre 7 h 15 m près de Melle, 8 h 15 m à Heusden et rejoindre plus loin la marée basse, dans la partie semi-maritime.

c) Courants de fond.

De nombreuses observations sur les courants de fond permettent d'en donner les caractères essentiels dans la zone comprise entre Hoboken et Bath :

- La loi de répartition verticale des vitesses peut être représentée par une parabole à axe horizontal;
- La vitesse, en partant de la surface, croît jusqu'à sa valeur maximum qui se situe entre la surface et les 4/10^e de la profondeur et très rarement à la surface;
- La vitesse moyenne se trouve vers les 6/10^e de la profondeur;
- La vitesse du fond proprement dite, quoique mal connue, à cause de difficultés de mesure, pratiquement insurmontables actuellement, n'est nulle qu'aux étages. On estime que les vitesses maxima sur le fond tombent rarement au-dessous de 20 centimètres par seconde (dans le thalweg).
- La diversité de forme des paraboles de vitesse est telle, qu'il est impossible de leur assigner une puissance-type.
- La répartition des directions, en profondeur, se caractérise par le maintien du parallélisme des filets liquides dans les chenaux rectilignes exclusivement.

Dans les courbes ou coudes, ce parallélisme se déforme généralement au plus fort du flot, où l'on voit les couches superficielles dériver vers la bordure ou rive convexe, en créant un courant transversal, redouté des pilotes et bateliers.

- Enfin, ainsi que nous l'avons déjà dit, la renverse du courant, dans une section transversale du fleuve, n'a pas lieu simultanément partout. En effet, de rive à rive, les écarts dépassent facilement quinze minutes et nous avons observé des cas où la renverse du flot, au début du jusant, eut lieu, dans les couches superficielles, plus de trente minutes avant l'amortissement du flot en profondeur, de même que la renverse du jusant, dans les couches inférieures, précède la renverse en surface;
- Pour ce qui concerne la zone située en aval de Bath, citons que d'après J. Van Veen, une parabole à axe vertical du 5^e degré (cf. III, 1, C), conviendrait également pour toute la zone estuarienne.

IV. — INFLUENCE DES FACTEURS METEOROLOGIQUES. MAREES TEMPETES.

L'exposé qui précède, concernant les marées, les courants et la prédiction, se rapporte à des circonstances normales. Il peut être considérablement troublé par des tempêtes, lorsque les grosses vagues interfèrent avec l'onde de marée et créent des courants pouvant dépasser largement les valeurs normales.

1. Cas de la mer du Nord.

Ces perturbations sont de nature à modifier sensiblement l'évolution du courant en prolongeant le flot ou l'étalement, particulièrement par vents forts du secteur S à NW, ou le jusant, par vents forts de NE à SE.

Parmi les facteurs météorologiques susceptibles d'influencer la hauteur de la marée, le vent est, à juste titre, le seul dont on redoute les effets, qui peuvent d'ailleurs atteindre des proportions désastreuses.

Le vent, surtout s'il est d'origine cyclonique à forte dépression d'environ 975 mb et si son centre se déplace sur la mer du Nord peut, dans certaines circonstances relevant de la mécanique de l'évolution du champ isobare, engendrer des vagues forcées, dont les plus fortes observées jusqu'ici au littoral, semblent avoir eu plus de 6 m d'amplitude.

a) Influence de la pression atmosphérique.

D'autre part, le niveau de la mer varie aussi en raison inverse des variations barométriques.

La relation corrélative du phénomène est sensiblement linéaire et correspond à une variation moyenne de 13,3 mm du niveau de la mer, pour un millimètre de mercure.

Le tableau qui suit indique les corrections à appliquer aux hauteurs des pleines mers et des basses mers, établies d'après les données de l'Annuaire des marées de France.

CORRECTION BAROMETRIQUE

<i>Pression</i>		<i>Correction en mètres</i>	
<i>en millimètres de mercure</i>	<i>en millibars</i>	+	-
720	960	0,5	
730	973	0,4	
740	986	0,2	
750	1000	0,1	
760	1013		
770	1027		0,1
780	1040		0,2

Ces effets ne sont pas instantanés; ils comportent des retards qui peuvent être importants.

Les nombreux travaux théoriques relatifs à l'influence du vent sur le niveau de la mer, montrent que le problème n'est pas simple. La plupart des formules proposées pour calculer cet effet, offrent des divergences dont il n'y a pas lieu de s'étonner.

b) Gonflement de la mer.

Sur le littoral oriental de la mer du Nord, le gonflement et le creusement de la mer varient comme le carré de la vitesse du vent.

Le gonflement est l'intumescence qui s'ajoute au niveau de la marée haute normale ou prédictive, tandis que le creusement est la dénivellation qui se retranche de la marée haute normale.

Schalwijk W.F., l'auteur d'une très intéressante étude consacrée à ces phénomènes de gonflement dans le bassin méridional de la mer du Nord, a mis en évidence l'effet dramatique des vents de tempête, surtout de ceux qui soufflent dans le secteur W-N, à partir de 9 Beaufort.

Beaufort (Sir Francis, 1774-1857), chef du Service hydrographique de l'amirauté anglaise. Il introduisit une échelle, numérotée de 0 à 12, pour estimer la force du vent à la mer.

Il s'agit d'un procédé d'évaluation à l'œil, dont la précision est comparable à celle d'un anémomètre, s'il est pratiqué par un observateur exercé (Rouch. J.).

Il rend de réels services en mer et est d'un usage courant dans les échanges météorologiques internationaux, surtout pour les besoins de l'aviation.

ECHELLE DE BEAUFORT

numéros	vents	VITESSES	
		mètres par seconde	kilomètres par heure
0	calme	0 à 1	0 à 4
1	presque calme	1 à 2	4 à 7
2	légère brise	2 à 4	7 à 14
3	petite brise	4 à 6	14 à 22
4	jolie brise	6 à 8	22 à 29
5	bonne brise	8 à 10	29 à 36
6	bon frais	10 à 12	36 à 43
7	fort vent	12 à 14	43 à 50
8	vent tempétueux	14 à 16	50 à 58
9	tempête	16 à 20	58 à 72
10	forte tempête	20 à 25	72 à 90
11	très forte tempête	25 à 30	90 à 108
12	ouragan	plus de 30	plus de 108

Parmi les plus forts gonflements observés jusqu'ici sur le littoral, notons tout particulièrement celui de 2,30 m, observé à Ostende, lors de la désastreuse marée tempête du 1^{er} février 1953, par vent cyclonique de NW, de 90 km/h (11 Beaufort), centré par 975 mb, au large du Danemark. Ce gonflement est le plus fort qu'on ait observé jusqu'ici.

La bibliographie relate les intéressantes études consacrées à cette mémorable tempête exceptionnelle, par L. Poncelet et R. Sneyers. L'ouvrage de L. Poncelet contient des vues constructives susceptibles de servir de base à la création d'un centre de prédiction des marées tempêtes. On y trouve également des abaques pour Ostende et Anvers, permettant de calculer l'ordre de grandeur du gonflement à prévoir.

c) Creusement de la mer.

Si, sur notre littoral, le niveau de la mer gonfle sous l'effet des vents de SSW à N, il se creuse, par contre, par vents de NE à S, en se déprimant le plus fortement par vents d'est.

Par vent d'est, 10 Beaufort, des creux de 1,10 m ont été enregistrés.

La stabilité de ce schéma est d'autant plus grande, que les vents émanent de phénomènes météorologiques d'envergure, en pleine action, de cyclones ou d'anticyclones.

Aussi y a-t-il lieu de distinguer le vent soufflant au moment où l'écart de niveau est observé, de celui qui en est la cause. La figure 4, illustre la relation de cause à effet con-

cernant l'influence combinée du vent et de la pression atmosphérique sur le niveau de la mer. Elle montre les gonflements et creusements maxima réellement observés au cours des années 1953-1963, ainsi qu'un ensemble de courbes donnant les valeurs moyennes de l'effet du vent, observé de 1929 à 1939, pour les vitesses de 3, 6, 9 et 10 Beaufort.

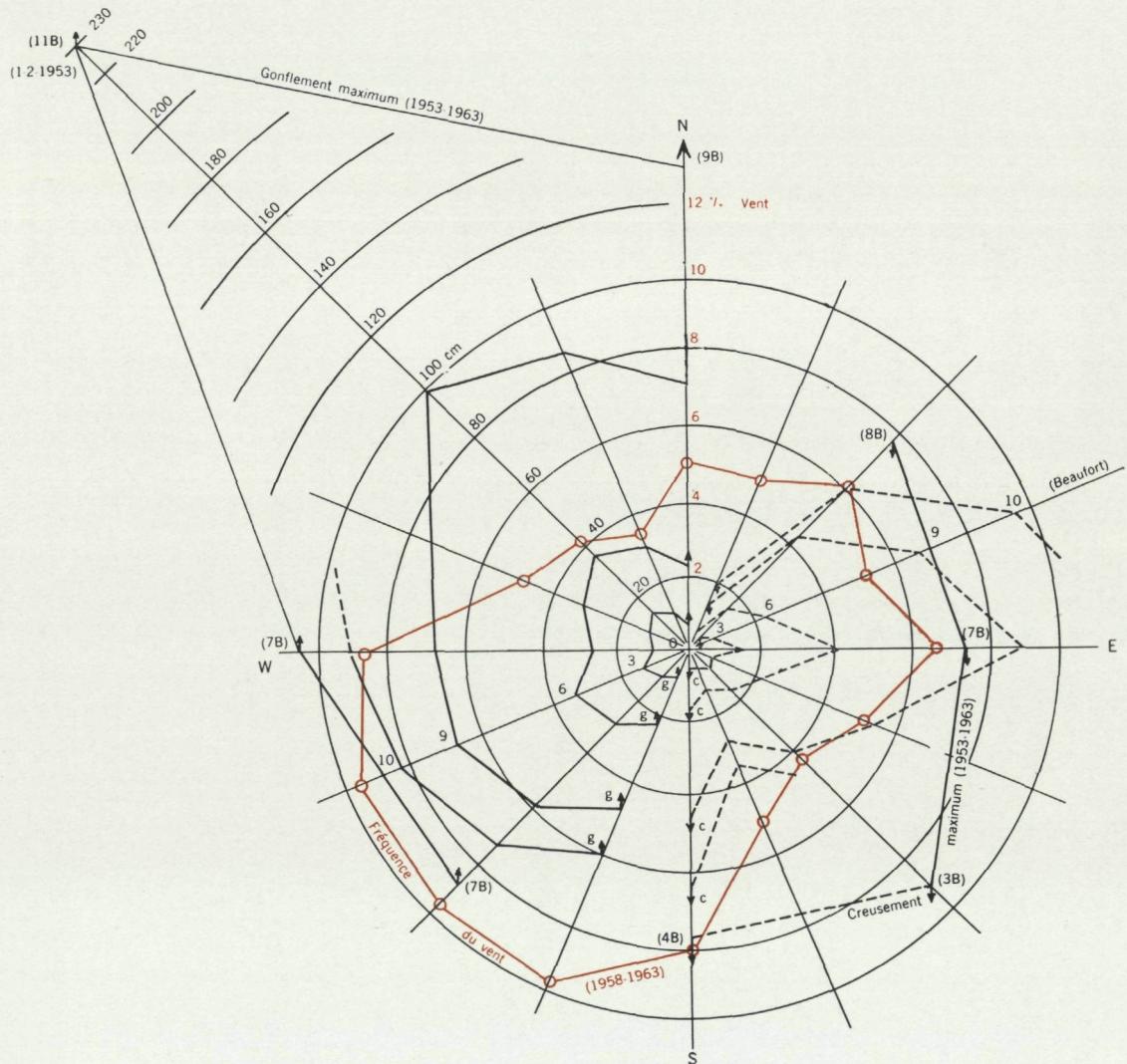
Enfin une troisième figure, superposée aux deux précédentes, donne la fréquence du vent, à Ostende, pour la période 1958-1963.

Il y a lieu de remarquer ici que par suite de l'inertie qui s'oppose aux sollicitations du vent, le régime propre au système des vagues ou de la houle, lié à l'évolution d'une perturbation atmosphérique déterminée, ne se forme que progressivement.

Il en est de même du retour au calme de l'état de la mer.

EFFET DU VENT SUR LE NIVEAU DE LA MER A OSTENDE

(effet barométrique compris).



Les courbes g et c donnent des valeurs moyennes observées en 1929-1939 par vents de force 3, 6, 9 et 10 Beaufort.

Fig. 4.

d) Définition des marées tempêtes à Ostende.

Les qualifications particulières données autrefois aux marées tempêtes sont actuellement codifiées et répondent aux définitions précises suivantes :

- La *marée tempête*, appelée « *Hoge Tij* », a lieu dès que le niveau de la mer atteint la cote d'alerte, zéro Z + 5,50 m ou zéro H + 5,78 m. Elle ne s'est présentée que onze fois en dix ans.
- La *marée tempête extraordinaire*, qu'on appelle « *Gevaarlijke Stormtij* », a lieu dès que la cote atteint zéro Z + 5,75 m ou zéro H + 6,03 m. On ne l'a constatée que deux fois en dix ans.

e) Déformation des vagues sur les hauts-fonds à l'approche du littoral : déferlement et ressac.

Les vagues en s'approchant de rivages peu profonds, subissent d'importantes modifications dans leur structure, tout en conservant leur périodicité. Leur célérité et leur longueur diminuent, mais leur amplitude augmente progressivement et lorsque le manque de profondeur finit par trop freiner le creux de la vague, elle déferle et engendre, surtout lorsque la violence du vent reste soutenue, une vague de translation qui se rue à l'assaut des ouvrages de défense implantés le long du rivage (digues).

Il arrive, généralement immédiatement après le choc, que l'interférence des vagues réfléchies avec celles qui suivent provoque un ressac. Ce dernier peut, sous l'action des violentes rafales qui caractérisent les vents de tempête, projeter d'importants paquets d'eau par dessus les digues, à une cadence parfois fort inquiétante (toutes les cinq à dix secondes).

On conçoit que, le long du littoral, la violence de ces phénomènes soit de nature à rendre fort difficile la mesure de la hauteur des vagues proprement dites. D'ailleurs les marégraphes, dont le rôle est de les enregistrer, se trouvant nécessairement en un endroit bien abrité de l'avant-port, ne sont pas toujours en mesure d'en rendre une image rigoureusement fidèle.

f) Fréquence des marées tempêtes.

Les marées tempêtes extraordinaires sont peu fréquentes : au cours de l'intervalle de 1901-1963, on en a observé huit, toutes en hiver, de novembre à avril.

Les fortes tempêtes de NE à SE (anticyclones) se produisent aux mêmes époques mais sont moins fréquentes. Elles sont moins redoutées sur nos côtes, qui se trouvent alors sous le vent, parce qu'elles abaissent le niveau de la mer. Néanmoins, en diminuant la profondeur, elles peuvent créer de sérieuses difficultés à la navigation, surtout par marée basse, aux endroits normalement peu profonds des passes ou des seuils.

Remarquons que la mer peut gonfler considérablement sous l'action d'une forte houle, alors que le temps est relativement calme. Ce cas peut se produire par très forte tempête sévissant dans le nord, généralement entre l'Ecosse et la Norvège, dont la houle se propage vers le sud, jusqu'à venir déferler sur nos rivages.

g) Perturbation de l'horaire de la prédiction.

Les forts vents cyloniques ou anticycloniques bouleversent généralement l'horaire de la prédiction. Aussi, ne sont pas rares, des avances, par vents de W à N ou des retards, par vents d'est, de près d'une heure sur l'arrivée de la pleine ou basse mer.

h) Organisation des services d'annonce des marées tempêtes.

Outre les services belges de surveillance chargés d'alerter les instances intéressées en cas de menace de fortes marées tempêtes, les Pays-Bas ont, depuis 1959, un service spécial d'alerte des marées tempêtes, la S.V.S.D. (*Storm Waarschuwingdienst*), qui relève du

Waterstaat et travaille en collaboration constante avec un organisme spécialisé dans la prévision des niveaux critiques, le *Dienst der Waterstandsverwachting* qui dépend du *Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut de De Bilt* (K.N.M.I.).

Le S.V.S.D. alerte immédiatement, par télégramme, les services belges intéressés, le Service hydrographique de la côte et les Services maritimes d'Anvers, dès que la probabilité d'arrivée de la première cote d'alerte se précise.

2. Les marées tempêtes de l'Escaut.

a) Définition. — Caractéristiques.

On distingue deux degrés de marées tempêtes d'après leur violence.

A Vlissingen, il y a *marée tempête*, dès qu'est atteint le niveau 3,10 m N.A.P. ou 5,50 m N.D.G., ce qui se produit douze fois en dix ans.

Il y a marée tempête extraordinaire, lorsqu'a été atteinte la cote 3,50 m N.A.P. ou 5,90 m N.D.G., ce qui arrive une fois tous les dix ans.

A Anvers, il y a *marée tempête*, appelée « *Gewone Stormvloed* », dès qu'est atteinte la cote 6,50 m N.D.G., ce qui arrive sept fois en dix ans.

Il y a marée tempête extraordinaire, qu'on appelle « *Buitengewone Stormvloed* », quand le niveau atteint 7,00 m N.D.G., ce qui arrive deux fois en dix ans.

L'onde de marée qui remonte l'Escaut, se présente dans la zone estuarienne sous l'aspect normal ou anormal, suivant que l'état de la mer, dont elle dérive, fut calme ou agité. Il s'ensuit que sur le fleuve, les effets se caractérisent, comme en mer, par des gonflements ou des creusements, en provenance d'actions cycloniques appelés « *marée tempête* » ou « *marée tempête extraordinaire* », dont nous venons de voir la définition, ou d'actions anticycloniques suivant le cas.

Remarquons que l'orientation WNW de la zone estuarienne favorise particulièrement le maintien, aussi bien des hauts niveaux par vents W & NW, que des bas niveaux par vents d'E, mais que par contre, la violence de la houle fléchit heureusement assez vite en pénétrant dans le fleuve.

Les marées tempêtes qui se produisent aux époques des syzygies sont toujours parmi les plus dangereuses par les dégâts qu'elles causent, tels que : ruptures de digues, destructions d'ouvrages de protection et de balisage, arrachements et dérives de bouées sous la violence du courant.

Les statistiques nous apprennent que dans le passé, à de rares exceptions près, les fortes marées tempêtes eurent généralement lieu aux environs de la pleine ou nouvelle lune.

b) Fréquence.

De plus, le tableau qui suit montre que les plus fortes marées tempêtes, échelonnées de 1825 à 1961, eurent lieu exclusivement durant le semestre : novembre-avril. Ajoutons que fin novembre et fin janvier, sont les époques les plus redoutées. Elles se caractérisent, en effet, par la plus grande fréquence des marées tempêtes.

Nos premiers enregistrements de marée datent d'il y a moins de cent ans.

Pourtant, s'il nous est impossible d'évoquer des cas précis situés dans un lointain passé, nous avons par contre, retrouvé des repères gravés dans la pierre de taille du bajoyer nord

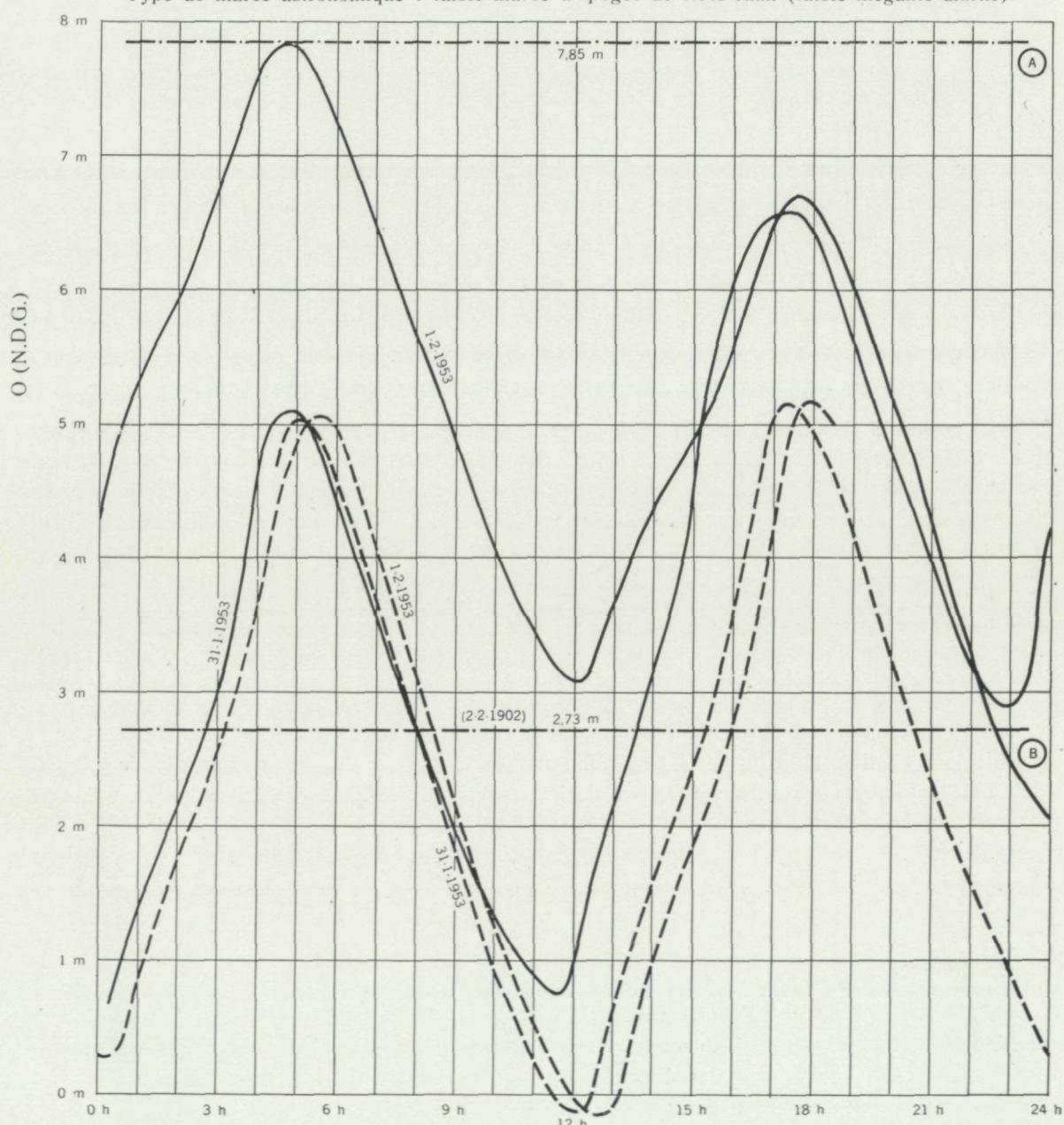
MAREE TEMPETE EXTRAORDINAIRE DU 1^{er} FEVRIER 1953, OBSERVEE A ANVERS.

Pleine lune 30 janvier
 Apogée de la lune 1 février
 Déclinaison de la lune $8^{\circ} 00'$
 Déclinaison du soleil $-17^{\circ} 15'$
 Cyclone. Vent WNW. Pointes de près de 100 km/h.

Niveaux extrêmes de la période de marée.

	prédicts	observés	$ \Delta $
Marée basse . . .	0,27 m	2,90 m	2,63 m
Marée haute . . .	5,06	7,85	2,79
Marée basse . . .	— 0,15	3,08	3,23

Type de marée astronomique : faible marée d'apogée de vives-eaux (faible inégalité diurne).



Propagation de la marée haute.

———	Marée observée.	Zandvliet	7,87 m
— - -	Marée prédict.	Ecluse Baudouin	8,02
(A) — - -	Marée haute la plus haute connue.	Hemiksem	7,48
(B) — - -	Marée haute la plus basse connue.	Tamise	7,30
		Termonde	6,83
		Gentbrugge	6,42

Fig. 5.

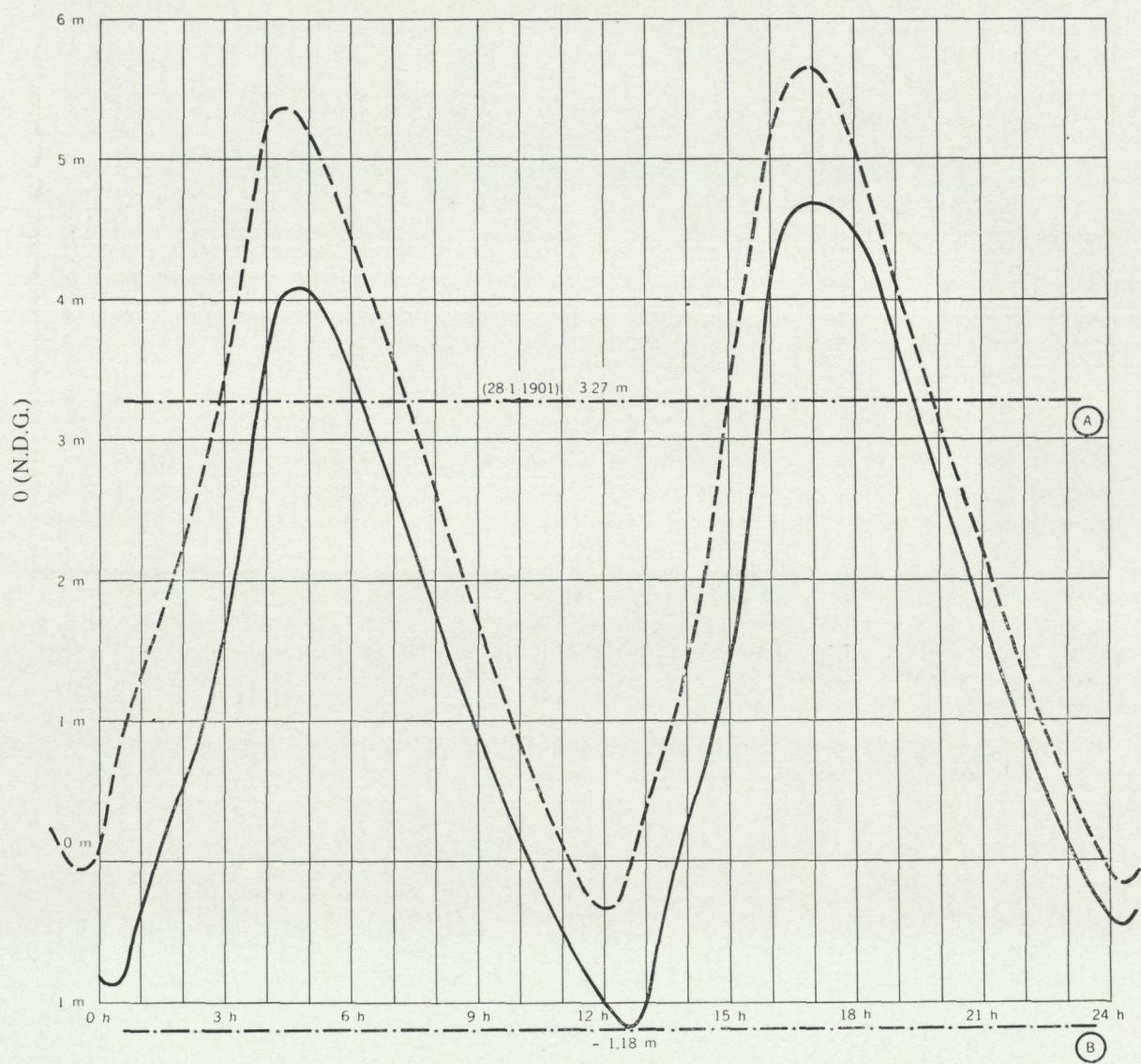
MAREE EXCEPTIONNELLEMENT BASSE DU 15 MARS 1964.

Nouvelle lune 14 mars.
 Périgée de la lune 17 mars
 Déclinaison de la lune $-2^{\circ} 05'$
 Déclinaison du soleil $-2^{\circ} 12'$
 Anticyclone. Vent ENE. Pointes de 50 km/h.

Niveaux extrêmes des périodes de marée.

	<i>prédis</i>	<i>observés</i>	$ \Delta $
Marée basse . . .	— 0,06 m	— 0,90 m	0,84 m
» haute . . .	5,39	4,11	1,28
» basse . . .	— 0,34	— 1,18	0,84 *
» haute . . .	5,66	4,70	0,96
» basse . . .	— 0,19	— 0,48	0,29

A N V E R S



Marée observée.

Marée prédict.

- (A) ——— Marée basse la plus haute connue.
- (B) - - - Marée basse la plus basse connue.

* Le 31-1-1956, marée basse = — 1,17 m et $|\Delta| = 0,93$ m.

Fig. 6.

de l'écluse Bonaparte à Anvers, indiquant deux niveaux, accompagnés de dates commémorant l'existence de deux fortes marées tempêtes qui eurent lieu les 4 février 1825 et 31 janvier 1877.

Par ailleurs, du document fondamental que constitue le rapport « Verslag over de stormvloed 1 februari 1953 », publié par le *Rijkswaterstaat* néerlandais en 1961, nous avons extrait trois dates relatives à de fortes marées tempêtes observées à Vlissingen qui, traitées par corrélation, paraissent avoir engendré également de très hauts niveaux à Anvers, respectivement les 20 décembre 1862, 22-23 décembre 1894 et 29 novembre 1897. Nous insérons ces valeurs dans le tableau ci-dessous, qui contient la série complète des plus fortes marées tempêtes observées à Anvers depuis 1825 jusque fin 1965.

Date	Cote (Zéro N.D.G.)	Circonstances atmosphériques
4 février 1825	6,92 m	
20 décembre 1862	6,86 m ± 0,20	
31 janvier 1877	7,12 m	
22/23 décembre 1894	6,99 m ± 0,20	
29 novembre 1897	7,07 m ± 0,20	
12 mars 1906	7,15 m	
13 janvier 1916	7,02 m	
26 novembre 1928	7,15 m	
23 novembre 1930	7,30 m	
2 avril 1943	7,03 m	
1 mars 1949	7,08 m	
1 février 1953	7,85 m	
23 décembre 1954	7,11 m	
21 mars 1961	6,97 m	
10 décembre 1965	6,99 m	

Les figures 5 et 6, montrent les marégrammes des marées extrêmes enregistrées à Anvers, le 1^{er} février 1953 et le 15 mars 1964, qui ont produit respectivement la haute mer la plus haute et la basse mer la plus basse connues jusque fin 1965. Ces marégrammes sont superposés des courbes représentant la prédition de ces marées, c'est-à-dire leur allure normale, pour montrer comment les écarts de niveau ont varié.

V. — SALINITE, TEMPERATURE ET DENSITE DES EAUX DE LA MER DU NORD ET DE L'ESCAUT MARITIME.

1. Salinité de la mer du Nord.

La salinité de la Mer du Nord, dépend du lieu, du moment, de l'intensité de la marée et de la saison.

Il s'agit de la salinité totale telle que Knudsen l'a définie, c'est-à-dire la somme de tous les sels.

Ces facteurs jouent peu en haute mer, milieu relativement stable, mais deviennent agissants à mesure qu'on s'approche du rivage. De plus, la courbe journalière de la salinité révèle tout de suite la corrélation semi-diurne d'une marée saline, dont le maximum et le minimum

ont généralement lieu vers les étages de flot et de jusant, avec des amplitudes d'autant plus sensibles qu'on s'approche davantage des zones fluviales ou de celles qui se trouvent sous leur dépendance..

Le long des côtes, elle subit l'influence de l'apport des eaux douces ou saumâtres d'origine fluviale, dont l'importance varie avec la saison et peut devenir considérable.

Les courants de flot et de jusant favorisent les phénomènes de diffusion et de mélange, déplacent sans cesse les masses d'eau et créent, pendant le flot dans le SW, une importante pénétration d'eau venant de la Manche, où la salinité est généralement plus forte, avec des maxima de plus de 36 ‰.

Les résultats d'observations faites au bateau-phare « West Hinder », situé à une vingtaine de milles au large d'Ostende, montrent que pour la période 1902-1914, la salinité moyenne est de 34,33 ‰, le maximum absolu de 35,20 ‰ et le minimum absolu de 32,86 ‰ (fig. 7).

Pour la période 1950-1955, la moyenne marque 34,25 ‰, le maximum absolu 35,35 ‰ et le minimum absolu 34,82 ‰.

L'amplitude de la marée saline y est en général très faible, de l'ordre de 0,5 ‰.

La différence de salinité entre la surface et le fond est peu sensible et reste généralement inférieure à 0,5 ‰.

Le tableau ci-après résume certains résultats d'observations continues de la salinité, durant une période entière de marée, exécutées en 1961, par la Force navale belge, dans les eaux côtières.

<i>Station d'observation</i>	<i>Date</i>	<i>Marée</i>	<i>Salinité maximum</i>	<i>Phase</i>	<i>Salinité minimum</i>	<i>Phase</i>	<i>Amplitude saline</i>
Au bateau-phare « Wandelaar ».	1961 24.25/7	mar. moy	‰ 31,90	flot	‰ 30,10	jusant	‰ 0,80
Wielingen . . .	15.16/3	vive-eau	‰ 30,70	»	‰ 28,80	»	‰ 1,90
West-Diep . . .	11.12/7	mar. moy	‰ 33,90	»	‰ 32,70	»	‰ 1,20
Ostende	16.17/3	vive-eau	‰ 33,00	»	‰ 29,30	»	‰ 3,70
Nieuport	24.25/8	vive-eau	‰ 34,70	»	‰ 34,40	»	‰ 0,30

Considérées à marée égale, ces quelques valeurs de flot, quoique isolées, permettent d'entrevoir l'effet de l'apport de la Manche où, nous l'avons dit plus haut, la salinité est plus forte qu'en mer du Nord. Le long du littoral, à l'est de Nieuport, les écarts d'amplitude montrent, comme il fallait s'y attendre, l'influence très marquée des importants apports d'eau douce qui affectent cette zone.

SALINITE DE L'EAU DE MER OBSERVEE DE 1902 A 1914.

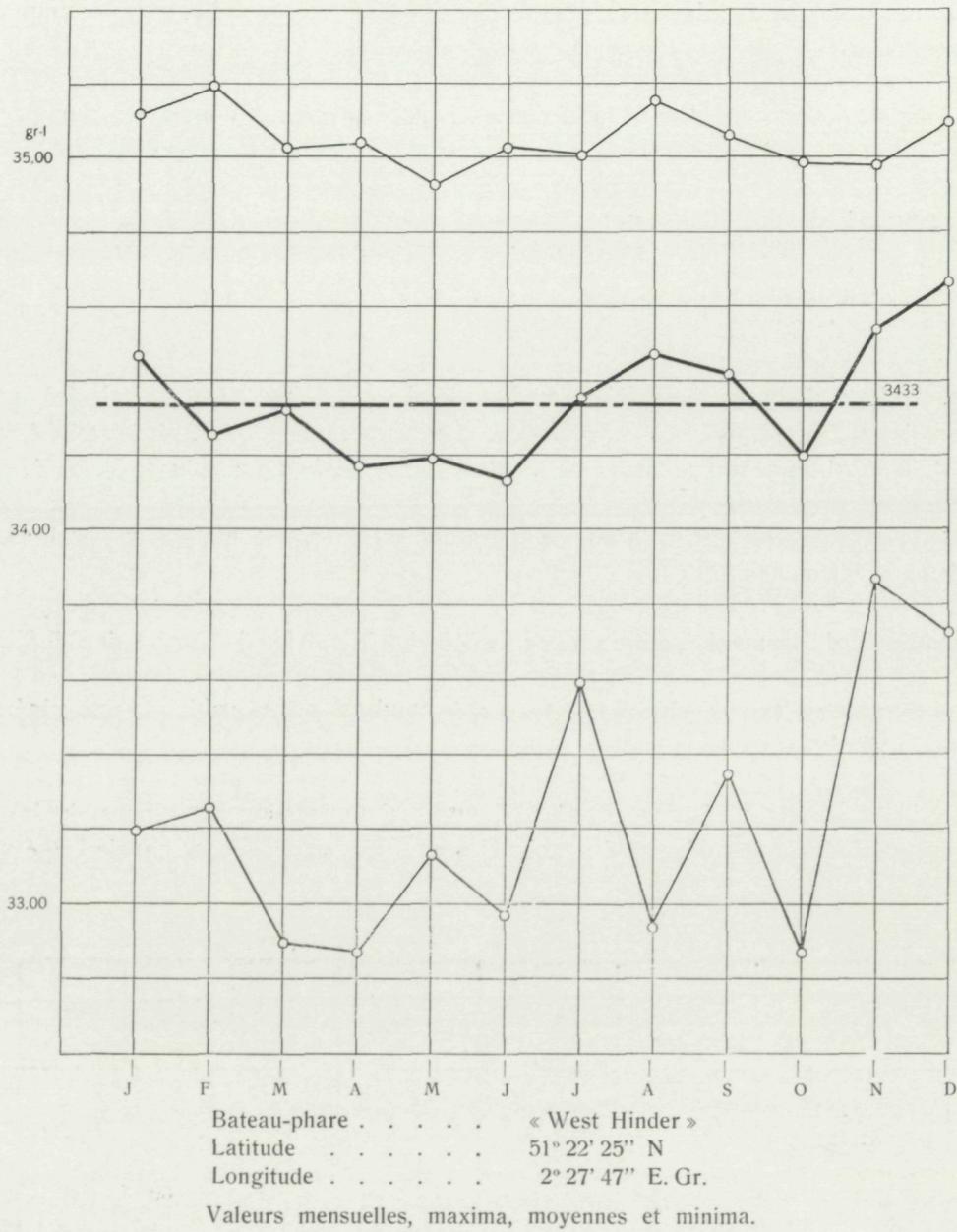


Fig. 7.

2. Salinité des eaux de l'Escaut.

a) Caractéristiques. — Chlorinité.

Les eaux d'un fleuve à marée sont, sur sa partie maritime, salées en aval et plus ou moins saumâtres en amont où, sous l'action du brassage des eaux de flot par les eaux douces d'amont, leur salinité décroît régulièrement, parfois jusqu'à s'annuler, comme c'est le cas sur l'Escaut, ainsi que le montre le graphique de la chlorinité de ses eaux, qui figure sur la planche 18^B.

Actuellement, les services maritimes d'Anvers emploient trois salinomètres, qui enregistrent la conductivité des eaux de l'Escaut, à Anvers, Liefkenshoek et Zandvliet, dont les indications, contrôlées par la méthode de Mohr, ont donné entière satisfaction, moyennant les précautions indispensables nécessitées par la forte turbidité des eaux.

Nous savons, depuis les travaux de l'océanographe Knudsen, que les sels contenus dans l'eau de mer sont dans un rapport sensiblement constant et que cette propriété est d'application pour les eaux de la partie maritime de l'Escaut.

Il s'ensuit que pour connaître la salinité totale, il suffit de doser un seul élément. Celui-ci est généralement le chlore, dont on détermine la teneur, notamment au moyen de la méthode de titrage indiquée par Mohr.

La teneur en chlore ou chlorinité, s'exprime en mgr-litre, ou mieux en millivalences, en partant de 1 millivalence = 35,5 mg de chlore par litre.

La salinité moyenne de la mer du Nord, au large de nos côtes, est de 34,33 %. En appliquant la formule de la salinité totale de Knudsen, $S \text{ \%} = 1,805 \text{ Cl}^- + 0,03$, on trouve que sa chlorinité est de 19 gr/l, ou de 535 millivalences.

En exprimant le chlore en millivalences (mv), la formule s'écrit : $\text{Cl (mv)} = 28,168 \text{ Cl (gr/l)}$.

Il n'est guère possible de retracer dans le détail l'historique des recherches sur la salinité dans le bassin maritime de l'Escaut. Celles qui eurent lieu avant 1940, furent pour la plupart éparses, sporadiques et malheureusement perdues en grande partie au cours de la guerre. En 1944, on décida les opérations nécessaires pour recueillir les éléments indispensables aux études envisagées. Ce n'est qu'à partir de 1948, que les travaux de prélèvement, de mesure et d'analyse furent entrepris systématiquement, qui conduisirent dès la fin 1957, à des connaissances relativement étendues des caractéristiques essentielles d'importants facteurs, tels que chlorinité, température, densité, ainsi qu'à l'étude de fécondes recherches sur la corrélation fonctionnelle entre la chlorinité et le débit supérieur.

b) Variation de la chlorinité locale.

Comme il fallait s'y attendre, il fut constaté dès le début des mesures, que la chlorinité, en un point donné variait, en ordre principal, comme la marée locale et que sa courbe, d'ailleurs sinusoïdale, présentait un maximum à l'étale de flot et un minimum à l'étale de jusant.

La chlorinité, variant suivant l'intensité du brassage des eaux, lequel est fonction de l'importance du débit d'amont, varie selon les éléments hydrologiques et climatologiques de la saison (ruisselement, pluviosité) et peut varier d'une manière assez complexe, tout en gardant la même allure géométrique. Ceci pour faire allusion aux variations d'amplitude, qui arrivent à aplatiser pour ainsi dire complètement la courbe, par très fortes crues, généralement de décembre à mars, en la réduisant à une horizontale dont le niveau, à Anvers, n'est jamais descendu au-dessous de 4 millivalences. L'image de l'évolution de la chlorinité locale, au cours d'une période de marée moyenne, est clairement rendue par le graphique de la marée à Anvers, qui figure sur la planche 18^B.

c) Variation saisonnière de la chlorinité.

Il est certain que l'apport des eaux douces du bassin versant joue un rôle capital dans la variation de la chlorinité et pour nous en convaincre, il suffit de se reporter à la figure 8 qui montre, en effet, combien la chlorinité est sensible à l'abondance du débit supérieur.

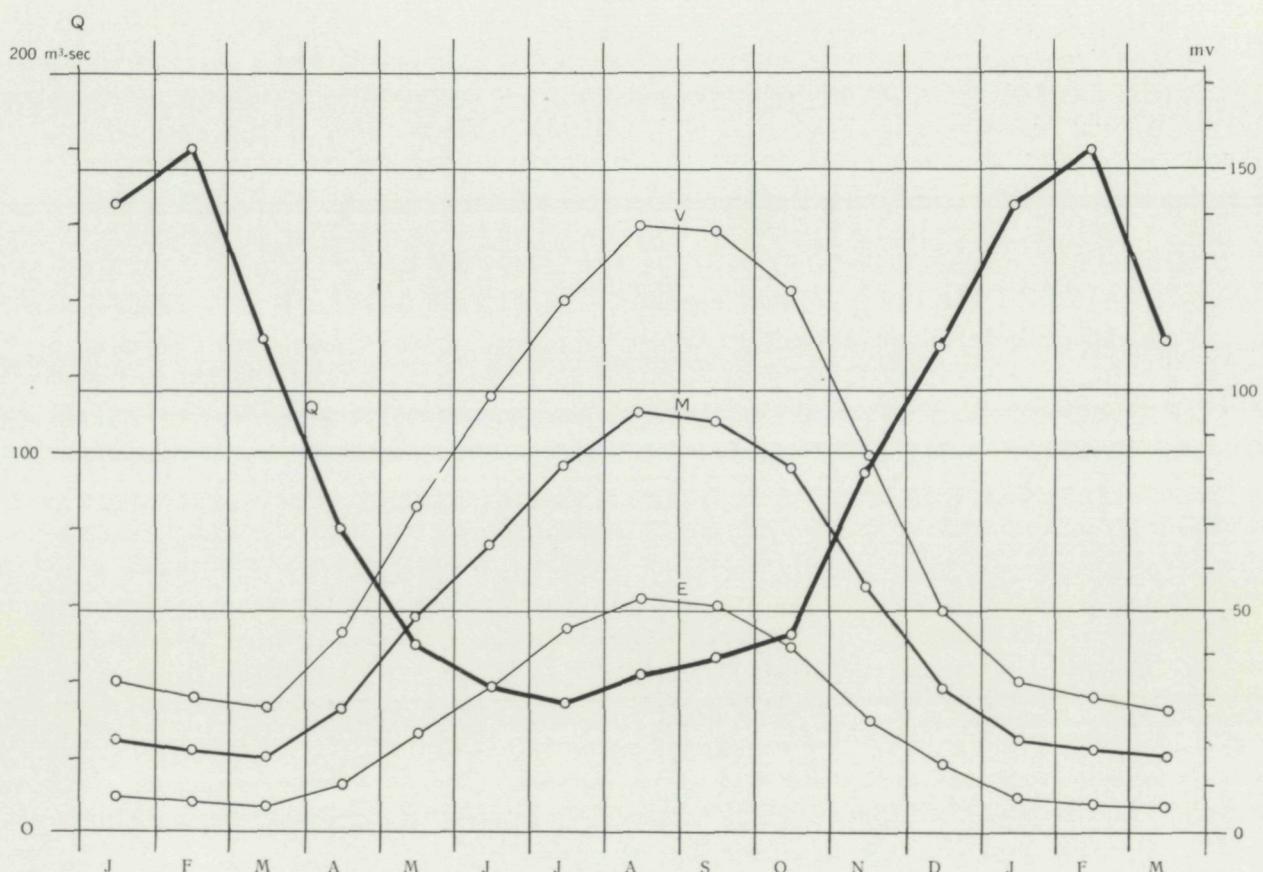
Il s'agit d'une dépendance dont le caractère fonctionnel est illustré par la figure 9 qui, quoique n'étant encore qu'une ébauche, montre la réalité de la relation : débit supérieur = fonction de la chlorinité.

d) Propagation de l'onde saline.

Cette propagation est clairement illustrée par le graphique consacré à ce sujet, (cf. planche 18^B) résultant d'observations hebdomadaires faites durant toute l'année 1950.

Les courbes enveloppes V et E, de ce graphique, qui sont respectivement les lieux des maxima (étale de flot) et minima (étale de jusant), forment un ventre (Δ maximum \approx 100 millivalences) qui, en l'occurrence, se trouve dans la région de Doel, mais peut se déplacer, sous l'influence du débit supérieur : vers l'amont, pendant l'étiage, vers l'aval, en période de crue.

CHLORINITE ET DEBIT SUPERIEUR A ANVERS DE 1949 A 1957.
VALEURS MOYENNES.



Chlorinité exprimée en millivalence (mv).

V : étale de flot.

E : étale de jusant.

Q : débit supérieur.

$$M = \frac{V + E}{2}$$

Fig. 8.

CORRELATION ENTRE LA CHLORINITE ET LE DEBIT SUPERIEUR.

Anvers
moyennes annuelles (1949-1957).

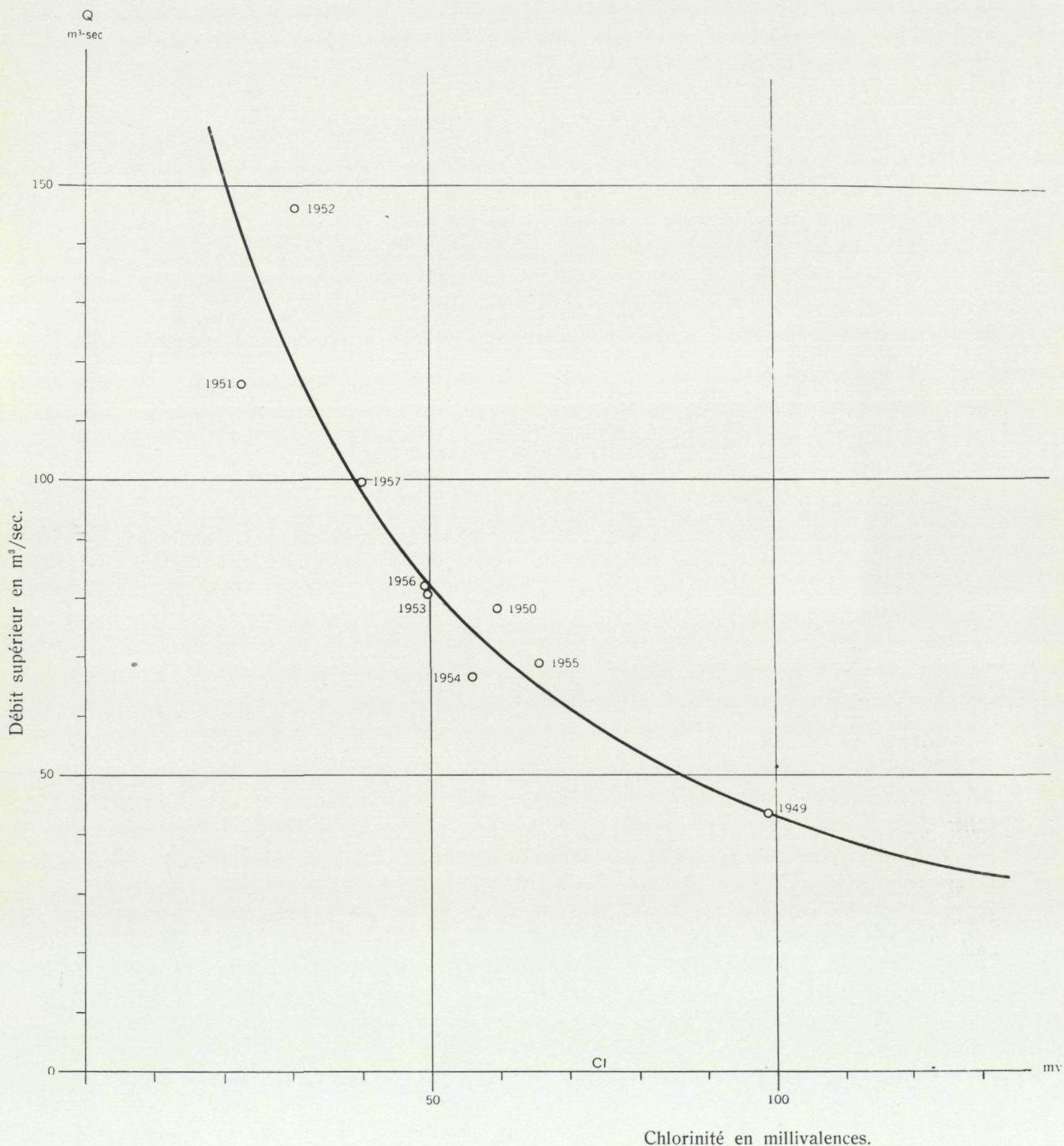


Fig. 9.
Chlorinité en millivalences.

3. Température de la mer du Nord.

A la vue des courbes de la figure 10, on est surpris par la stabilité saisonnière du climat qui règne au sein des eaux de la mer.

Abstraction faite des régions côtières ou fluviales, où les températures se trouvent sans cesse troublées par celles des eaux de l'intérieur ou des laisses de marée (plages, estran), on voit que la zone du large est le siège d'une évolution thermique bien régulière.

L'examen des courbes précitées montre que la température moyenne accuse un gain annuel de $11,6^{\circ}\text{C}$ entre ses valeurs extrêmes et que celles-ci, comme d'ailleurs les écarts maxima par rapport à la moyenne, ont toutes lieu en février et août. Le mois de juin se montre le plus stable, avec une dispersion inférieure à 1°C .

Par la forte capacité calorifique de l'eau de mer ($0,95$), sa température diurne varie assez peu pour rendre son amplitude pratiquement insensible, rarement supérieure à $0,5^{\circ}\text{C}$.

Les différences observées entre la température du fond et celle de la surface, ont toujours été très faibles, généralement inférieures à $0,5^{\circ}\text{C}$ (en moins sur le fond).

4. Température des eaux de l'Escaut à Anvers.

La température fait l'objet d'observations effectuées régulièrement à Anvers, depuis 1949, directement au thermomètre et dès 1953, par enregistrement au moyen d'un thermomètre à tension de vapeur saturante et d'un appareil à couple thermo-électrique.

Les mesures s'appliquent à des profondeurs qui varient de la surface ($0,50\text{ m}$ au-dessous pour les prises directes), à $0,50\text{ m}$ sous le niveau des plus basses mers connues (à — $1,70\text{ m}$, niveau d'immersion obligatoire des cellules, à cause de la marée). De nombreuses mesures instantanées, effectuées sur toute la verticale en de nombreux points, ayant montré que les variations en profondeur étaient insensibles, nous estimons que les mesures précitées peuvent être considérées comme appartenant à un ensemble homogène.

a) Variation semi-diurne.

L'enregistrement de la température révèle une variation semi-diurne, dont l'amplitude est fonction de l'écart entre la température des eaux de la mer et celles du bassin versant. Cet écart est de nature saisonnière; de plus, on observe généralement que d'octobre à mars, la température du flot est supérieure à celle du jusant. En été, celle du jusant l'emporte nettement.

Les extrêmes ont lieu aux étales (comme pour la salinité) et les plus fortes amplitudes semi-diurnes observées à Anvers, ont été de l'ordre de $2,5^{\circ}\text{C}$ (souvent en avril).

b) Variation saisonnière.

L'examen du graphique des moyennes et extrêmes mensuels observés à Anvers, au cours de la décennie 1954-1963 (fig. 11), montre tout de suite l'analogie de ces variations avec celles de la mer du Nord (fig. 10).

Les valeurs fluviales extrêmes dénotent néanmoins une amplitude thermique plus forte, ce qui n'est pas surprenant, eu égard à l'influence de la température des eaux supérieures provenant du ruissellement sur un sol extrêmement sensible aux variations thermiques de l'air, dont l'amplitude est naturellement beaucoup plus forte encore.

Ces courbes, remarquables par leur similitude, et en dépit de très légères discordances d'ordre chronologique pour les valeurs maxima montrent clairement l'évidence de la corrélation entre les trois éléments : air-eau de mer (flux)-eaux supérieures (qui s'écoulent au reflux).

De plus, bien que l'amplitude moyenne décennale de l'air soit inférieure de $0,9^{\circ}\text{C}$ à celle de l'eau, l'ampleur des grandes variations climatiques de l'air, dont l'amplitude atteint $53,5^{\circ}\text{C}$, n'influence que posément et d'une manière modérée les masses d'eau fluviale, dont l'amplitude à Anvers, n'est que de $26,3^{\circ}\text{C}$ (et certainement moins encore celles de la mer)

TEMPERATURE DE L'EAU DE MER, OBSERVEE DE 1902 A 1914
AU BATEAU-PHARE « WEST HINDER ».

Latitude $51^{\circ} 22' 25''$ N.
Longitude $2^{\circ} 27' 47''$ E. Gr.

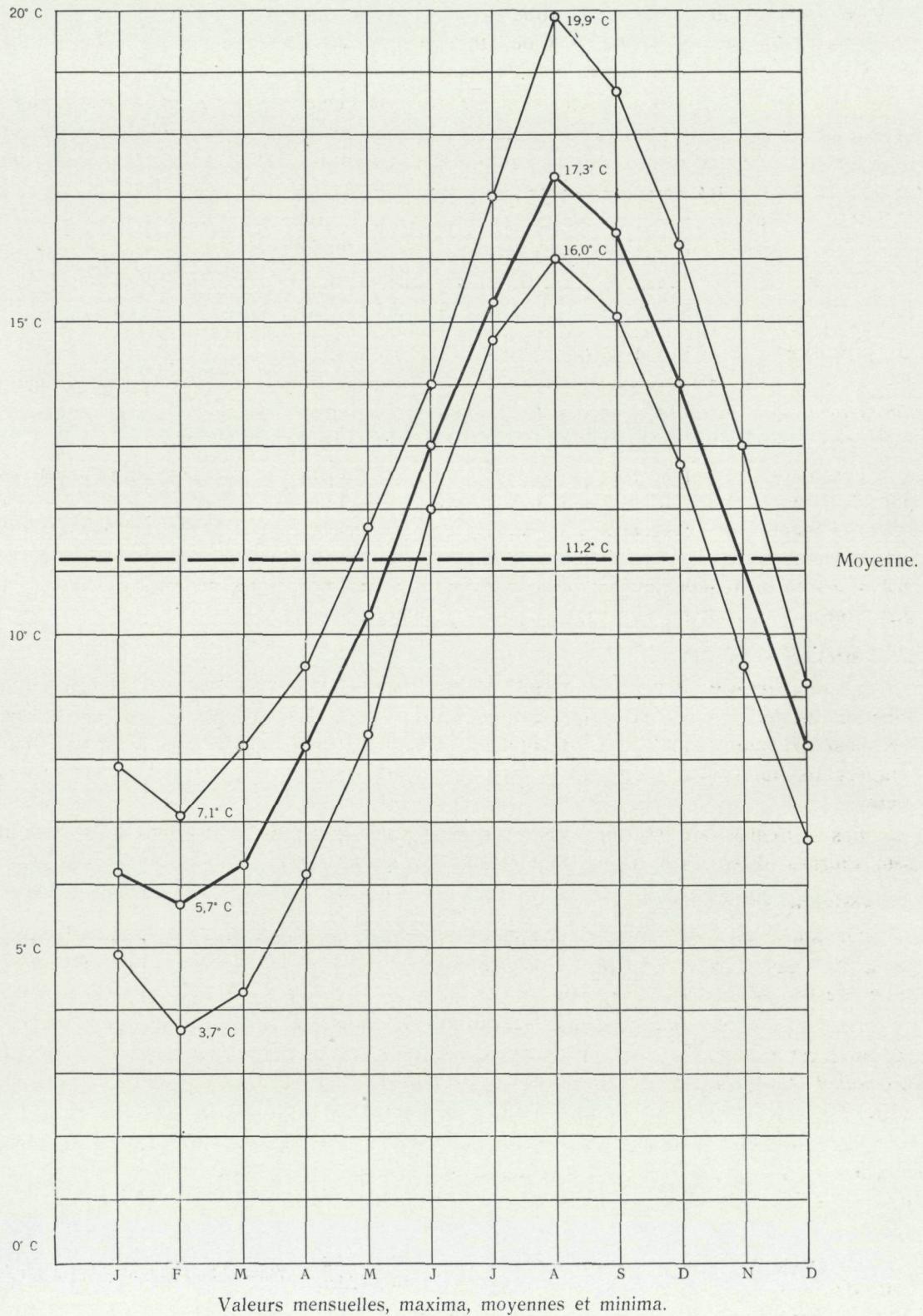
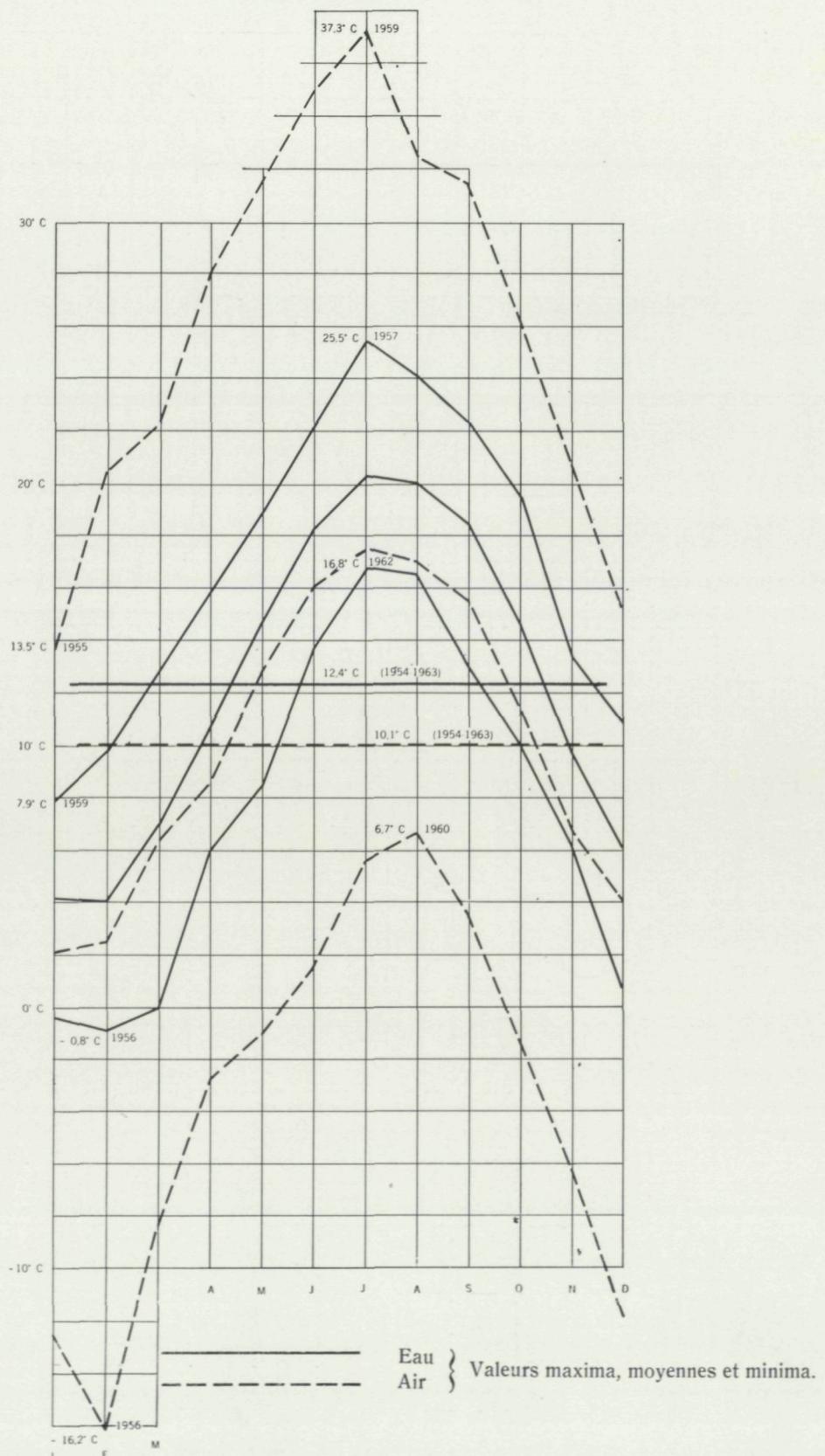


Fig. 10.

TEMPERATURES DE L'ESCAUT ET DE L'AIR.

Valeurs mensuelles : extrêmes et moyennes.

Anvers
1954-1963



La mécanique de ces phénomènes s'explique par les très fortes différences de chaleur spécifique entre l'air (0,24), l'eau de mer (0,95), l'eau fluviale qui est saumâtre (0,97) et le sol (0,40).

Il s'ensuit que, d'une manière générale, les eaux du fleuve sont en moyenne plus chaudes que l'air tout en étant plus froides en hiver et plus chaudes en été que celles de la mer. Par ailleurs, bien que nos données, relatives à la mer du Nord et de l'Escaut ne soient pas précisément contemporaines, on peut néanmoins admettre que la comparaison de leurs valeurs moyennes décennales, offre un intérêt certain.

Elle permettrait, en effet, d'ajouter que la température moyenne de nos eaux littorales ($11,2^{\circ}\text{C}$), est du même ordre de grandeur que celle de l'Escaut à Anvers ($12,4^{\circ}\text{C}$).

5. Densité « *in situ* » des eaux de la mer du Nord.

En océanographie on exprime, usuellement, le poids de l'eau de mer, par sa densité « *in situ* », qui représente le poids de l'unité de volume, au sein de la masse liquide, au moment même du prélèvement.

On sait qu'elle varie essentiellement en fonction de deux facteurs :

- le poids des sels et d'autres éléments, dissous ou en émulsion (colloïdes) mais non en flottaison (plancton), variable saisonnière d'assez faible amplitude;
- en raison inverse de la température du prélèvement, également saisonnière mais à forte amplitude (*fig. 10*).

On sait de plus que pour une salinité de 35 ‰, l'eau de mer atteint sa densité maximum par $-3,5^{\circ}\text{C}$ et, comme elle se congèle dès $-2,0^{\circ}\text{C}$, cette valeur maximum reste inaccessible.

Des prélèvements d'échantillons, effectués de 1902 à 1914, au bateau-phare « West-Hinder », les densités « *in situ* » suivantes ont été déduites :

maximum (en février) :	1,0268;
minimum (en octobre) :	1,0241;
moyenne (mai et octobre) :	1,0259.

6. Densité « *in situ* » des eaux de l'Escaut à Anvers.

La densité des eaux de l'Escaut est une notion qui intéresse surtout l'organisation du transport maritime, parce qu'elle permet de calculer les variations du tirant d'eau d'un navire (calaison), sachant qu'il varie en raison inverse de la densité de l'eau, ainsi que son chargement.

Nous avons vu qu'il s'agit du poids d'un cm^3 d'eau, tel quel, au point et au moment où il fut prélevé, qui varie comme la composition et inversement avec la température.

Contrairement à ce qui se passe pour l'eau de mer, dont la densité est toujours supérieure à l'unité tout en gardant une faible amplitude saisonnière, la densité des eaux du fleuve est soumise à une variation plus ample et à Anvers, au cours de la période 1949-1958, la valeur moyenne a été de 1,0025 et les extrêmes, 1,01750 en septembre 1949 et 0,99880, en février 1957.

Par suite des variations de la densité, la calaison d'un navire augmente ou diminue suivant qu'il remonte ou descende le fleuve, sans toutefois dépasser le maximum exceptionnel de 2,7 % de sa valeur initiale (mer ou fleuve).

Notons que pour la région de Zandvliet, l'enfoncement ou la déjauge restent inférieurs à 1,6 % du tirant d'eau initial.

VI. — CONGELATION DE L'ESCAUT. — DERIVE DES GLACES.

Les eaux de l'Escaut se congèlent au cours d'hivers particulièrement rigoureux, généralement lors de périodes de grands froids, avec des minima inférieurs à -10°C . La congélation débute le long des rivages d'amont, où les berges exposées aux basses températures

de l'air durant de longs reflux, finissent par se trouver suffisamment frigorifiées pour geler les eaux qui les couvrent durant le flux. Elle s'opère d'autant plus facilement que les eaux des laisses sont moins épaisse et pour ainsi dire douces.

Ce schéma s'applique également au processus de la congélation des eaux du rivage proprement dit de notre littoral, c'est-à-dire de celles qui balayent nos plages.

Celles-ci sont d'ailleurs les seuls endroits où la glace peut se former. En effet, la température de congélation des eaux de la mer du Nord est de -2°C environ, valeur située à plus de 4°C au-dessous des minima observés au large.

On voit dès lors les glaces envahir toute la largeur, ce qui arrive en général assez rapidement en amont de Termonde d'où, disloquées par le jeu de la marée, elles sont emportées vers l'aval au jusant, où l'on assiste à une sorte de débâcle qui commence par le charriage de champs de macarons de glace (*pancake-ice*) qui, tout en dérivant tournent, s'entrechoquent et, si le gel persiste, finissent par se souder entre elles et former des champs de glace qui recouvrent toute la largeur. On conçoit que la dérive des glaces soit particulièrement redoutée à cause des dégâts considérables qu'elle occasionne aux ouvrages implantés dans le fleuve ainsi qu'au balisage dont elle détruit l'ordonnance en arrachant ou déplaçant les bouées.

Il n'est pas tellement rare que la prise totale des glaces s'étende jusqu'à l'estuaire et l'on ne s'étonnera pas en apprenant que ce cas s'est présenté une vingtaine de fois, depuis 1512, à raison de quatre fois, en moyenne, par siècle.

Parmi ces grandes offensives de gel, on se souvient de celle qui eut lieu en 1880, et qui interrompit toute navigation sur le fleuve pendant septante et un jours. Elle passe pour avoir été la plus rude de toutes celles connues à ce jour.

Plus près de nous, citons les hivers de 1901, 1908, 1929, 1942, 1946, 1956 et 1963, au cours desquels la navigation fut bloquée en amont d'Anvers pendant plusieurs semaines et très sérieusement entravée en aval et même complètement interrompue en 1929.

Notons qu'à de rares exceptions près, ces congélations mémorables eurent lieu en décembre, janvier, février et début mars.

VII. — LE FOND MARIN.

1. Les bases du nivellement dans la mesure des profondeurs (bathymétrie).

La bathymétrie du littoral belge nécessite l'emploi du « zéro Z », origine du nivellement des Travaux publics de 1840 à 1848, qui correspond au niveau moyen de l'ensemble des basses mers de syzygies, observées à Ostende de 1820 à 1834. Il se place à 2,426 m plus bas que le N.A.P. et à 2,297 m plus bas que le niveau moyen de la mer à Ostende (1930). Il est enfin à 0,280 m plus haut que le « zéro H », dont l'hydrographie de la côte se sert pour la réduction des sondes à Ostende.

Le « zéro Z » sert également de surface de référence pour la réduction des marées du littoral.

Pour la bathymétrie de l'Escaut, on fait usage, depuis 1888, du « zéro D.G. Kattendijk », dont le repère fondamental est situé à l'écluse Kattendijk à Anvers. Il se trouve 0,026 m plus haut que le « zéro Z ». Les Services maritimes d'Anvers le désignent actuellement par les sigles « N.K.D. », qui signifient « Nieuw Krijgsdepot », ce qui se traduit par « Nouveau Dépôt de la Guerre », ou « N.D.G. ».

Aux Pays-Bas, tous les travaux de nivellement, de réduction de marée ou de référence en bathymétrie, sont basés exclusivement sur la surface de niveau zéro, appelée : N.A.P. (*Normaal Amsterdams Peil*).

Aussi le N.A.P. est-il fort important pour tout ce qui concerne l'hydrographie de l'estuaire et de l'Escaut occidental (*Westerschelde*).

Le « zéro N.A.P. » est à 0,129 m au-dessus du niveau moyen de la mer à Ostende, à 2,426 m au-dessus du « zéro Z » et à 2,400 m au-dessus du « zéro D.G. Kattendijk ».

Notons que la Commission internationale du réseau européen unifié de nivellation, connu sous les sigles REUN, a adopté en 1959, à titre conventionnel, l'altitude origine du N.A.P., comme niveau fondamental de référence pour ses travaux qui visent, notamment, à préciser la nature du lieu des niveaux moyens de la mer.

2. Le zéro des cartes.

La bathymétrie est liée à des surfaces de réduction conventionnelles, lieux du « zéro des cartes », dont les niveaux, intentionnellement bas, varient essentiellement avec les caractéristiques locales de la marée. Cette particularité vise à réaliser une figuration des fonds telle que le marin, principal usager de ces cartes, soit assuré de trouver des profondeurs rarement inférieures à celles qu'elles indiquent.

Les profondeurs sondées au littoral belge, sont réduites au niveau d'une surface irrégulière, inclinée vers l'ouest et qu'on pourrait appeler la surface « H ». Elle est située partout au-dessous de la surface de niveau Z et son profil, le long du rivage, est déterminé par les cotes du tableau ci-dessous.

SURFACE « H »

Lieu	Cote par rapport au zéro Z
Frontière française	— 0,34 m
Nieuport	— 0,31
Ostende	— 0,28
Zeebrugge	— 0,14
Frontière néerlandaise	— 0,12

Depuis 1962, pour des raisons d'uniformité, le zéro N.D.G. de l'Escaut est remplacé par un zéro local, défini par le niveau moyen des basses mers de vive-eau. Il se présente comme suit :

ZERO LOCAL DE L'ESCAUT

Lieu	Cote par rapport au zéro N.D.G.
Vlissingen	— 0,10 m
Terneuzen	— 0,19
Hansweert	— 0,30
Zandvliet	— 0,12
Anvers	— 0,23
Hemiksem	— 0,18

Partout en amont de Hemiksem, le zéro N.D.G. a été maintenu.

Rien n'a été décidé jusqu'ici, quant au choix d'un zéro de réduction universel des sondes, pour les cartes marines.

La France adopte le zéro théoriquement le plus bas, déterminé par le niveau des plus grandes basses mers de vives-eaux, celles qui correspondent à un coefficient de marée 120 (notion liée à la théorie dynamique de Laplace, cf. « Annuaire des Marées de France »).

A la jonction de nos frontières littorales, le zéro local des cartes françaises se trouve 0,55 m plus bas que le zéro belge, qui est le zéro H local.

Le niveau moyen des basses mers de vive-eau (*Mean Low Water-Springs*), calculé sur une période lunaire de 18, 61 ans (période de révolution des noeuds lunaires), détermine le zéro des cartes anglaises, lequel se trouve plus haut que celui des cartes belges, d'environ 0,35 m.

Notre zéro local H, défini par le niveau moyen des basses mers de vive-eau (N.M.B.B.M.V.E.), appliqué depuis 1946, correspond sensiblement au zéro local néerlandais, désigné par les sigles : G.L.L.W.S. (*Gemiddeld laaglaagwaterspring*), lequel fut adopté en 1921.

Ces deux zéros de référence, H et G.L.L.W.S. satisfont parfaitement au vœu formulé au cours du symposium sur le choix de la « Basse Mer Internationale », organisé par le Bureau Hydrographique International, en 1926. En effet, la fréquence d'arrivée de basses mers plus basses que ces zéros, est inférieure à 12 %.

3. Relief du fond de la mer du Nord et profondeurs.

Le relief du fond marin est actuellement bien connu grâce aux nouvelles méthodes du levé hydrographique, aussi rapides que précises (position par « Decca » et sondage ultrasonore).

Le bassin méridional offre, dans son ensemble, l'aspect d'une vallée dissymétrique peu profonde dont le thalweg (sillon bathyal) profond de 40 m en moyenne, peu ondulé avec des extrêmes de 35 m à 65 m est sensiblement orienté au NNE.

Ce sillon est nettement plus rapproché de la côté anglaise. En le parcourant du sud au nord, on passe à :

- 8 milles au large de Douvres
- 39 milles d'Ostende sur le parallèle de ce port, sur une largeur totale de 57 milles
- 66 milles de Hoek van Holland, également sur le parallèle, sur 93 milles de largeur totale.

Il est clair que le versant oriental, façonné par la pénéplanation continentale soit beaucoup moins incliné. Aussi ses rivages et, en particulier, ceux qui intéressent nos côtes jusqu'au delta zélandais, sont-ils encombrés de hauts-fonds, sortes de bancs immersés, appelés « Bancs des Flandres ».

L'ensemble de ces sortes de cordons littoraux forme un relief qui paraît avoir été façonné par les forts courants de marée. La plupart de ces bancs sont en effet effilés et sensiblement orientés comme eux.

Cette zone, large de quelque 15 milles au droit de Nieuport et 7 milles au droit d'Ostende, présente des crêtes de moins de 4,0 m.

Le relief sous-marin est établi par un ensemble de sondes effectuées au cours de levés exécutés par les services hydrographiques belges et néerlandais, de 1935 à 1962. Les profondeurs sont exprimées en décimètres et réduites au zéro local de la carte : zéro H, ou G.L.L.W.S. dans les eaux néerlandaises. Les formes du relief marin ont été figurées par le tracé des isobathes de 0, 5, 8 et 12 mètres. Ces courbes attirent d'emblée d'attention sur les niveaux les plus intéressants, qu'il s'agisse des qualités nautiques des chenaux de navigation qu'elles indiquent ou de phénomènes de sédimentologie.

Le relief sous-marin intéressant le littoral belge en général, et les « Bancs des Flandres » en particulier, est stable; on s'en rend compte en comparant les premières cartes hydrographiques exactes, en commençant par celle qu'a levée Beaumtemps-Beaupré, entre 1799 et 1800, avec celles qui ont paru jusqu'à nos jours. Dans l'ensemble les fonds, tant en situation qu'en profondeur, n'ont guère changé.

Il semble bien que les tendances évolutives dans ce domaine, si elles existent, ne se manifestent actuellement qu'avec une réelle lenteur.

M.H. = Marée haute.
M.B. = » basse.

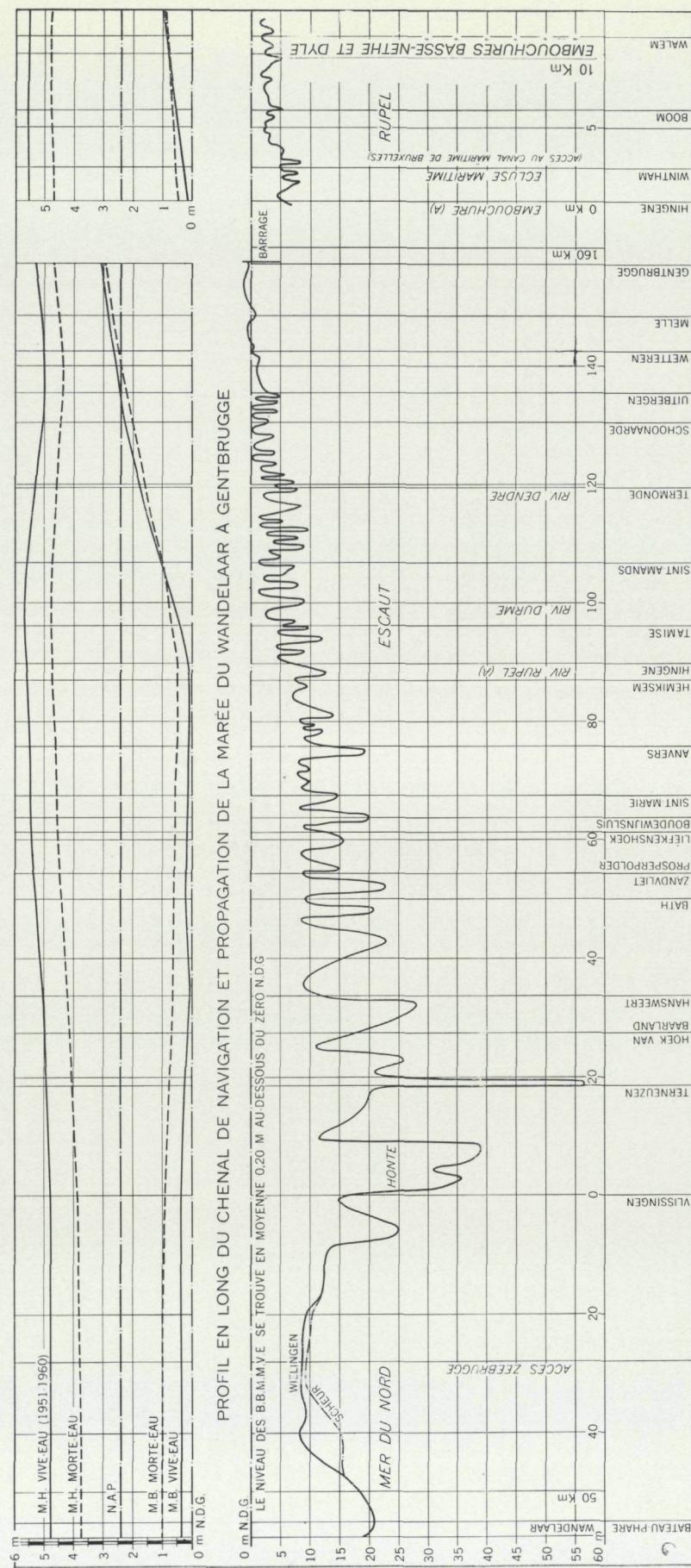


Fig. 12.

4. Qualités nautiques des chenaux d'accès à l'Escaut.

A 8 km au large de l'entrée du port d'Ostende, se trouve l'isobathe de 8 m; en la suivant vers l'est on entre dans le chenal d'accès à l'Escaut, d'une largeur moyenne de 300 m et d'une profondeur minimum de 8,50 m : c'est la « passe des Wielingen », en réalité le seuil de l'estuaire, qui s'étend sur près de 30 km entre la fosse marine et la fosse fluviale, limitées par l'isobathe de 12 m.

En son milieu, en face de Zeebrugge, se dresse le haut fond « Bol van Heist » dont la crête atteint la cote 3,60 m.

Plus à l'ouest, en face de Wenduine, entre Ostende et Zeebrugge, se dressent quelques macarons effilés du « Wandelaar », dont les crêtes sont au minimum à 4,80 m. Ils ne gênent pas la navigation car ils sont balisés et peuvent être contournés par la passe de « Scheur ».

Les courants de flot, particulièrement intenses à l'époque des vives-eaux, sont souvent supérieurs à 5 noeuds et y jouent un rôle considérable dans le maintien de la stabilité des profondeurs.

En franchissant le seuil des « Wielingen » vers l'Escaut, on passe sur l'isobathe de 12 m au large de Zoute, pour aller ensuite vers des fonds qui augmentent graduellement pour atteindre une fosse de 25 m suivie, en rade de Vlissingen, du premier seuil de l'Escaut, par 15 m de profondeur.

Les qualités nautiques de l'accès à l'Escaut, ont été considérablement améliorées par l'ouverture au gros trafic, de la passe de « Scheur ». Elle présente sur la passe des « Wielingen » le grand avantage d'être à la fois beaucoup plus large et plus profonde, avec un seuil relativement court, d'environ 15 km, distance qui sépare actuellement les fonds de 12 m de la fosse marine, de celles de l'estuaire (*fig. 12*).

Le plan d'aménagement de cette passe, en voie d'exécution et fort activement poussé, prévoit la réalisation, en première phase et à brève échéance, d'un chenal de 10 m de profondeur minimum et de 300 m de largeur.

5. Relief des fonds de l'Escaut maritime et profondeurs.

La situation des fonds, telle qu'elle est présentée par la planche 18B, basée sur le tracé des seules isobathes de 0 m, 8 m et 20 m, donne l'image actuelle du fleuve, le plan d'eau étant réduit au niveau de référence « zéro N.D.G. », montre d'emblée la disposition des chenaux de navigation, ainsi que celle, non moins importante, des grandes fosses (mouilles).

Nous renvoyons néanmoins, pour plus de clarté, au profil en long de la figure 12, où apparaissent les plus grands fonds, situés respectivement dans les fosses de Terneuzen et du Honte, par 58 m et 39,5 m de profondeur, ainsi que les seuils (haut-fonds ou maigres), situés en aval d'Anvers, au nombre de 13, parmi lesquels on en distingue 11 qui accusent des profondeurs que les dragages maintiennent actuellement à 8,50 m au moins. Les deux autres, situés respectivement à Hoek van Baarland et Borsele, ont un brassage naturel, généralement supérieur à 10,00 m.

Le seuil, dont le sommet s'appelle maigre, est un haut-fond, situé dans la passe de navigation (généralement le thalweg), qui constitue le lieu de passage entre deux fosses consécutives. Il comporte un point d'inflection ou de surfexion, suivant que la courbure des fosses est de sens contraire ou non. Dans le premier cas, on l'appelle communément « mauvais passage », parce qu'il est transversal (Fargue).

6. Nature du fond marin.

Dans la partie méridionale de la mer du Nord, le fond se compose essentiellement de sable quartzez, dont la finesse va de 170 μ à 500 μ , auquel se mélange généralement, mais en proportions très variables, des fragments très divisés de coquillages de vase ou d'argile. On y rencontre aussi mais moins souvent, du gravier fin et le long du littoral anglais, des fonds marno-calcaires parsemés de débris granitiques.

Le long de la côte belgo-néerlandaise, sur le talus riverain ainsi que dans les fosses localisées entre les « Bancs des Flandres » on recueille des échantillons qui, dans l'ensemble, montrent un complexe d'éléments généralement superposés où le fond de vase ou d'argile est recouvert d'une mince couche de sable fin (grosseur médiane : 170 μ à 310 μ).

Dans la fosse de l'estuaire, à l'ouest de Vlissingen et dans le chenal des « Wielingen », on a reconnu qu'une couche assez mince de sable moyen recouvrait un fond d'argile gris assez compact, mais sur les talus qui bordent cette fosse, le fond présente un complexe analogue où la pâte argilo-vaseuse prédomine nettement.

Vers le nord, les sables grossissent tandis qu'au large de nos côtes et vers l'ouest, les mélanges : sable moyen-fins débris de coquilles abondent (grosseur médiane 280 μ), avec de rares zones où le gravier fin apparaît dans le mélange (région du bateau-phare « Wandaar »).

Quant à l'aspect sédimentologique, de récentes observations de turbidité ont montré que le transport sédimentaire (par flottaison et saltation) était une réalité non négligeable le long de la côte et surtout dans la zone estuarienne où il a été établi qu'il était, de beaucoup, plus important lors du flot, surtout aux vives-eaux, que pendant le jusant.

Transport alluvial et sédimentation, phénomènes corrélatifs d'une grande importance dans tout ce qui touche la normalisation et l'entretien des voies d'accès portuaires, furent l'objet dans le passé d'investigations intermittentes, qui donnèrent lieu à des conclusions de caractère hypothétique.

Il ne put en être autrement en raison des moyens précaires dont on disposait alors.

Ce difficile problème a pu être abordé avec succès, grâce à la méthode des radiotraceurs, actuellement en plein essor.

Elle est basée sur la mesure systématique de la radioactivité naturelle du fond marin et a été appliquée, en 1963, sur les Bancs des Flandres, dans la zone estuarienne de l'Escaut, à Doel et en rade d'Anvers.

Ces travaux ne constituent que la première phase du programme d'études sédimentologiques en cours.

7. Nature du fond de l'Escaut maritime, du Rupel et de la Durme.

Ce qui suit, traite exclusivement de la couche superficielle, c'est-à-dire de celle qui s'est trouvée à la portée des investigations pratiquées au moyen du grappin Van Veen, dont la profondeur moyenne de pénétration est de 10 centimètres.

Cette couche est soumise à de fréquents remaniements, sous l'action du mécanisme du débit solide qui, par ailleurs, se trouve lui-même sous l'étroite dépendance du jeu alternatif des courants de marée.

Il est clair que l'influence de la lithologie du bassin versant apparaît dans la composition minéralogique des matériaux qui tapissent le lit, mais ceux-ci se trouvent généralement mélangés aux produits qui proviennent d'apports étrangers à la sédimentation naturelle. N'oublions pas, en effet, que le fleuve reçoit, outre les produits d'importants collecteurs (Rupel en particulier), des volumes assez considérables de matières draguées, lors des opérations de curage qui ont lieu tous les ans, dans les nombreuses darses du port d'Anvers et, plus en aval, de gros volumes de produits dragués sur les seuils.

Parmi ces éléments refoulés, les deux premiers sont particulièrement riches en matières organiques, donc générateurs de vase. Quant à ceux en provenance des seuils, ils se composent généralement de sable.

Ce qui précède montre qu'il n'est pas aisément d'élaborer un schéma instantané de la nature du fond de l'Escaut, susceptible de refléter rigoureusement son vrai caractère lithologique.

Les données qui suivent, permettent néanmoins de se faire une idée claire de la réalité de cet intéressant domaine, resté assez peu connu. Elles font l'objet d'un aperçu des résultats provenant de l'analyse des nombreux échantillons prélevés au moyen du grappin précédent, à diverses époques, de 1930 à 1962, respectivement par le *Rijkswaterstaat* néerlandais et les Services maritimes d'Anvers.

	Section	Granulométrie Valeurs médianes * en microns	Description sommaire
Escaut	De Gand à Termonde	50 à 270	Mélange : sable, vase humus.
	De Termonde au confl. de la Durme	270 à 230	Mélange : sable, vase humus.
	Du confl. de la Durme à celui du Rupel	230 à 240	Mélange : sable, vase humus + fins débris de tourbe, très fins débris de coquillages.
	Du confl. du Rupel à Anvers	240 à 200	Mélange : sable, vase humus + fonds argileux dans la région de Hemiksem et d'Anvers (couche d'argile de Boom, R_2C).
	D'Anvers à Doel	200 à 125	Mélange : sable, vase, fragments de coquillages, débris de tourbe. Il n'est pas rare de relever des fonds vaseux dans les fosses.
	De Doel à Hansweert	125 à 200	Mélange : sable, vase humus + petits conglomérats de grès en bordure de Saaftinge.
	De Hansweert à Vlissingen	200 à 300 150 à 200	Dans les fosses, mélange : sable, coquillages et agrégats d'argile. Sur les hauts-fonds. Les rivages sont vaseux.
riv. Durme	De l'embouchure à Lokeren	230 à 120	Mélange : sable, vase, débris végétaux (humus).
riv. Rupel	De l'embouchure à Walem	240-320-250	Mélange : sable, vase agrégats d'argile, débris de coquillages et de tourbe.

(*) Terme caractéristique de la technique du tamisage, lié aux courbes cumulatives, qui indique que 50 % du volume total sont plus gros, 50 % plus fins que la valeur médiane.

Notons qu'en dehors des zones influencées par le refoulement des vases, on observe généralement que la granulométrie des fosses est supérieure à celle des hauts-fonds (seuils et bancs).

VIII. — LES ACCES DE LA BELGIQUE A LA NAVIGATION MARITIME.

De la frontière française, située à 14 km au NE du port de Dunkerque, jusque Gentbrugge, où s'arrête la marée, le rivage de la mer et de l'Escaut maritime se développent sur une longueur de 240 km, dont 70 km en territoire néerlandais. C'est le long de ce rivage que s'ouvrent les accès de la Belgique à la mer. Ces accès sont de valeur nautique très inégale; ils sont : à Nieuport, Ostende, Blankenberge, Zeebrugge, sur la côte belge, à Terneuzen en Flandre zélandaise, d'où on atteint Gand par un canal maritime à grande section, aux cinq écluses maritimes de Zandvliet à Kattendijk pour le service du port d'Anvers, à l'écluse de Wintam sur le Rupel d'où, par le canal maritime de Bruxelles, on atteint le port de la capitale.

1. L'accès au port de Nieuport.

Nieuport, seul d'origine naturelle et le plus ancien de nos ports côtiers, est situé sur l'estuaire de l'Yser, à 28 km au NE de Dunkerque, auquel il est notamment relié par un canal de petite section, est accessible du large aux gros chalutiers et bâtiments de cabotage local, par les passes balisées suivantes :

- le *Westdiep*, au SW, en venant du chenal de Dunkerque;
- le *Negenvaam*, au N, à partir du bateau-phare « *Wandelaar* »;
- de *Kleine Rede*, au NE, à partir d'Ostende.

Les qualités naturelles des atterrages de Nieuport sont telles, qu'elles suffiraient à augmenter d'une manière appréciable l'importance de ce port qui possède, en effet, une rade profonde et large, le *Westdiep*, dont les fonds, réputés de bonne tenue, sont entretenus naturellement par le jeu des courants de marée.

Cette rade est particulièrement bien protégée des fortes houles du large et les marées y sont les plus fortes du littoral belge. Nieuport est un port de pêche important. Il dispose en outre d'une base navale auxiliaire.

2. L'accès au port d'Ostende. — Amélioration portuaire projetée.

Les routes balisées d'Ostende vers le large, au nombre de quatre, partent respectivement vers le N, le NE, le SW et le NW.

Celle du nord, empruntée par les gros caboteurs, est la plus proche de la grande fosse, qu'on atteint en franchissant la rade ou *Grote Rede*, le *Wenduine Bank* et la bordure occidentale du seuil des *Wielingen*.

Celle du nord-est, est une route secondaire à l'usage du trafic régional.

La route du sud-ouest conduit au Pas-de-Calais, en empruntant le *Westdiep* et la passe de Dunkerque.

Enfin celle du nord-ouest, franchit les fosses de *Grote Rede*, *Uitdiep* et *Negenvaam*, avant de rejoindre au large la grande voie maritime, orientée est-ouest. Ces deux dernières routes sont notamment suivies par les malles de la ligne Ostende-Douvres.

Excepté la route secondaire du nord-est, les trois autres peuvent, pratiquement en toutes circonstances, être empruntées par des navires de tonnage moyen.

Les fonds de ces chenaux d'accès sont relativement stable, mais il arrive, particulièrement aux approches du port, qu'un début d'ensablement nécessite un dragage.

Ce port doit son activité essentielle au trafic des passagers à destination de Douvres, au cabotage régional et à l'industrie de la pêche. Il sert également de base à la Force navale belge.

En vue d'améliorer les qualités nautiques de son chenal d'accès vers l'avant-port, il est prévu un élargissement de cette voie, par un recul de 35 m, de l'estacade nord, de manière à réaliser une largeur de 100 m.

Quand à l'amélioration de ses installations et de son outillage, un nouveau bassin à flot équipé de slipways, sera construit à l'est du port de pêche (cf. détails au cartouche de la planche 18^A).

3. L'accès au port de Blankenberge.

Ce port, situé à 8 km au SW de Zeebrugge, est un port de pêche secondaire. Il est devenu un port de plaisance fort apprécié.

Ses exigences nautiques sont telles que son accès ne pose pas de problèmes particuliers aux seuls yachts et aux bateaux de pêche de très faible tonnage qui le fréquentent.

4. L'accès au port de Zeebrugge. — Améliorations projetées et en voie d'exécution.

L'accès au port de Zeebrugge, dont la tête du môle se trouve environ à 3 km par le travers de la passe de « Wielingen », est assuré par une voie balisée, dont les profondeurs minima sont actuellement supérieures à 8,0 m.

Le port de Zeebrugge, ainsi que le canal de 13 km à grande section le reliant à Bruges, furent créés de toutes pièces et mis en service dès la fin du siècle dernier. Léopold II en fut le promoteur.

Situé à proximité d'importants itinéraires maritimes, il devint port d'escale.

A cette époque, le développement industriel et commercial de l'arrière-pays n'était pas de taille à lui donner d'autres activités.

Construit à front de mer, il consiste essentiellement en un vaste môle, à parois verticales, de 75 m de largeur, dont la plate-forme est située à 13,50 m de hauteur au-dessus du zéro H. Ce puissant ouvrage étend sa forme circulaire vers le large, sur 2 500 m de longueur, sensiblement orientée au NE. Il est pourvu de 1 600 m de quais d'accostage.

On s'aperçut très vite que la rade abritée par le môle, s'ensablait et, malgré d'importants travaux de dragages, il fut difficile de maintenir le chenal nécessaire au fonctionnement normal du port.

Pour remédier à ce défaut on eut l'idée d'établir un avant-port, servant de bassin de marée, enserré entre des digues convergentes.

Ce projet d'envergure, dont la réalisation est en voie d'exécution, est figuré en cartouche sur la planche 18^A.

Il crée un complexe portuaire moderne en conservant le môle, qui devient d'emblée la plus puissante des deux digues convergentes du projet.

L'avant-port présentera un vaste bassin de marée parfaitement abrité, de 13,50 m de profondeur, où les bâtiments de gros tonnage pourront aisément rester à flot durant tout le temps nécessaire, qu'elles que soient les circonstances.

Tout est prévu pour doter le port de Zeebrugge d'un outillage et d'une organisation, dans la ligne des exigences actuelles d'un port spécialisé.

5. L'accès au port d'Anvers.

Le port d'Anvers, situé au fond de l'estuaire de l'Escaut, à 77 km de la mer, joue un rôle de premier plan dans l'évolution économique de l'Europe occidentale. La puissance de son organisation, dans tous les domaines de l'activité portuaire, en fait un port à fonctions multiples hautement qualifié. L'activité de son trafic repose principalement sur l'importation de combustibles (pétrole brut, charbon), de minerais et de denrées.

L'exportation, de volume presque aussi important, se compose principalement de matériel lourd, de produits métallurgiques et chimiques de son hinterland.

La planche 18^B, donne le tracé des imposants projets d'extension des installations portuaires, dont plusieurs sont en voie d'achèvement.

Ses relations avec l'arrière-pays, assurées par le trafic en provenance du Rhin et de la Meuse par le canal Albert, sont à ce point prospères, qu'il a fallu prévoir d'importants agrandissements de ses bassins de batellerie.

Par ailleurs, la nouvelle écluse de Zandvliet, en voie d'achèvement et qui mesure 500 m de long, 57 m de large et 13,50 de profondeur au-dessous du « zéro N.D.G. », sera de taille à faire face à tous les besoins possibles.

L'exposé simplifié qui précède, montre à quel point la prospérité du port d'Anvers se trouve liée à la bonne tenue des qualités nautiques de l'Escaut, sa seule voie d'accès.

Celui qui suit, montre ce qu'elles furent dans le passé, ce qu'elles sont actuellement et quels efforts sont mis en œuvre pour les améliorer et les maintenir au niveau des exigences.

a) Evolution des qualités nautiques de l'Escaut.

Les qualités nautiques d'un fleuve sont l'ensemble des éléments qui permettent de juger objectivement de sa capacité réelle de trafic. Cette définition impose nécessairement tout ce qui a trait à la puissance d'exploitation, fonction de l'ampleur de l'infrastructure proprement dite, à son tour fonction de l'évolution du tonnage (ou dimensions) des bâtiments qui composent les flottes de commerce modernes.

Il s'agit non seulement de profondeur, mais aussi de largeur et de tracé (configuration rationnelle des formes), sans oublier les très importants facteurs de sécurité et d'organisation qui sont multiples : balisage, pilotage, contrôle et guidage du trafic par télécommande et radar, etc.

Pour fixer les idées au sujet des possibilités actuelles offertes, lors des circonstances favorables de marée, disons brièvement que le tonnage accessible à Anvers, est actuellement d'environ 50 000 T.D.W. charge caractéristique de bâtiments dont la calaison est de l'ordre de 12,50 m.

Sans doute n'est-il pas sans intérêt d'évoquer ici, en quelques lignes, la situation du brassiagé d'autrefois de l'Escaut. Dans ce domaine, nos investigations ne peuvent malheureusement s'étendre fort loin dans le passé, car il n'existe pas de données valables, relatives aux profondeurs, aux époques antérieures au XIX^e siècle. En effet, le premier levé de l'Escaut, reconnu comme document hydrographique fondamental, date de 1800. Il s'agit de la carte Beaumtemps-Beaupré, concernant le trajet Vlissingen-Anvers.

Les principaux levés exécutés ultérieurement, sont connus sous le nom de :

- | | |
|------------------------------|---|
| — Carte de Goudriaan | — 1822 — levé néerlandais de l'Escaut oriental et occidental; |
| — Carte de Stessels | — 1862 — levé blage, du Rupel à Waarde; |
| — Carte de Petit | — 1877 — levé belge d'Anvers à Bath; |
| — Carte de de Jong | — 1891 — levé néerlandais, de Vlissingen à Zandvliet; |
| — Carte de Rochet | — 1893 — levé belge, d'Anvers à Zandvliet; |
| — Carte de de Haan et Luymes | — 1905 — levé néerlandais, de Vlissingen à Anvers. |

Ces levés, exécutés avant le début de l'ère de dragage sur l'Escaut (1905), revêtent une importance particulière; ils montrent des situations qui résultent réellement de l'évolution naturelle des fonds.

Une situation analogue se présenta pendant la première guerre mondiale. On vit alors que l'Escaut, sans navigation, sans entretien, sans dragage avait, après quatre années d'évolution naturelle, des profondeurs du même ordre que celles citées ci-après.

Abstraction faite de détails concernant des modifications résultant de remaniement du lit, ainsi que de la qualité ou de la densité des sondages, bornons-nous à citer les minima moyens

des profondeurs sondées dans la passe de navigation, au cours des levés précités, à savoir :

- De Vlissingen à Bath : 6,00 m (Hansweert);
- De Bath à Anvers : 6,00 m (Bath) et 5,70 m (Zandvliet).

Mais il semble bien que le seuil de Bath, de mauvaise réputation, ait accusé des minima de l'ordre de 4,50 m au cours de sondages exécutés en octobre 1867.

Les profondeurs indiquées sur les cartes précitées résultent de sondages effectués au plomb de sonde, seul procédé en usage à l'époque, dont la précision dépendait de précautions pas toujours compatibles avec les circonstances d'exécution.

Depuis 1930, les sondages des cartes belges, sont effectués au « Sondeur ultra-sonore », qui permet d'enregistrer d'une manière continue, la profondeur à 10 cm près, à raison de plus de 300 sondages par minute.

Ces profondeurs ont été réduites au zéro N.D.G.

Ces profondeurs limites, qui caractérisent le brassage naturel, ont bien évolué depuis qu'on a entrepris d'écrêter les hauts-fonds et ensuite de les approfondir.

C'est ainsi que de nos jours, les trois seuils précités plus celui de Valkenisse, situé à mi-distance entre Baalhoek et Bath et qui, à eux quatre, constituent le problème obsédant du Bas-Escaut, accusent des profondeurs qui oscillent autour des moyennes citées ci-après :

Hansweert : 8,40 m;

Valkenisse : 8,40 m;

Bath : 8,50 m;

Zandvliet : 9,00 m.

Notons que le seuil de Bath est resté à la fois le plus rebelle et le plus redouté.

De Zandvliet à Anvers, les minima actuels se maintiennent à 8,00 m environ, tandis qu'en amont et jusqu'au Rupel, ils sont de 5,00 m.

Autrefois, sur les deux dernières sections, les minima ne dépassaient guère 5,50 m et 5,00 m.

Nous renvoyons à la figure 12, pour ce qui concerne l'état actuel des seuils sur l'Escaut, ainsi que sur son principal affluent, le Rupel.

b) Le dragage.

Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, l'Escaut avait pu satisfaire aisément aux exigences du trafic maritime, en raison des dimensions relativement modestes qui caractérisaient la flotte de commerce de l'époque.

Par la suite, dès le début de ce siècle, sous l'essor prodigieux des relations commerciales lointaines, l'on vit la construction navale subir des transformations techniques révolutionnaires et le tonnage des navires augmenter rapidement, ainsi que la calaison. Les exigences relatives aux conditions nautiques des voies d'accès devinrent de ce fait de plus en plus sévères et, pour suivre le rythme de cet accroissement rapide, il fallut draguer dès 1905.

Cette intervention, de caractère sporadique au début, fut toujours suffisante pour redresser rapidement une situation lorsqu'elle devenait difficile, le plus souvent à Bath.

On conçoit qu'elle s'amplifia progressivement et pour ainsi dire parallèlement à la croissance du tonnage, pour devenir pratiquement permanente, dès 1929.

Les effets du dragage ne sont généralement qu'éphémères, mais il est néanmoins le seul moyen qui permette une intervention immédiate et efficace.

Le tableau qui suit montre l'évolution de l'importance des dragages exécutés sur les seuils situés en aval d'Anvers, depuis 1930, ainsi que l'accroissement corrélatif du tonnage maximum pratiqué, exprimé en unités *deadweight*.

<i>Année</i>	<i>Volume en m³</i>	<i>T.D.W.</i>
1930	2 253 385	12 000
1935	3 841 000	13 000
1940	1 104 000	
1945	1 757 360	13 000
1950	3 592 470	18 000
1955	5 620 935	28 000
1960	6 739 542	40 000
1961	7 695 621	47 000
1962	8 561 363	52 000
1963	8 500 283	52 000
1964	8 717 561	52 000
1965	8 244 241	52 000

T.D.W. : tonnage port en lourd, appelé « tonnage *deadweight* », qui est, pour le navire de commerce, l'élément caractéristique le plus important.

Il représente le poids total en tonnes anglaises de 1 016 kg, de ce qu'il peut charger sans s'enfoncer, en mer, au-dessus de sa ligne normale de charge en été, (*Plimsoll mark*) sous la réserve précitée, il représente la différence de poids entre le navire complètement chargé et le navire vide.

Cette progression est une sorte d'escalade jusqu'en 1962, année qui marque un sommet qui pourrait bien amorcer un palier, car il semble établi que nous nous trouvons actuellement dans les limites des possibilités d'approfondissement que nos seules techniques de dragages permettent de réaliser.

Ainsi, en draguant on a amélioré grandement la navigabilité du fleuve. En outre, les millions de m³ de sable dragués, répandus dans les polders, ont fait l'assiette d'importantes installations portuaires, d'usines, de nouveaux quartiers, d'une cité sur la rive gauche et ont étendu l'agglomération d'Anvers jusqu'à la frontière néerlandaise.

c) Projet d'amélioration des voies d'accès par normalisation.

Nous venons de voir que les moyens d'amélioration, basés uniquement sur le dragage, deviennent insuffisants étant donné les exigences actuelles.

Cette situation était prévue. Elle n'est pas alarmante, car des moyens techniques de la normalisation peuvent donner une solution satisfaisante. L'étude de ce problème a été confié au laboratoire de recherches hydrauliques du Département des Travaux Publics où des problèmes semblables sont traités sur modèles réduits.

A cet effet, une imposante maquette y a été construite qui représente la section de l'Escaut située entre Oosterweel et Hansweert, dont la partie comprise entre Zandvliet et Valkenisse a été réalisée à fond mobile. Elle sert d'infrastructure aux travaux de recherches de solutions de normalisation, exécutés suivant une des méthodes des plus modernes, connue sous le nom de « méthode historique ».

Sa particularité la plus remarquable, consiste en un étalonnage tellement précis qu'au cours des opérations d'essais, le modèle reproduit fidèlement l'évolution naturelle du fleuve, telle qu'elle fut observée dans le passé.

Les chances de succès dans l'exécution des projets d'amélioration envisagés, dépendent désormais du succès de leur exécution préalable au laboratoire.

Les études précitées ont conduit à l'adoption d'un projet d'amélioration par normalisation dont l'exécution, prévue par phases successives, se trouve d'ores et déjà insérée au programme des travaux maritimes prioritaires.

Il s'agit d'un projet sélectionné parmi ceux qui furent étudiés, comme étant celui qui répond le mieux aux critères de sécurité imposés.

En ses grandes lignes, il consiste en un ensemble de digues basses longitudinales submersibles, de digues guidantes et d'épis, dont l'implantation vise essentiellement à normaliser la disposition générale actuelle du chenal de navigation, dont les fonds seront ensuite approfondis par dragage. Les travaux de normalisation concernent en premier lieu, la section la plus compliquée, celle située entre Doel et Baalhoek.

La réalisation de ce projet, dont l'influence sur l'évolution de la marée sera pratiquement nulle, a pour objet d'améliorer considérablement les qualités nautiques du chenal, principalement à Bath, où la courbure de la passe deviendra beaucoup plus ample, tandis que les profondeurs naturelles sur les seuils deviendront progressivement supérieures à celles que l'on sonde actuellement et seront désormais plus stables.

IX. — HYDROLOGIE DU BASSIN HYDROGRAPHIQUE DE L'ESCAUT.

1. Généralités.

Il reste à parler de l'hydrologie du fleuve, un domaine qui, bien que relevant du domaine fluvial influence, lors de fortes crues, le régime maritime de l'Escaut. Aussi la connaissance de l'ensemble des phénomènes relatifs à l'alimentation du bassin versant et du débit est d'un grand intérêt.

Tout en faisant abstraction de certaines considérations classiques, nous nous tiendrons aux facteurs essentiels de régime : la précipitation, le débit, le coefficient d'écoulement.

Le débit supérieur de l'Escaut, dépend naturellement de tout son bassin hydrographique de 19 500 km². Pour le calculer, il faut et il suffit de mesurer simultanément l'ensemble des débits partiels, composé de l'Escaut supérieur, de son bassin latéral et de ses affluents dont la somme forme le débit du fleuve proprement dit, là où l'on désire le fixer.

Comme on avait donné la préférence aux procédés de mesure directe par moulinet et qu'on voulait obtenir des valeurs s'étendant sur une période d'au moins dix années, on commença par fixer six profils de jaugeage, chacun d'eux situé en amont, mais assez près, de la limite extrême de propagation de l'onde de marée. A ces endroits, les variations du plan d'eau furent observées au moyen de limmigraphes.

Cette phase préparatoire fut commencée en 1947 et l'exécution du programme décennal fut entamée dès le début de 1949.

2. Dénombrement et analyse des résultats.

a) Valeurs moyennes et extrêmes du débit.

Pour donner un exposé clair de l'essentiel de cet imposant ensemble de valeurs, consistant en débits journaliers, nous les avons groupés par moyennes mensuelles, annuelles et décennales, en nous attachant particulièrement aux deux années, 1949 et 1952, qui nous ont paru les plus significatives du point de vue hydrologique, puisqu'elles ont donné respectivement le débit moyen le plus bas et le plus élevé de la décennie considérée.

TABLEAU A.

DEBITS MOYENS MENSUELS ET ANNUELS (m³/s).

Bassin		Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année	%
Escaut supérieur (fluvial)	1949	29,4	16,8	16,1	8,5	2,4	1,7	0,7	0,6	0,1	2,9	5,5	17,0	8,5	20
	1952	186,7	176,5	80,6	45,7	18,8	9,5	4,0	7,7	9,6	15,9	57,6	122,3	61,2	42
Dendre	1949	12,0	5,9	7,9	5,3	3,5	2,4	0,9	0,8	1,6	1,7	2,7	6,1	4,2	10
	1952	42,5	38,6	17,3	10,0	3,5	2,0	2,9	2,5	2,2	4,2	17,8	39,3	15,2	10
Durme (bassin latéral)	1949	5,1	3,9	3,8	3,2	2,2	1,7	1,1	1,1	0,9	1,4	2,4	3,7	2,6	6
	1952	17,6	14,6	9,8	7,0	3,8	3,2	3,4	4,8	4,4	5,6	12,0	16,0	8,5	6
Escaut (Amont Rupel)	1949	46,5	26,6	27,8	17,0	8,1	5,8	2,7	2,5	2,6	6,0	10,6	26,8	15,3	36
	1952	246,8	229,7	107,7	62,7	26,1	14,7	10,3	15,0	16,2	25,7	87,4	177,6	84,9	58
Senne	1949	9,0	5,6	10,4	6,0	6,4	4,5	3,7	4,0	3,9	4,8	5,1	6,6	5,8	14
	1952	27,2	19,5	14,9	10,5	7,1	6,4	7,9	7,1	4,7	5,8	16,2	27,3	12,9	9
Dyle	1949	18,3	17,0	20,2	12,8	10,0	7,1	6,0	5,8	5,5	6,7	10,5	13,4	11,3	27
	1952	46,9	45,0	32,0	22,5	12,0	10,0	8,3	14,6	14,7	16,6	36,0	44,2	25,2	18
Petite Nethe	1949	8,0	5,6	7,3	5,7	5,6	5,0	1,9	2,1	3,4	4,6	9,1	14,3	6,1	15
	1952	25,0	19,7	11,0	8,1	3,8	3,3	4,1	6,4	7,4	8,7	15,9	21,9	11,3	7
Grande Nethe	1949	4,9	4,5	5,2	4,1	1,4	2,7	0,4	0,7	0,5	0,2	3,1	4,2	2,7	5
	1952	17,0	14,4	6,7	5,1	2,4	1,1	2,4	3,2	2,0	5,5	11,0	13,2	7,0	5
Basse Nethe + Rupel	1949	2,5	2,0	1,9	1,6	1,1	0,9	0,5	0,5	0,5	0,7	1,2	1,8	1,3	3
	1952	8,8	7,3	4,9	3,5	1,9	1,6	1,7	2,4	2,2	2,8	6,0	8,0	4,3	3
Rupel (embouchure)	1949	42,7	34,7	45,0	30,2	24,5	20,2	12,5	13,1	13,8	17,0	29,0	40,3	27,2	64
	1952	124,9	105,9	69,5	49,7	27,2	22,4	24,4	33,7	31,0	39,4	85,1	114,6	60,7	42
Total *	1949	89,2	61,3	72,8	47,2	32,6	26,0	15,2	15,6	16,4	23,0	39,6	67,1	42,5	100
	1952	371,7	335,6	177,2	112,4	53,3	37,1	34,7	48,7	47,2	65,1	172,5	292,2	145,6	100
Escaut Rupel	1949	1,09	0,77	0,62	0,56	0,33	0,29	0,21	0,19	0,19	0,35	0,37	0,67	0,55	
	1952	1,98	2,17	1,55	1,26	0,96	0,66	0,42	0,45	0,52	0,66	1,03	1,55	1,40	

(*) Ce total, bien que limité à la région située immédiatement en aval du confluent Rupel-Escaut, peut-être considéré comme une valeur valable du débit supérieur à Anvers.

De plus, 1949, année fort sèche, de 521 mm de pluie, fut précédée d'une période de neuf années de pluviosité normale, tandis que l'année 1952, succéda à deux années nettement humides.

Ces considérations sont importantes en raison de l'influence qu'exerce l'état hygrométrique d'un sol préalablement saturé, sur l'hydrologie des bassins versants.

Le tableau A ci-contre donne, par bassin, les débits moyens annoncés plus haut, en m^3/s .

A Anvers, durant la décennie 1949-1958, les valeurs extrêmes du débit supérieur ont varié de 10 m^3/s à 573 m^3/s .

Le minimum eut lieu en juin, juillet, août et septembre 1949 et le maximum en février 1957.

TABLEAU B.

COEFFICIENTS D'ÉCOULEMENT.

Année	Pluviosité en mm à Uccle	Escaut	Dendre	Dyle	Senne	Petite Nèthe	Grande Nèthe	Basse Nèthe + Rupel
1949	521	5	18	20	30	47	22	30
1950	950	10	18	13	27	43	25	24
1951	810	9	37	28	40	53	38	24
1952	926	20	37	25	37	49	32	32
1953	558	14	27	30	40	47	39	36
1954	741	4,5	14	23	27	54	36	29
1955	617	8,5	21	26	37	46	39	32
1956	796	9,8	25	30	41	49	41	36
1957	802	11,8	27	28	33	45	35	32
1958	834	13,7	26	26	34	47	35	31
1949	756	11	25	25	35	48	34	31
1958								

b) Coefficients d'écoulement.

Il s'agit du rapport de la hauteur de pluie éculée, à la hauteur de pluie réellement tombée. Au tableau B, on trouvera le pourcentage des valeurs annuelles de ce coefficient, accompagnées de la cote udométrique observée à Uccle, en fonction de laquelle elles furent calculées.

L'aberrance dans la dispersion des valeurs relatives à l'Escaut, par rapport à leur moyenne, d'ailleurs anormalement faible, est due à la rétention saisonnière des eaux en amont de Gand (cf. II, 5, a). Ces moyennes comprennent une deuxième valeur visiblement anormale, qui concerne la Petite Nèthe. Elle est trop forte en effet, mais ne surprend guère, quand on sait que la section amont de cette rivière sert occasionnellement d'exutoire aux canaux d'irrigation de la Campine.

Nous complèterons ce chapitre en donnant la valeur du coefficient d'écoulement, pour l'année 1950, concernant le bassin total situé en aval de Gand (maritime + fluvial). Elle présente un intérêt particulier, non seulement parce qu'elle est sans doute la première valeur

précise que l'on possède de cet important élément, mais surtout en raison de sa relation hydrologique avec l'étude de la cubature de la marée moyenne de 1950, dont un ensemble de résultats fait l'objet d'un tableau qui figure à la planche 18^B.

Ce coefficient repose sur :

- un module, à Vlissingen, de 92,2 m³/s (débit moyen annuel)
- un bassin versant de 11 075 km²
- une moyenne pondérée des précipitations annuelles, observées en 65 stations, de 909,7 mm.

Le calcul donne :

- un module relatif de 8,33 litres/s/km²
- un indice d'écoulement de 262,7 mm
- un coefficient d'écoulement de $\frac{262,7}{909,7} = 0,289 \approx 29\%$.

Notons que cette valeur concorde normalement avec celles relatives aux fleuves de plaine de l'Europe occidentale.

Il y a pourtant lieu de considérer que l'année 1950, quoique fort humide, débuta par un sol assez sec, en raison du faible degré de saturation qui caractérisa la période qui la précédait.

Aussi cette valeur de 29 %, peut-elle être regardée comme un coefficient situé parmi les minima.

Par analogie, on peut estimer que les maxima oscillent autour des 40 %.

c) Indice d'évaporation.

Connaissant l'indice et le coefficient d'écoulement, nous ne pouvons omettre de parler de l'indice d'évaporation, généralement considéré comme étant égal à leur différence et vaut, dans le cas qui nous occupe : $909,7 - 262,7 = 647$ mm, soit 1,8 mm en moyenne par jour, valeur normale eu égard aux conditions climatiques précitées.

Ce déficit de l'écoulement résulte non seulement de l'évaporation proprement dite, mais aussi de l'infiltration vers les nappes phréatiques et profondes, ainsi que, dans une mesure bien moindre, de l'absorption par les végétaux, sans qu'on sache préciser la part qui revient à chacune des fractions.

CONCLUSION.

Ce commentaire constitue une monographie de nos connaissances actuelles des éléments essentiels qui caractérisent l'hydrographie physique de la zone littorale belge, de l'estuaire et de l'Escaut maritime.

Il réunit une documentation étendue aux domaines les plus courants, accompagnée de données numériques, dont certaines se rapportent à des sujets généralement assez peu connus. Pourtant, si nos acquisitions dans le domaine de l'observation des phénomènes sont remarquables, elles n'en restent pas moins fragmentaires pour certaines branches, qui n'ont pu être abordées en raison de l'insuffisance actuelle de leurs données documentaires.

En outre, il montre la nécessité de coordonner rationnellement les techniques qui entrent en jeu dans ce domaine et de les maintenir à un haut niveau de développement scientifique, afin d'accroître sans cesse le volume des connaissances nécessaires à l'étude des problèmes, de plus en plus ardu, que pose l'amélioration des voies d'accès à nos ports de mer.

TABLE DES FIGURES.

1. — Marées de la Mer du Nord	6
2. — Amplitudes moyennes de la marée littorale, depuis la Manche jusqu'à l'île Texel, avec embranchement de l'Escaut maritime	9
3. — Courants de marée moyenne dans la passe de Wielingen. Parabole de vitesses	20
4. — Effet du vent sur le niveau de la mer à Ostende	27
5. — Marée tempête extraordinaire, du 1 ^{er} février 1953, observée à Anvers	30
6. — Marée exceptionnellement basse, du 15 mars 1964, observée à Anvers	31
7. — Salinité de l'eau de mer	34
8. — Chlorinité et débit supérieur à Anvers	36
9. — Corrélation entre la chlorinité et le débit supérieur	37
10. — Température de l'eau de mer	39
11. — Températures de l'Escaut et de l'air, à Anvers	40
12. — Profil en long du chenal de navigation et propagation de la marée depuis le Wandelaar jusqu'à Gentbrugge	45

BIBLIOGRAPHIE.

GENERALITES.

- THOMSON (W. Lord Kelvin). — *The tide gauge, tidal harmonic analyser and tide predictor*. Proc. Inst. civil Engrs. 65 (3), London, 1881.
- HARRIS (R.). — *Manual of Tides (appendices to Reports)*. U.S. Coast and Geodetic Survey, Washington, 1897-1907.
- ROLLET DEL'ISLE. — *Observations, étude et prédition des marées*. Service hydrographique de la Marine, Paris, 1905.
- LUYMES (J.). — *Overzicht der Getijdeer*. Ministerie van Marine. 's Gravenhage, 1919.
- STERNECK (R.). — *Die Gezeiten der Ozeane*. Sitz. Ber. Akad. Wiss. Wien. 11a, 129, 130 (1920-21).
- DOODSON (A.) and WARBURG (H.). — *Admiralty Manual of Tides*. H.M. Stationery Office, London, 1941.
- ROUCH (J.). — *Traité d'océanographie physique. T. III : Les mouvements de la mer*. Payot, Paris, 1948.
- MELCHIOR (P.). — *Les marées terrestres*. Monographies de l'Observatoire Royal de Belgique, n° 4, 1954.

Ouvrages qui contiennent des monographies consacrées à la mer du Nord et aux ports côtiers belges.

- WHEWELL (W.). — *Essay towards a first approximation to a map of cotidal lines*. Phil. Trans. Roy. soc., London, 1883.
- DE MEY (P.). — *Etude sur l'amélioration et l'entretien des ports en plage de sable et sur le régime des côtes de la Belgique*. Bruxelles, 1894.
- BLANCHARD (R.). — *La Flandre. Etude géographique de la plaine flamande, la France, Belgique et Hollande*. Paris, 1906.
- PROUDMAN (J.) and DOODSON (A.). — *The principal constituent of the tides of the North Sea*. Phil. Tr. R. Soc., London, 1924.
- DOODSON (A.). — *Meteorological perturbations of sea-level and tides*. Mon. not. R.S. Astr. Geoph. Suppl. 1, London, 1924.
- BRIQUET (A.). — *Le littoral du nord de la France et son évolution morphologique*. Paris, 1930.
- VAN VEEN (J.). — *Onderzoeken in de Hoofden in verband met de gesteldheid der Nederlandse Kust*. Rijkswaterstaat, 's Gravenhage, 1936.
- CHARLIER (Ch.). — *Détermination du niveau de la mer à Ostende*. Annuaire de l'Observatoire Royal de Belgique, 1939.
- SCHALKWYK (W.). — *A contribution to the Study of storm surges on the Dutch Coast*. Mededelingen en Verhandelingen. Serie B, publ. n° 7. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Inst., De Bilt, 1947.
- LAUWERS (J.). — *Les marées des ports d'Ostende, de Zeebrugge et de Nieuport*. Ann. Tr. Pub. de Belgique, 1949.
- VAN MEEL (L.). — *Le milieu marin au bateau-phare « West-Hinder »*. Période 1951-1955. Inst. R. des Sc. Nat. de Belgique, t. XXIII, n° 4, 1957.
- SNEYERS (R.). — *La tempête et le débordement de la mer du 1^{er} février 1953*. « Ciel et Terre » 3 et 4, 1953. Bull. de la Soc. B. d'astr. de Meteor. et de Phys. du Globe.
- PONCELET (L.). — *Aperçu des circonstances météorologiques et climatologiques de la tempête des 31 janvier et 1^{er} février 1953*. Ann. tr. Pub. de Belgique, 6^e fasc., 1954.
- VERSCHAeve (J.). — *La défense et le maintien des plages belges entre Zeebrugge et la frontière néerlandaise*. C. I. Lv., Bull. Techn., t. I, Louvain.

Cartes et documents.

- BUREAU HYDROGRAPHIQUE INTERNATIONAL. — *Constantes harmoniques des principaux ports*. Publ. Spéciale n° 26, Monaco, 1933.
- MINISTERIE VAN OPENBARE WERKEN. — MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS. — *Vlaamse Banken. — Bancs des Flandres (assemblage de levés belges, néerlandais et français de 1935 à 1962)*.
- MINISTÈRE DE LA DEFENSE NATIONALE. — FORCE NAVALE. — *Rapport sur les études océanographiques effectuées au large des côtes belges, à bord du bâtiment de la Force navale « Eupen », en 1961*.
- ADMIRALTY PUBLICATION. — *British Islands and Adjacent Waters. Cotidal and Corange Lines*. London, 1937.
- RIJKSWATERSTAAT. — *Verslag over de waarnemingen met de « Oceaan », in het mondingsgebied van de Westerschelde (1934-38)*. 's Gravenhage, 1951.
- MINISTERIE VAN MARINE. — AFDELING HYDROGRAFIE. — *Stroomatlas voor de Nederlandse kust*. 's Gravenhage, 1951.
- MINISTERIE VAN MARINE. — *Reductiekaart 1956 (Carte d'études hydrographiques relatives à la situation du zéro local de réduction et lieux d'égal établissement du port)*. 's Gravenhage, 1956.

Annuaires des marées.

HYDROGRAPHIC DEPARTMENT. — *Admiralty tide tables*. London.
SERVICE HYDROGRAPHIQUE DE LA MARINE. — *Annuaire des marées des Côtes de France*. Paris.
MINISTERIE VAN VERKEER EN WATERSTAAT. — *Getijtafels voor Nederland*. 's Gravenhage.
MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS. — *Tableaux des marées pour Ostende*. Bruxelles.

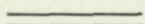
Monographies consacrées à l'Escaut maritime.

- ROCHET (E.). — *Description hydrographique de l'Escaut*. Bruxelles 1894.
VAN BRABANDT (L.). — *Les étages de courant de l'onde de marée et leurs lieux géométriques*. A.T.P.B. (*), 1908.
BONNET (L.). — *Contribution à l'étude théorique des fleuves à marée et application aux rivières à marée de l'Escaut maritime*. A.T.P.B. de 1922 à 1923 (7 fascicules).
HAENECOUR (R.). — *Etude sur la formation de l'Escaut maritime et les rivières à marée de Belgique. Leur entretien et leur amélioration*. A.T.P.B., 1927.
BONNET (L.) et BLOCKMANS (J.). — *Etude du régime des rivières du bassin de l'Escaut maritime, par cubature de la marée moyenne décennale 1921-1930*. A.T.P.B., 1936.
HAENECOUR (R.). — *Le problème d'hydraulique de l'Escaut maritime*. A.T.P.B., 1945.
VERLOOY (J.). — *Over de invloed van de neerslag op de waterstanden in het Scheldebekken*. T.O.W.B. (**), 1947.
CODDE (R.). — *Het verloop van het zoutgehalte in de Zeeschelde*. (Avec résumé français.) Revue Acta Technica Belgica, C.I. 6, 1958.
RIJKSWATERSTAAT. — *Verslag over de stormvloed 1953*. 's Gravenhage, 1961.
STATISTIQUES DECENTNALES. — Concernant les niveaux de marée du bassin maritime de l'Escaut, parues aux Annales des Travaux Publics de Belgique (résumé français à partir de 1931-1940).
VAN BRABANDT (L.). — *Récapitulation décennale 1901-1910*. A.T.P.B., 1912.
BLOCKMANS (J.). — *Récapitulation décennale 1911-1920*. A.T.P.B., 1927.
BLOCKMANS (J.). — *Récapitulation décennale 1921-1930*. A.T.P.B., 1934.
VEKEMANS (R.). — *Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken 1931-1940*. T.O.W.B., 1946.
CODDE (R.) et DE KEYSER (L.). — *Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken 1941-1950*. T.O.W.B., 1954.
CODDE (R.) et DE KEYSER (L.). — *Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken 1951-1960*. T.O.W.B., 1963.
BASTIN (A.). — *De sedimentologie van het Schelde-estuarium*. Koninklijke Vlaamse Ingenieursverenigingen. Verslagboek van het Vierde Internationaal Havenkongres. Antwerpen, juni 1964.
STERLING (A.) en ROOVERS (P.). — *Modelstudie betreffende de normalisatiewerken van de Westerschelde te Bath*. Même source que la précédente.
SNACKEN (F.). — *De ontwikkeling van het Scheldepolderlandschap*. Même source que la précédente.
MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS. — *Annuaire des marées pour Anvers*. Bruxelles.
RIJKSWATERSTAAT. — *Jaarboek der waterhoogten. — Tienjarig overzicht der waterhoogten en afvoeren*. 's Gravenhage.
(*) Annales des Travaux Publics de Belgique.
(**) Tijdschrift der Openbare Werken van België.

TABLE DES MATIERES.

I. — Etablissement des cartes	3
1. Canevas géographique	3
2. Historique	3
II. — La marée	4
1. Historique	4
2. Théorie	5
3. Les marées de la Mer du Nord	7
4. Caractéristiques de la marée du littoral belge et néerlandais	7
a) Système amphidromique	7
b) Lignes cotidiales	7
c) Propagation. — Etablissement du port	8
d) Intensité de la marée. — Variation de l'amplitude	8
e) Variation de la période de marée	10
f) Inégalité diurne de la hauteur des marées	10
g) Inégalité de durée du « gagnant » et du « perdant »	10
h) Age de la marée	11
5. La marée de l'Escaut	11
a) Exposé sommaire des traits essentiels de sa diversité fluvio-maritime	11
b) Propagation de l'onde de marée	12
c) Variation du « gagnant » et du « perdant »	14
d) Variation de l'amplitude	14
e) Lieux géométriques des niveaux de vive-eau et de morte-eau	16
6. La prédiction des marées	16
III. — Les courants de marée	19
1. Les courants de la Mer du Nord	19
a) Roses de courants	19
b) Courants de flot et de jusant. — Etale de courant	19
c) Courants de fond	21
2. Les courants de l'Escaut maritime	22
a) Courants de flot et de jusant. — Renverses	22
b) Vitesses de courant	23
c) Courants de fond	24
IV. — Influence des facteurs météorologiques. — Marées tempêtes	24
1. Cas de la Mer du Nord	25
a) Influence de la pression atmosphérique	25
b) Gonflement de la mer	25
c) Creusement de la mer	26
d) Définition des marées tempêtes	28
e) Déformation des vagues. — Déferlement. — Ressac	28
f) Fréquence des marées tempêtes	28
g) Perturbation de l'horaire de la prédiction	28
h) Organisation des services d'annonce des marées tempêtes	28
2. Les marées tempêtes de l'Escaut	29
a) Définition. — Caractéristiques	29
b) Fréquence	29

V. — Salinité, température et densité des eaux de la Mer du Nord et de l'Escaut maritime	32
1. Salinité de la Mer du Nord	32
2. Salinité des eaux de l'Escaut	34
a) Caractéristiques. — Chlorinité	34
b) Variation de la chlorinité locale	35
c) Variation saisonnière de la chlorinité	35
d) Propagation de l'onde saline	35
3. Température de la Mer du Nord	38
4. Température des eaux de l'Escaut à Anvers	38
a) Variation semi-diurne	38
b) Variation saisonnière	38
5. Densité « <i>in situ</i> » des eaux de la Mer du Nord	41
6. Densité « <i>in situ</i> » des eaux de l'Escaut à Anvers	41
VI. — La congélation de l'Escaut. — Dérive des glaces	41
VII. — Le fond marin	42
1. Les bases du niveling dans la mesure des profondeurs (bathymétrie)	42
2. Le zéro des cartes	43
3. Le relief du fond de la Mer du Nord et profondeurs	44
4. Qualités nautiques des chenaux d'accès à l'Escaut	46
5. Relief des fonds de l'Escaut maritimes et profondeurs	46
6. Nature du fond marin	46
7. Nature du fond de l'Escaut, du Rupel et de la Durme	47
VIII. — Les accès de la Belgique à la navigation maritime	48
1. L'accès au port de Nieuport	48
2. L'accès du port d'Ostende	49
3. L'accès au port de Blankenberge	49
4. L'accès du port de Zeebrugge	50
5. L'accès du port d'Anvers	50
a) Evolution des qualités nautiques de l'Escaut	51
b) Le dragage	52
c) Projet d'amélioration des chenaux d'accès par normalisation	53
IX. — Hydrologie du bassin hydrographique de l'Escaut	54
1. Généralités	54
2. Dénombrement et analyse des résultats	54
a) Valeurs moyennes et extrêmes du débit	54
b) Coefficient d'écoulement	56
c) Indice d'évaporation	57
Conclusion	57
Table des figures	58
Bibliographie	59



10,652



Vlaams Instituut voor de Zee vzw
Flanders Marine Institute



100145

InnovOcean T +32-(0)59-34 21 30
8400 Oostende, België E library@vliz.be