

de sollicitation. La stabilité des têtes est à priori plus grande que celle des bajoyers.

En ce qui concerne les calculs organiques, à part les calculs ordinaires, quelques cas spéciaux ont été examinés, notamment pour le tunnel des conduites, l'aqueduc d'évacuation, les chambres des portes, les radiers des têtes et les culées des ponts mobiles.

L'exécution des travaux a été confiée à la S.P.R.L. Algemene Aannemingen Van Laere, de Burcht, pour un montant de 1 milliard 265.867.124 F, y compris les parties métalliques. Les travaux furent entamés le 1 avril 1971.

L'installation du chantier comporte un quai de déchargement, un dépôt de sable et de gravier, une centrale à béton, un atelier central pour le ferrailage, un atelier central pour l'entretien des engins mécaniques ainsi qu'un réseau de routes et des locaux administratifs.

Le cube total des déblais s'élève à 1.350.000 m³. L'excavation et le transport des terres a été entamé à sec, puis continué au moyen d'une suceuse, suivi de la mise à sec de la fouille. Le rabattement de la nappe

aquifère a été réalisé au moyen d'une centaine de filtres qui vont jusque dans l'argile.

Environ 17.000 t d'acier, de la classe TPI et TPIV, ont été mises en œuvre.

La plus grande partie du coffrage fut réutilisée plusieurs fois, puisqu'on retrouve dans la construction principalement deux types de formes:

- les bajoyers, comportant une large semelle et un mur vertical.
- les constructions en forme de caisson (aqueducs, tunnel pour conduites).

La centrale à béton avait une capacité théorique de 320 m³/h; la production journalière a fréquemment dépassé 2000 m³. Le volume de béton mis en œuvre est d'environ 450.000 m³. Le béton fut amené sur place par camions, munis d'une benne basculante spécialement étudiée pour ce genre de travail, ou par camions munis d'un agitateur. Quelques parties en béton furent préfabriquées.

Le nombre d'ouvriers et d'employés a été réduit au minimum suite à une rationalisation poussée des méthodes de travail.

LES MECANISMES DE MELANGE DES EAUX DANS L'ESTUAIRE DE L'ESCAUT

par

ir. J. J. PETERS

Ingénieur Principal des Ponts et Chaussées
Laboratoire de Recherches Hydrauliques - Borgerhout
Docent aan de Vrije Universiteit te Brussel
Chef de travaux à l'Université Libre de Bruxelles

1. INTRODUCTION

Les estuaires ont de tout temps constitué des pôles d'attraction pour l'homme. Lors du développement de la navigation maritime, des ports y furent établis parfois loin à l'intérieur des terres car l'accès était aisé même pour les grands navires de l'époque. Les accostages pouvaient se faire à l'abri des tempêtes, l'accessibilité à la navigation intérieure garantissait un transit rapide et facile des marchandises vers l'intérieur du pays.

Le développement du trafic maritime et la construction de navires de tonnage croissant ainsi que les risques d'inondation des zones riveraines des estuaires ont nécessité des travaux d'aménagement tels que construction de digues, dragages, rectification du tracé du fleuve etc...

Le mélange des eaux de surface (douces) et de l'eau de mer (salée) crée dans les estuaires des milieux variés et complexes tant du point de vue physique que chimique ou biologique.

Au cours des dernières décennies, les estuaires ont été de plus en plus utilisés pour le rejet de polluants, d'autant plus que les zones industrielles et les villes se sont développées près des ports. Les dimensions, souvent impressionnantes des estuaires, ont facilement fait oublier qu'ils ne sont dans certains cas que de petites rivières, comme par exemple l'Escaut.

Alors que les études spécifiques d'amélioration de la navigabilité ou de protection contre les inondations ne font pas intervenir les mécanismes de mélange des eaux, ceux-ci ne peuvent plus être ignorés dans l'analyse des processus physiques, chimiques et biologiques de la pollution.

Les mécanismes de mélange des eaux de l'estuaire de l'Escaut et leur influence sur les processus de la pollution décrits dans ce texte sont les conclusions provisoires des recherches menées au Laboratoire de Recherches Hydrauliques sous la conduite de Monsieur A. Sterling, Directeur du Laboratoire.

La plupart des données proviennent de mesures effectuées, depuis 1965, par l'équipe de mesures sur terrain du Laboratoire, certaines en collaboration avec le Service d'Océanographie Chimique de l'Université Libre de Bruxelles, dirigé par Monsieur le Professeur R. Wollast, d'une part dans le cadre de l'étude de l'origine et des mécanismes de l'envasement de l'estuaire de l'Escaut dirigée par le Laboratoire de Recherches Hydrauliques, d'autre part dans le cadre du modèle mathématique de pollution de l'Escaut dont l'étude est dirigée par la Commission Interministérielle de la Politique Scientifique. Les autres sources de données sont le Laboratoire de Recherches Hydrauliques, les Services Maritimes d'Anvers, Messieurs N. De Pauw (Laboratorium voor Biologisch Onderzoek en Milieuverontreiniging — Rijksuniversiteit Gent) et S.B. Tijssen (Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee, Texel, Nederland).

2. CIRCULATION D'EAU ET DE SEL DANS LES ESTUAIRES

2.1. Définition d'un estuaire

Suivant la classification de Pritchard (27) l'Escaut se range parmi les estuaires de plaine côtière (coastal plain estuaries). Cameron et Pritchard (9) définissent un estuaire comme « une eau côtière semi-fermée, en liaison libre avec la mer, dans laquelle l'eau de mer est diluée de façon mesurable avec les eaux de surface ».

Cette définition comporte trois aspects fondamentaux.

Le premier — « une eau côtière semi-fermée » — marque l'influence prépondérante du lit du fleuve sur les courants. La morphologie du fond et des rives est responsable de la turbulence du courant et des courants secondaires.

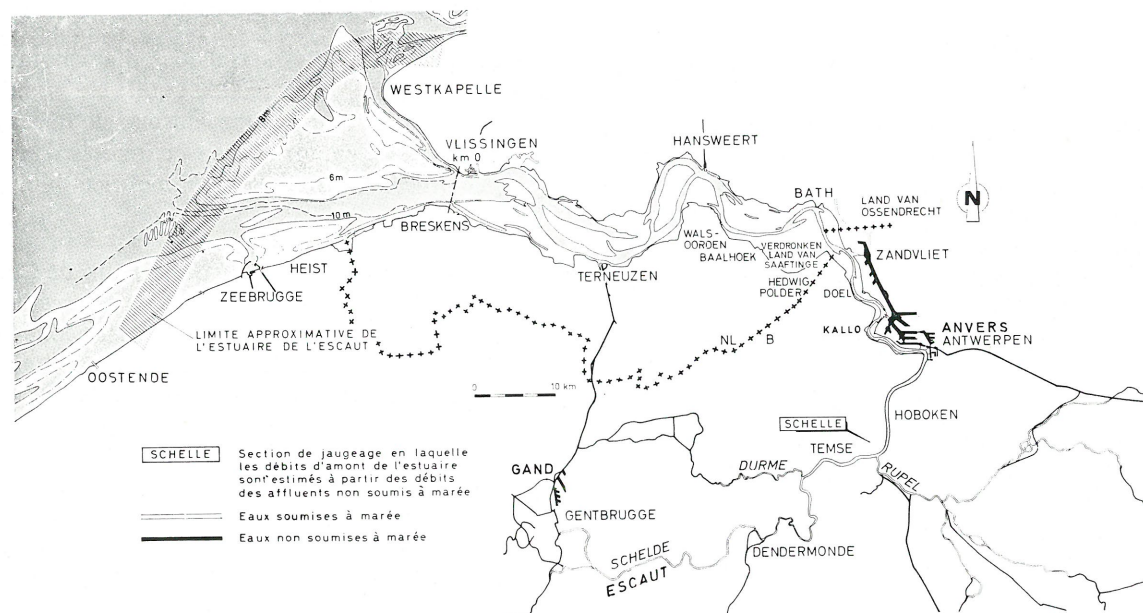


Fig. 1. — L'estuaire de l'Escaut et ses affluents.

Le second — « en liaison libre avec la mer » — signifie que l'onde de marée pénètre librement dans l'estuaire.

Le troisième — « dans laquelle l'eau de mer est diluée de façon mesurable avec l'eau douce de surface » — signifie que cette dilution est responsable de l'existence de gradients de salinité, donc de densité. Ceux-ci déterminent les circulations d'eau très parti-

culières dont l'influence sur les mécanismes de pollution sera examinée par après.

2.2. Classification des estuaires

Les estuaires de plaine côtière présentent une très grande diversité selon les types de circulation d'eau et de stratification de salinité ou de mécanismes de mélange. Pritchard (29) définit quatre groupes principaux : les estuaires à coin salé, estuaires à deux couches avec transport de sel par convection, estuaires partiellement stratifiés avec mélange vertical et estuaires homogènes. Ces derniers peuvent être homogènes ou non latéralement. En fait les estuaires font partie d'une série continue allant de l'estuaire à coin salé à l'estuaire homogène. Cette classification basée sur les stratifications verticales ne doit pas faire oublier l'importance des échanges latéraux dans les mécanismes de mélange.

L'intensité du mélange par dispersion turbulente

Le paramètre géométrique doit refléter l'importance relative de la largeur et de la profondeur. En effet, le mélange par dispersion turbulente est plus intense dans un estuaire peu profond, constitué de préférence de chenaux multiples et de bancs ou d'îles. Vu la grande diversité de morphologie des estuaires, l'influence d'un tel facteur n'a pas encore pu être chiffrée. Dans un même estuaire il est cependant intéressant d'analyser, par exemple, la variation suivant le profil en long du rapport entre la largeur moyenne et la profondeur moyenne.

Le paramètre hydraulique choisi par Pritchard (29) est le rapport entre le volume d'eau remontant l'estuaire au travers d'une section transversale pendant le flot et le volume d'eau douce descendant l'estuaire vers la mer au travers de cette même section pendant un cycle de marée complet. Dans la suite du texte ce paramètre sera appelé le rapport entre le « volume de flot » et le « volume d'eau douce ». Lorsque ce rapport est petit (ordre de grandeur l'unité), la stratification de salinité et les circulations d'eau sont approximativement celles d'un estuaire à coin salé. Lorsque ce rapport devient plus grand (ordre de grandeur de 10 à 100) l'estuaire a les caractéristiques d'un estuaire à mélange partiel. Lorsque ce rapport devient très grand (ordre de grandeur de 1000 ou plus) l'estuaire devient quasi homogène. Les types d'estuaires extrêmes, à coin salé ou homogène, n'existent qu'en théorie. Les exemples généralement choisis pour les illustrer sont respectivement les estuaires du Mississippi (USA) et du Mersey (UK). Le chenal de Bristol, qui constitue l'estuaire de la rivière Severn (UK), dont les marées sont parmi les plus fortes du monde, est un bel exemple d'estuaire quasi homogène verticalement, mais non homogène latéralement (Dyer et Kirby, communication personnelle).

2.3. Processus de mélange des rivières naturelles (Fig. 2).

Pour comprendre le mécanisme de mélange des eaux dans un estuaire, il faut rappeler les processus généraux de mélange dans les rivières naturelles.

Un corps en solution ou en suspension rejeté dans une rivière sera transporté par le courant et subira un processus de diffusion et de dispersion dans la masse fluide en mouvement. Le processus de dispersion sous l'influence de la turbulence (ou des tourbillons) du courant principal sera modifié par l'existence de zones d'eaux mortes, ou stagnantes, par exemple dans les anfractuosités des rives, où une partie des corps en solution ou en suspension sera captée et retenue plus ou moins longtemps.

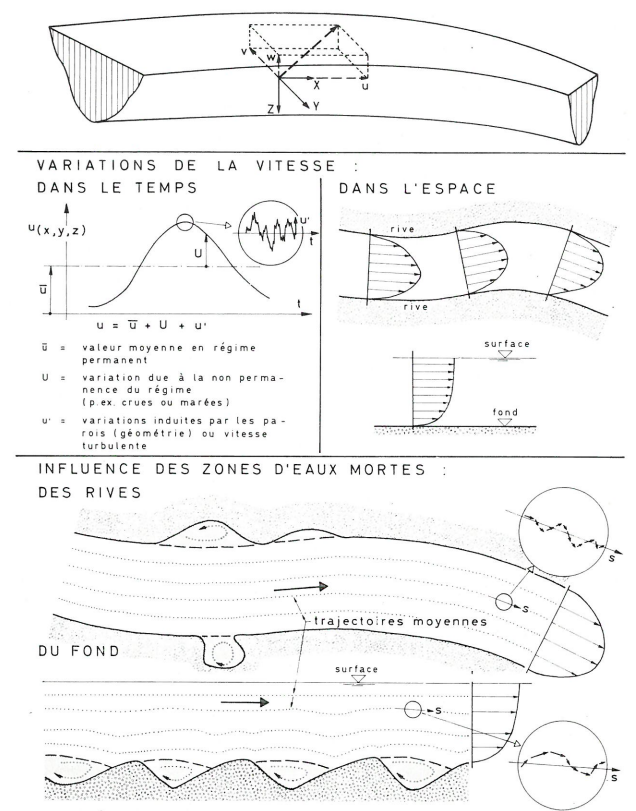


Fig. 2. — Les courants dans les rivières naturelles.

Le processus de transport de masse du corps (en solution ou en suspension) par le déplacement de masse du fluide est appelé convection (ou advection). Le mélange à l'intérieur de la masse fluide par la turbulence est appelé transfert turbulent ou dispersion turbulente. Le mécanisme d'échange entre le courant principal et les zones d'eaux mortes est en fait un transfert de masse.

Tous ces mécanismes se ramènent à des processus de convection dans des échelles de temps et d'espace unitaires tendant vers zéro (Fig. 2). « Dans l'équation de conservation de masse la dispersion est fondamentalement le résultat d'une description incomplète du transport de masse par convection » (20).

Le mécanisme de diffusion moléculaire, dont la nature est essentiellement différente de la dispersion turbulente (souvent appelée de façon impropre diffusion turbulente) n'entre pas en ligne de compte, ses effets étant négligeables vis-à-vis des autres processus de mélange dans les rivières ou estuaires naturels. Contrairement aux mécanismes de diffusion moléculaire les mécanismes de dispersion turbulente sont très mal connus.

De nombreux modèles simplifiés ont été imaginés pour résoudre des cas simples, à condition de disposer

pour les étalonner de mesures en nombre suffisant. En effet, le manque de compréhension des mécanismes propres ne permet pas de calculer, à priori, les coefficients de transfert ou de dispersion turbulente.

L'équation générale de base, équation de convection-dispersion, a été établie par analogie avec l'équation de la diffusion moléculaire:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} =$$

termes de convection

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

termes de diffusion

dans laquelle

C est la concentration du corps en solution ou en suspension.

u, v, w sont les vitesses longitudinale, transversale et verticale.

x, y, z sont les coordonnées longitudinale, transversale et verticale.

$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ sont les coefficients de diffusion longitudinale, transversale et verticale.

Dans l'équation de dispersion turbulente les coefficients ϵ sont remplacés par des coefficients K.

Le modèle le plus simple et le plus utilisé pour les rivières naturelles est celui de Fick. Il est basé sur les hypothèses que la vitesse longitudinale u est constante dans la section transversale, que les effets dus aux variations de cette vitesse dans la section transversale peuvent être résorbés dans le coefficient de dispersion longitudinale K_x et que les effets dus aux vitesses v et w des courants secondaires peuvent être résorbés dans les coefficients K_y et K_z . Dans ces hypothèses, l'équation devient

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

Un autre modèle, celui de la dispersion par mouvements continus, essaye de relier les coefficients de mélange K_x, K_y et K_z aux propriétés de l'écoulement et de la turbulence. Cette théorie s'applique uniquement lorsque le champ de la turbulence est homogène et ne peut donc pas s'utiliser pour un écoulement turbulent de cisaillement (turbulent shear flow) où les propriétés statistiques de la turbulence varient avec la distance à la paroi.

Un modèle basé sur les processus de dispersion longitudinale a surtout été développé par Fisher (15)

(16) (17) (18). L'hypothèse de base affirme que la dispersion longitudinale est principalement due à l'effet combiné du mélange transversal dans toute section et de la convection différentielle due à la variation des vitesses longitudinales au travers des sections transversales.

Fisher (15) (16) a développé sa théorie avec l'hypothèse que dans la plupart des fleuves naturels le mécanisme de dispersion longitudinale est dominé par les variations latérales de vitesse et de transfert turbulent de masse. Pour les estuaires il a combiné un modèle mathématique bidimensionnel qui simule et les mouvements de marées, et la dispersion d'un polluant dans les sens longitudinal et latéral (19).

Tous les modèles précités ont en commun l'hypothèse que la dispersion turbulente est homogène et isotrope, et peut donc se mettre sous la forme

$$K_s \frac{\partial^2 C}{\partial s^2}$$

L'effet des zones d'eaux « mortes » ou « stagnantes » a été explicité par Hays, Krenkel et Schnelle (21) dans un modèle de dispersion longitudinale. Le chenal y est divisé en un courant principal et des zones « stagnantes » (qui ne participent pas à l'écoulement principal) pour lesquelles les équations respectives sont (Fig. 2)

$$\frac{\partial C_a}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial C_a}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 C_a}{\partial x^2} - \frac{KP}{A_a} (C_a - C_d)$$

et

$$\frac{\partial C_d}{\partial t} = \frac{KP}{A_d} (C_a - C_d)$$

avec a relatif au courant principal
d relatif aux zones stagnantes

K coefficient de transfert entre courant principal et zones stagnantes

P longueur de l'interface entre les deux zones dans chaque section

A surfaces des sections transversales.

Ce modèle a peu d'applications pratiques sous cette forme mathématique car ces zones « stagnantes » sont difficiles à délimiter avec suffisamment d'exactitude.

2.4. Processus de mélange des différents types d'estuaires

Considérant la géométrie et les caractéristiques des écoulements d'un estuaire à mélange partiel tel que l'Escaut, il apparaît que les hypothèses de base des

différents modèles de dispersion sont loin d'être respectées. En effet, la composition des dimensions des tourbillons est une combinaison compliquée des effets de la géométrie, des courants et de la rugosité. Les tourbillons générés par le lit de l'estuaire, responsables des phénomènes de mélange, sont modifiés par la stratification de densité (6) (7). L'intensité du mélange des eaux dans l'estuaire est donc fonction:

- de l'irrégularité des sections transversales et de leur variation suivant l'axe longitudinal; ceci comprend la notion de zones « d'eaux mortes » ou « stagnantes »;
- de la rugosité du fond;
- du degré de convection différentielle (lié aux deux points précédents);
- de l'intensité des courants dépendant de l'énergie de la marée;
- de l'importance de l'apport d'eau douce.

Les gradients de densité dus au mélange imparfait des eaux, modifient le degré de convection différentielle longitudinale suivant la profondeur. Se basant uniquement sur des mesures de celui-ci ainsi que de la dispersion turbulente longitudinale et transversale, il est possible de classer les estuaires en fonction de l'in-

tensité du transport de sel soit par convection (dû au courant principal), soit par dispersion turbulente.

Les circulations d'eau qui en découlent apparaissent ainsi plus clairement. La classification qui suit, diffère de celle de Pritchard (28) car elle comporte plus de types, bien que la série, qui est continue, soit la même.

Les différents types d'estuaires, ainsi que les gradients résiduels verticaux des vitesses et des salinités correspondants sont représentés à la figure 3.

— Estuaires à coin salé (Fig. 3A) (Salt wedge).

En l'absence d'échanges entre l'eau douce de rivière et l'eau de mer, aucun phénomène de convection ou de dispersion turbulente ne peut être observé, à part une recirculation lente de la masse d'eau de mer sous-jacente à l'eau de rivière sous l'effet du frottement exercé par celle-ci.

— Estuaires à coin salé avec entraînement de sel par l'eau douce (Fig. 3B) (Two layer flow with entrainment).

Le frottement de l'eau douce contre l'eau salée, et

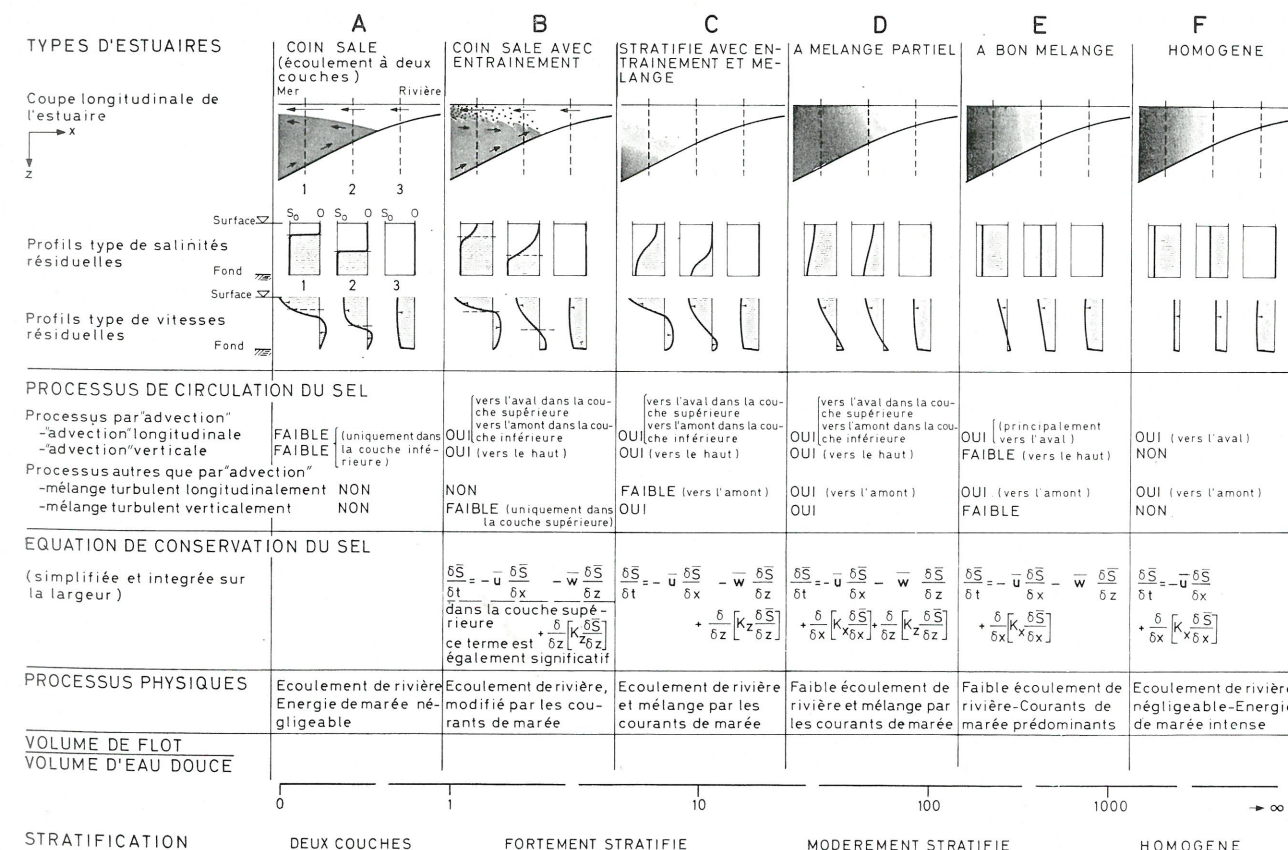


Fig. 3. — Classification des estuaires en fonction du mélange des eaux.

la turbulence interne aux deux couches près de l'interface provoquent le transfert de particules d'eau salée dans l'eau douce et vice-versa. Les particules d'eau douce ne se mélangent pas dans la couche d'eau de mer, les courants et la turbulence y étant minimes. Elles remontent alors par différence de densité. Cependant, les particules d'eau salée captées par l'écoulement d'eau douce de la couche supérieure seront rapidement mélangées à cause de la turbulence (dispersion turbulente) et ainsi entraînées vers la mer (convection). Cet entraînement doit être nécessairement compensé par une convection d'eau salée de la couche inférieure vers la couche supérieure.

— Estuaires à écoulement stratifié avec entraînement et mélange (Fig. 3C) (Two layer flow with entrainment and mixing).

Lorsque l'intensité des courants de marée de la couche d'eau inférieure est suffisante, il s'y crée des tourbillons au contact du fond. Contrairement au cas précédent l'eau douce va s'y mélanger à l'eau salée. L'homogénéisation se fait dans les deux couches dans le sens vertical (dispersion turbulente). L'entraînement de l'eau salée mélangée à l'eau de rivière est compensé par un apport d'eau de mer par la couche inférieure (convection).

— Estuaires à mélange partiel (Fig. 3D) (Partially stratified).

Les courants de marée importants créent une forte turbulence interne, et donc une dispersion turbulente dans le sens vertical et longitudinal. Les différences de salinité dans le sens vertical diminuent, mais sont néanmoins responsables de phénomènes de convection dans les sens vertical et longitudinal.

— Estuaires à bon mélange (Fig. 3E) (Well mixed).

L'apport d'eau douce est très faible et la turbulence interne engendrée par les forts courants de marée homogénéisent les couches dans le sens vertical. Les gradients de salinité verticaux ne sont plus mesurables, mais une stratification verticale des courants résiduels témoigne d'une faible convection verticale.

— Estuaires homogènes (Fig. 3F) (Homogeneous).

Dans ces estuaires le transport de sel vers la mer par l'écoulement de rivière (convection) serait uniquement contrecarré par le transport de sel vers l'amont par transfert turbulent (dispersion turbulente).

Les stratifications de salinité et de courant résiduel sont donc liées au degré de mélange des eaux par dispersion turbulente puisque celui-ci détermine le degré de convection vertical.

3. CIRCULATION D'EAU ET DE SEL DANS L'ESTUAIRE DE L'ESCAUT

L'estuaire de l'Escaut a été longtemps classé parmi les estuaires à bon mélange (10) (11). En effet, le critère employé était l'absence de gradient vertical de salinité, les faibles différences de salinité observées occasionnellement étant attribuées aux techniques de prélèvement et de mesure.

Cependant, en 1934, dans un rapport du Rijkswaterstaat (1), la relation entre les stratifications de salinité et les stratifications des courants était déjà évoquée.

Au cours de la dernière décennie, des mesures plus approfondies ont fait apparaître plus clairement les stratifications de salinité (13) ainsi que les stratifications des courants (25) (37).

Il est intéressant d'analyser à priori les facteurs influençant le mélange des eaux dans l'estuaire pour ensuite analyser les mesures qui permettent de l'estimer, bien que les recherches aient en pratique suivi le chemin inverse.

3.1. Facteurs de mélange

Ceux-ci peuvent être classés en facteurs (ou paramètres) géométriques et facteurs (ou paramètres) hydrauliques.

3.1.1. Paramètres géométriques

La morphologie de l'estuaire de l'Escaut fait actuellement l'objet d'une étude au Laboratoire de Recherches Hydrauliques. L'analyse d'une carte de l'estuaire permet de distinguer deux régions principales.

La première région, allant de l'embouchure à Walsoorden (± 40 km en amont de Vlissingen) (Fig. 1), est constituée d'un système complexe de chenaux. Ceux-ci sont appelés « de flot » ou « de jusant » suivant que les mouvements d'eau y sont prépondérants au cours du flot ou du jusant. En fait, cette classification est parfois difficile à appliquer, par exemple dans le cas des chenaux « Middelgat » et « Gat van Osse-nisse » entre Terneuzen et Hansweert dans leur morphologie actuelle.

La seconde région, s'étendant de Walsoorden jusqu'à Gentbrugge (Fig. 1), est caractérisée par un chenal principal bien formé avec parfois, à l'aval, des amorces de chenaux secondaires. La largeur de la

section à marée haute diminue fortement à hauteur de la frontière belgo-néerlandaise, ce qui est très visible sur la carte (Fig. 1).

Les évolutions de la section mouillée de l'Escaut à mi-marée, marée haute et marée basse, sont semblables. Les lois exponentielles représentées à la figure 4 montrent clairement l'existence des deux zones précitées. Remarquons cependant que la zone amont peut également être subdivisée en quatre sous-zones, les discontinuités étant situées à hauteur des affluents principaux, le Rupel, la Durme et la Dendre.

Le rapport entre la largeur et la profondeur de la section mouillée, paramètre géométrique utilisé par Pritchard (28) pour classer les estuaires, varie fortement suivant le profil en long de l'estuaire et en fonction de l'état de la marée (Fig. 6).

Dans la zone à chenaux multiples ce rapport oscille entre 100 et 1000 avec 450 comme valeur moyenne. Son évolution dans les 50 premiers kilomètres à partir de Vlissingen présente une allure périodique assez irrégulière. Ceci s'explique par la présence de nombreux bancs et hauts-fonds. Cette morphologie complexe est propice aux circulations d'eau autour des bancs et par-dessus les bancs et favorise la création de zones « d'eaux mortes ». Tous ces facteurs augmentent la dispersion turbulente et le mélange. A partir de Walsoorden (kilomètre 40 compté depuis Vlissingen)

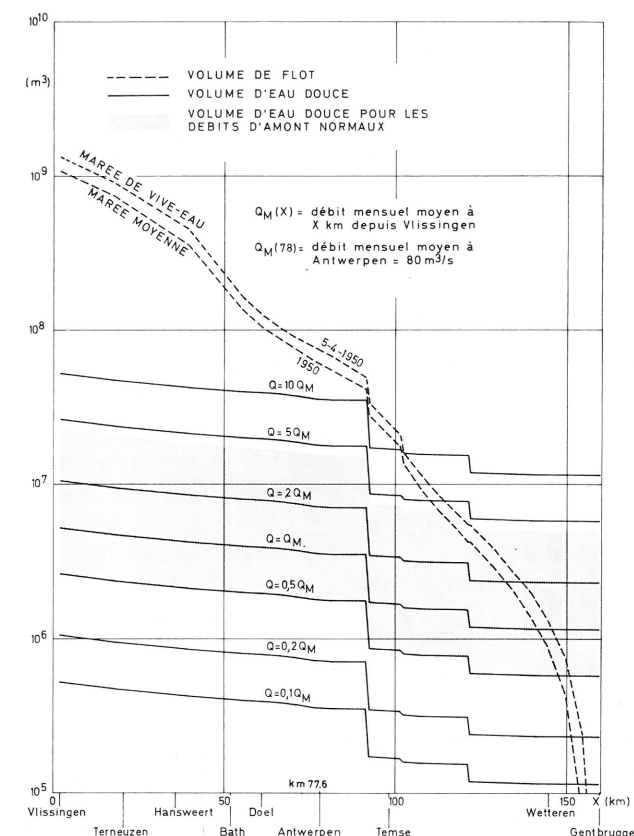


Fig. 5. — Volumes d'eau en mouvement dans l'estuaire de l'Escaut.

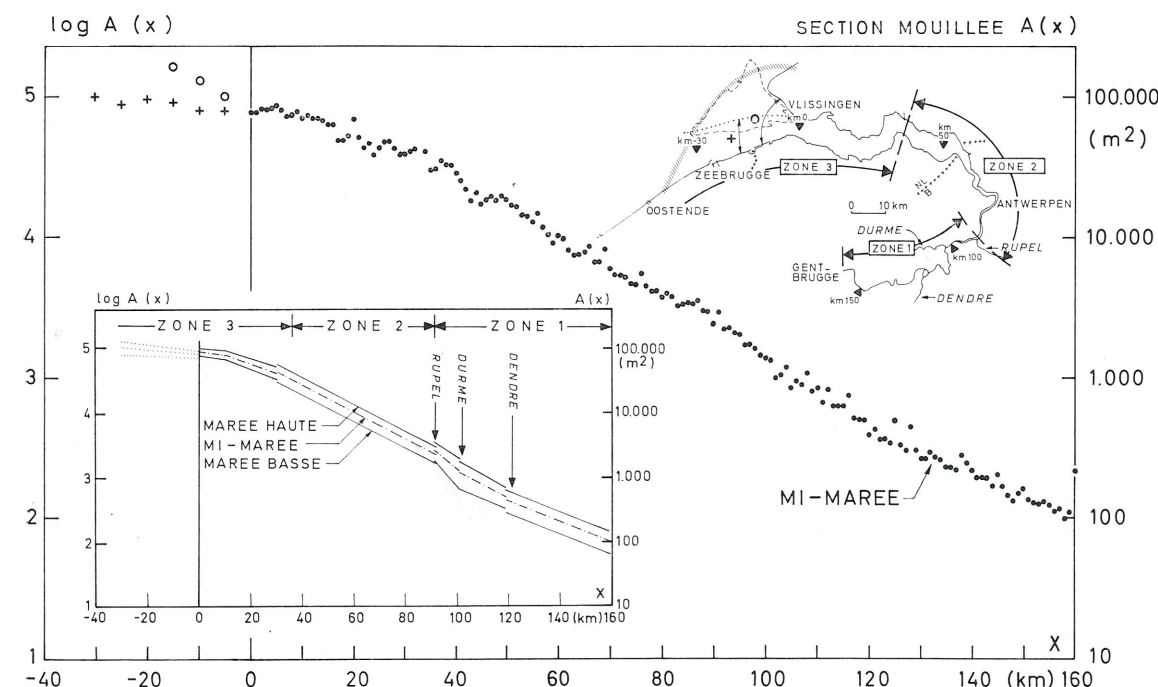


Fig. 4. — Sections mouillées de l'Escaut (non compris les affluents).

Note: Toutes les hauteurs ont pour origine le Zéro du Dépôt de la Guerre (Z.D.G.).

gen) le rapport largeur sur profondeur diminue progressivement et devient fort régulier en amont de la frontière belgo-néerlandaise ($\pm$ kilomètre 60) jusqu'au kilomètre 92, c'est-à-dire à l'embouchure du Rupel. En amont de ce point, ce rapport n'a plus beaucoup de signification dans notre étude puisque l'eau y est pratiquement douce. D'autre part la section est très petite à marée basse et le rapport peut devenir grand lorsque la profondeur devient minime.

Juste en amont du Rupel le rapport atteint la valeur de 35 environ soit environ le dixième de la valeur trouvée dans la partie aval de l'estuaire.

3.1.2. Paramètres hydrauliques

Les débits d'eau douce de l'Escaut maritime (ou débits d'amont) et de ses affluents sont assez bien connus en valeur relative pour la période des années 1959 à 1973 (12).

A Schelle, immédiatement en aval de l'embouchure du Rupel, le débit d'eau douce moyen est estimé à $\pm 80 \text{ m}^3/\text{sec}$, ce qui correspond à un volume d'eau douce évacué par marée de 6 millions de m^3 . L'évolution du débit d'amont, entre Vlissingen et Gentbrugge est représentée à la figure 5 pour des débits à Schelle allant de $8 \text{ m}^3/\text{sec}$ à $800 \text{ m}^3/\text{sec}$. Les débits mensuels à Schelle inférieurs à $40 \text{ m}^3/\text{sec}$ et supérieurs à $350 \text{ m}^3/\text{sec}$ peuvent être considérés comme exceptionnels.

Les volumes d'eau déplacés par les mouvements de marée sont moins bien connus. Les études concernant la géométrie de l'estuaire actuellement en cours permettront de faire prochainement des estimations plus précises des volumes de flot par la méthode de la cubature. Un tel calcul a déjà été réalisé en 1921.

La marée à l'embouchure est constituée principalement par la marée lunaire semi-diurne (M2) avec une période de douze heures vingt-cinq minutes. L'amplitude croît de 4 m environ en mer à 5 m à Hemiksem, en amont d'Anvers, et diminue ensuite jusqu'à atteindre environ 2 m à Gentbrugge (38).

Le volume d'eau pénétrant par la section transversale à Vlissingen, au cours du flot, ou « volume de flot », peut être estimé à 1 milliard de m^3 en moyenne. L'évolution du volume de flot, le long de l'estuaire, pour une marée moyenne de 1950 et pour la marée de vive eau du 5 avril 1950 est représentée à la figure 5.

Le paramètre hydraulique de l'Escaut, ou le rapport entre le « volume de flot » et le « volume d'eau douce » est représenté à la figure 6 en fonction de la distance depuis l'embouchure, du débit d'amont et de l'amplitude de marée.

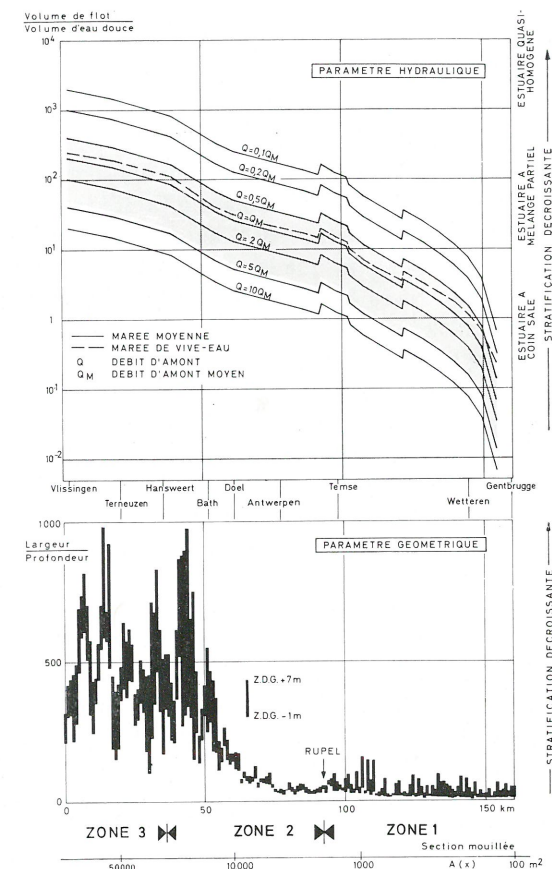


Fig. 6. — Paramètres dont dépend le mélange des eaux de l'Escaut.

A débit d'amont et amplitude de marée constants, ce rapport varie fortement entre l'embouchure et Gentbrugge. Pour un débit d'amont et une marée moyenne, il varie de 200 à Vlissingen (km 0) à 100 au km 35, juste en aval de Hansweert et à 10 aux environs du Rupel. En amont du Rupel, ce rapport descend vers 1 et même en dessous près de Gentbrugge. En un endroit, à débit constant, le paramètre hydraulique varie très peu avec l'amplitude de marée.

Par contre, les variations avec le débit, en un endroit et à amplitude de marée constante, sont fortes. Considérant des débits extrêmes possibles de 8 et $800 \text{ m}^3/\text{sec}$, la même valeur de 20 se situerait respectivement à l'embouchure ($Q = 800 \text{ m}^3/\text{sec}$) et en amont de la Dendre ($Q = 8 \text{ m}^3/\text{sec}$), soit plus de 100 kilomètres en amont de l'embouchure. En fait, les débits fluctuent généralement entre 30 et $350 \text{ m}^3/\text{sec}$, ce qui correspond à la zone hachurée des figures 5 et 6. Les temps de séjour très longs de l'eau douce dans l'estuaire rendent l'interprétation du paramètre hydraulique malaisée lors des crues de l'Escaut et de ses affluents.

3.1.3. Classification des différentes zones de l'Escaut

Considérant la classification de Pritchard (29), il apparaît que la zone à chenaux multiples peut, pour des débits d'amont moyens et faibles, être définie comme bien mélangée. En effet, le paramètre hydraulique et le paramètre géométrique y sont élevés, le premier supérieur à 100, le second oscillant aux alentours de 450. En hiver, en cas de forte crue, cette zone peut cependant avoir les caractéristiques d'un estuaire à mélange partiel.

Entre Walsoorden et la frontière (du km 40 au km 60), zone de transition entre la zone à chenaux multiples et la zone à chenal unique, l'estuaire est pratiquement toujours à mélange partiel. Le paramètre hydraulique moyen se situe entre 100 et 30 tandis que le paramètre géométrique tombe rapidement en dessous de 200.

Depuis la frontière jusqu'à l'embouchure du Rupel les paramètres hydrauliques et géométriques indiquent un mélange partiel.

Nous appellerons zone 3 la zone à chenaux multiples, zone 2 les zones de transition et à chenal unique de Baalhoek au Rupel, et zone 1 la zone de l'Escaut et de ses affluents en amont de l'embouchure du Rupel.

3.2. Distribution de la salinité dans l'estuaire de l'Escaut

3.2.1. Répartition longitudinale

Les stratifications de salinité dans l'Escaut étant faibles il est possible de tracer les distributions longitudinales de salinité. L'intrusion du sel dans l'estuaire est limitée par l'apport d'eau douce (débit d'amont).

Au cours d'une marée le profil longitudinal se déplace vers l'amont au flot et vers l'aval au jusant. A la figure 7 sont représentés, à titre indicatif, les déplacements possibles déduits de mesures faites au

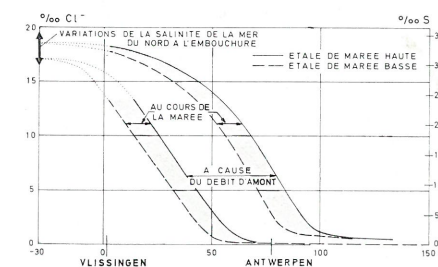


Fig. 7. — Déplacement possible du profil longitudinal de salinité pendant la période 1967-1973.

cours de la période 1967-1973. Il apparaît d'une part, que les déplacements sont fortement influencés par le débit d'amont; d'autre part, il est clair que la salinité à Vlissingen n'approche qu'exceptionnellement celle de l'eau de mer. Les eaux se mélangent encore en aval de Vlissingen. En supposant que dans l'embouchure de l'Escaut le mélange se fait principalement dans les chenaux « Wielingen » et « Scheur », nous pouvons déduire de la figure 4 que la section mouillée continue à évoluer quasi exponentiellement jusqu'à environ 30 km en aval de Vlissingen. A partir de cet endroit le chenal pénètre en mer où la section mouillée tend brusquement vers des valeurs extrêmement élevées. Cependant la morphologie de la région de l'embouchure, située en aval de Vlissingen, et les courants très compliqués qu'on y rencontre, incitent à la prudence quant au choix de la limite de l'estuaire, tel qu'il a été défini au chapitre 2.1.

Des mesures récentes (41) tendent cependant à prouver que les eaux estuariennes sont évacuées vers le chenal « Wielingen » et que le chenal « Oostgat » serait, en quelque sorte, un chenal de flot. La salinité y est d'ailleurs, pour des débits moyens à faibles, proche de celle de l'eau de la mer du Nord dans cette région. La limite aval de l'estuaire pourrait être définie comme le lieu où soit le gradient longitudinal de salinité est nul ($\frac{\partial S}{\partial x} = 0$), soit la salinité égale celle de l'eau de mer ($S = S_0$). Ces deux critères sont à rejeter dans le cas de l'estuaire de l'Escaut. En effet, vu les dimensions relativement réduites de la partie sud de la Mer du Nord, la salinité y varie fortement à cause des apports par les rivières et même par l'effet direct de la pluie (Tijssen, communication personnelle) (Fig 8).

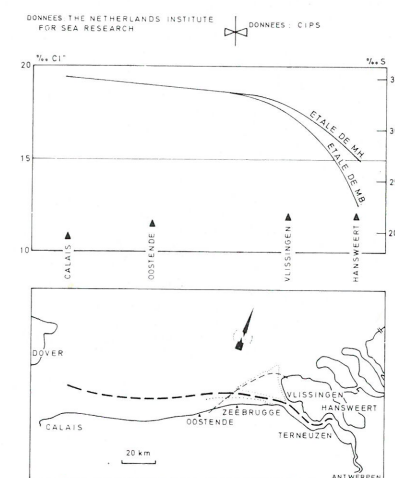


Fig. 8. — Profil longitudinal de salinité entre Hansweert et le Pas de Calais en septembre 1973.

3.2.2. Répartition latérale

Les gradients de salinité latéraux peuvent certainement être négligés en amont de Walsoorden. A la figure 9 les courbes isohalines relevées à l'étale de marée haute le 31 mars 1971 à hauteur de la frontière belgo-néerlandaise indiquent un faible gradient latéral. En aval de Walsoorden, le système de chenaux de flot et de jusant séparés par de grands bancs provoque des recirculations par-dessus et autour de ceux-ci, ce qui explique des différences de salinité observées quelquefois entre chenaux (Fig. 10) dans une même section transversale. Il est cependant difficile dans ces cas de définir celle-ci correctement.

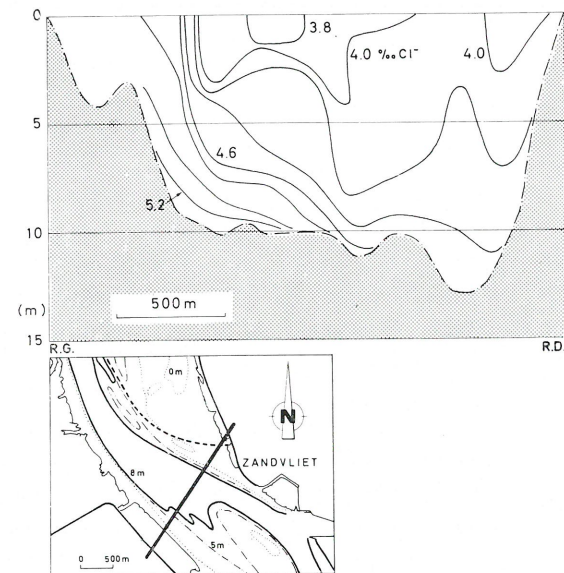


Fig. 9. — Répartition transversale de salinité à la frontière belgo-néerlandaise le 31 mars 1971 à l'étale de marée haute.

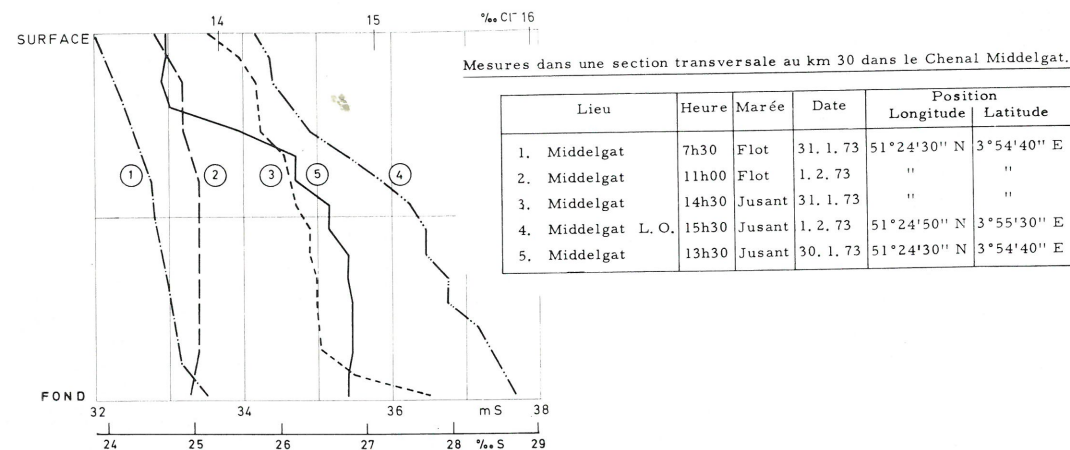


Fig. 11. — Exemples de profils verticaux instantanés de salinité.

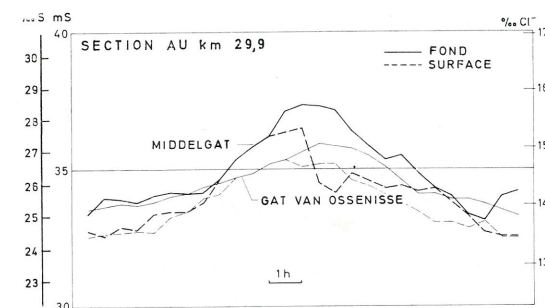


Fig. 10. — Variations de salinité en fonction de la marée (30.1.1973) dans une section transversale à deux chenaux.

3.2.3. Répartition verticale

La stratification verticale de salinité est due aux différences de densité des eaux suite au mélange imparfait de celles-ci. Elle sera donc intimement liée aux facteurs de mélange définis plus haut, à savoir les facteurs géométriques et les facteurs hydrauliques, et varie avec le lieu, avec l'apport d'eau douce et avec le moment de la marée.

La salinité est normalement plus élevée au fond. Les variations sur la verticale au cours de la marée (Fig. 11) ainsi que les variations de l'intensité de la stratification au cours d'un même cycle de marée (Fig. 12) sont fort irrégulières.

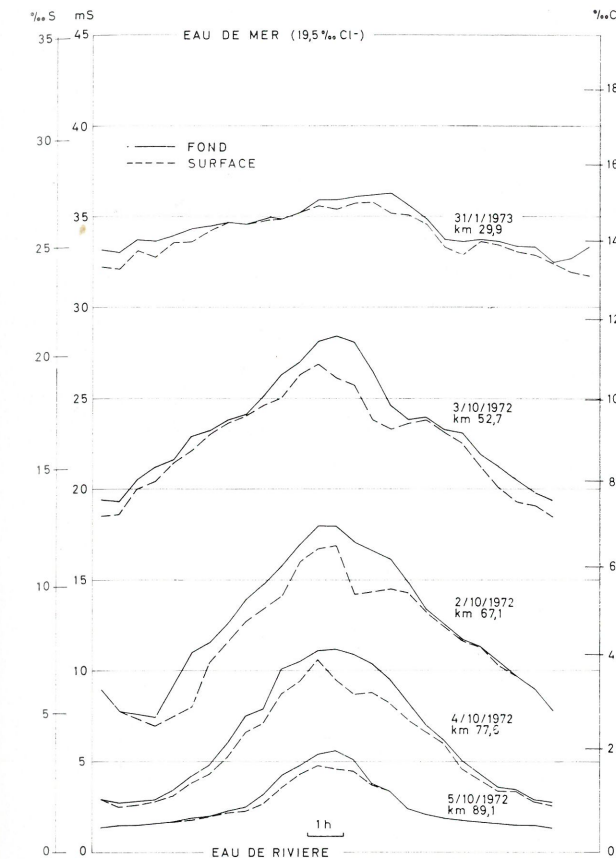


Fig. 12. — Variations de salinité en fonction de la marée en différents endroits du profil longitudinal de l'Escaut.

Les différences entre la salinité de l'eau de surface et l'eau de fond est généralement inférieure 1 ‰ S, avec des valeurs maxima pouvant aller jusqu'à 2 ‰ S au centre de la zone 2, à hauteur de la frontière belgo-néerlandaise. Les variations au cours de la marée de la salinité moyenne de 8 ‰ S et un gradient longitudinal de 0,75 ‰ S par km ont été observés.

Les différences de salinité entre les deux rives sont maximales entre le km 40 (Walsoorden) et le km 60 (frontière belgo-néerlandaise). Au cours d'un cycle de marée cette différence est faible en moyenne, mais peut occasionnellement atteindre 4 ‰ S. Rappelons que la salinité de l'eau de mer près de l'embouchure de l'Escaut varie entre 30 ‰ S et 35,5 ‰ S. La salinité moyenne des océans est de 35 ‰ S (ou gr/l), ce qui correspond à une chlorinité de 19,374 ‰ Cl⁻ (ou g/l). Nous avons adopté la valeur de 19,55 ‰ Cl⁻ pour la chlorinité de l'eau de mer, ce qui correspond à une salinité de 35,23 ‰ S, à une conductibilité électrique de 48 millisiemens (ou mS ou millimho ou milliohm/cm) et à une densité d'eau de 1,0249. Les conductivités renseignées sur les figures sont mesurées à 18 °C.

Les mesures de stratification de salinité décrites ci-dessous ont été relevées pendant la période mars 1972 - janvier 1973. Or depuis avril 1970 jusqu'à fin 1973 les débits d'eau douce pénétrant dans l'estuaire ont été fort constants, le régime hydraulique moyenné sur les marées approchant en 1972 l'état stationnaire. Les débits des quatre campagnes de mesures du 20 au 23 mars 1972, du 24 au 27 juillet 1972, du 2 au 5 octobre 1972 et du 30 janvier 1973 au 2 février 1973, sont tous proches du mode (valeur la plus fréquente) de la distribution des débits de la période 1949-1973 (Fig. 13).

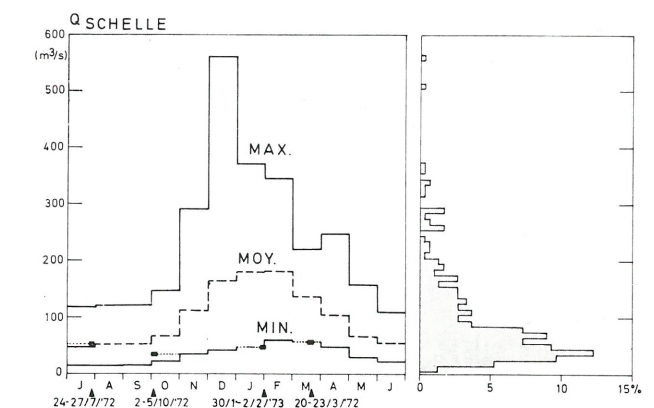


Fig. 13. — Les débits mensuels de quatre campagnes de mesures en 1972 et 1973 comparés à la distribution des débits moyens mensuels de la période 1949-1973.

Les gradients verticaux des salinités moyennes sur la marée peuvent être comparés entre eux au cours de cette période. Il est difficile de définir un paramètre caractérisant le degré de stratification. La différence entre les salinités de fond et de surface moyennées sur une marée (ΔS) a comme avantage d'être d'utilisation facile, mais comme désavantage de ne pas rendre la forme de la stratification (Fig. 11) et de dépendre de la profondeur. Des mesures dans une même section transversale à Doel (km 61) ont montré que même si la stratification varie de façon irrégulière, les différences de salinités moyennes entre fond et surface (ΔS) sont assez constantes lorsque l'apport d'eau douce est régulier, et que les différences dans le chenal sont très faibles.

Les différentes observations de la période mars 1972-janvier 1973 (Fig. 14) permettent de définir trois zones dans le cas d'un apport d'eau douce approchant le mode de la distribution des débits d'amont.

Zone 1: zone d'eau douce de l'Escaut et de ses affluents en amont de l'embouchure du Rupel ($\pm$ km 90).

Zone 2: à l'aval de l'embouchure du Rupel jusqu'à Walsoorden. Cette zone longue de 50 km est

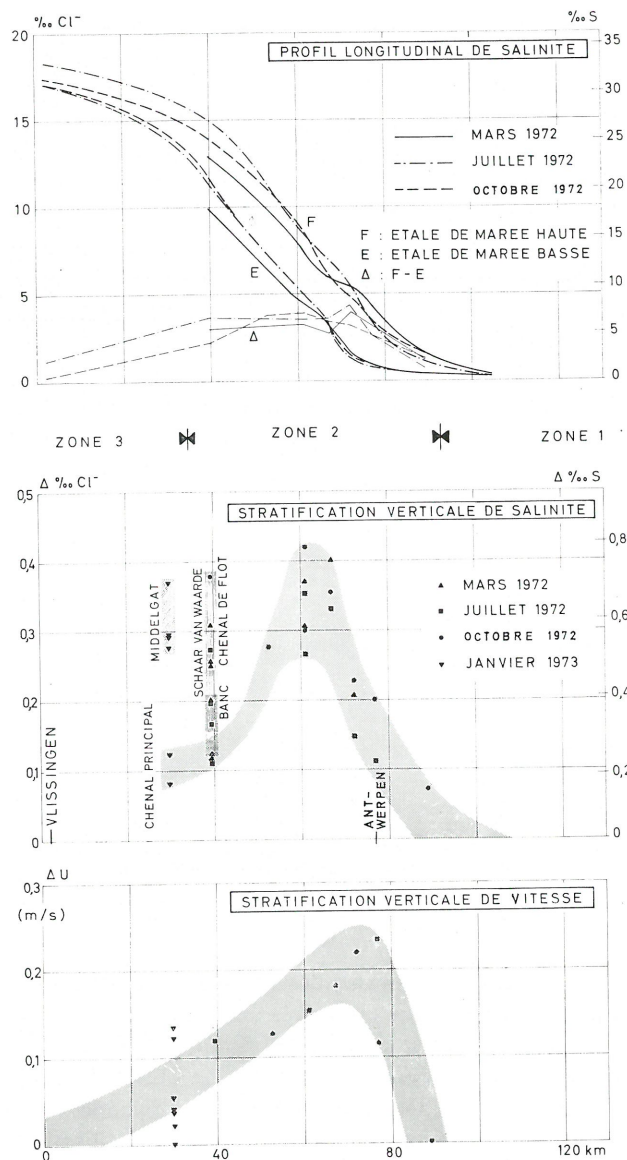


Fig. 14. — Synthèse des résultats des mesures de salinité et de courants résultants pour la période mars 1972-janvier 1973.

caractérisée par des gradients de salinité longitudinaux et verticaux les plus importants. Les maxima de ces gradients ainsi que le maximum de variation de salinité, au cours de la marée, se situent près de la frontière belgo-néerlandaise, à hauteur du km 60. Le mélange des eaux douces et des eaux salées y est typique d'un estuaire partiellement stratifié.

Zone 3: située en aval de Walsoorden, cette zone à chenaux multiples et larges est caractérisée par des stratifications de salinité faibles, sauf dans les chenaux secondaires et autour des bancs de sable.

3.3. Circulation d'eau dans l'estuaire de l'Escaut

3.3.1. Généralités

Dans les estuaires de plaine à mélange partiel tel que l'Escaut, caractérisés par de fortes marées et de faibles débits de la rivière, les déplacements d'eau, ou excursions, sont importants au cours des marées, de l'ordre d'une dizaine de kilomètres. Le déplacement résiduel après un cycle de marée n'atteint que le dixième de l'excursion, ce qui correspond à une vitesse de déplacement de l'eau, moyenne dans le temps et dans l'espace, d'un ordre de grandeur allant de moins d'un centimètre par seconde à l'embouchure à dix centimètres par seconde au Rupel.

L'ordre de grandeur des vitesses moyennes et maximales instantanées de flot ou de jusant est respectivement de 0,7 m/s et 1,5 m/s (39).

La profondeur des estuaires de plaine est généralement petite comparée aux largeurs, et les stratifications verticales ont souvent été négligées.

Des études récentes ont montré l'importance des gradients verticaux de salinité, même très faibles, sur les circulations d'eau (8) (29).

L'importance relative suivant la profondeur des transports de sel par convection ou par dispersion turbulente peut être mise en évidence à l'aide des gradients verticaux de vitesse (36). Dans un estuaire fortement stratifié le mécanisme de transport par convection prime le mécanisme de dispersion turbulente, et les gradients verticaux des vitesses sont faciles à mesurer.

Il en va tout autrement dans les estuaires partiellement stratifiés à bon mélange tel que l'Escaut. Les mesures de vitesse sont alors très délicates à exécuter et à interpréter. Les notions de vitesse résiduelle (vitesse moyenne d'évacuation d'une particule d'eau douce) et de vitesse résultante (vitesse mesurée en un point fixe et moyennée sur un cycle de marée) sont difficiles à saisir. Leur détermination par des mesures ou par des calculs doit se faire avec une extrême prudence. Cependant leur estimation à l'aide de mesures en nature est fondamentale pour le calcul, à posteriori, les différents coefficients intervenant dans les formules de mélange des eaux.

3.3.2. Calcul de vitesses résultantes dans l'Escaut

Au cours de la période déjà mentionnée allant de mars 1972 à janvier 1973, de nombreuses mesures de profils verticaux de vitesses instantanées en plusieurs points de l'estuaire et pendant des cycles de marée

complets, ont permis de calculer certains profils verticaux de vitesses résultantes. Ces vitesses résultantes étaient très petites vu les faibles débits d'amont (Fig. 15).

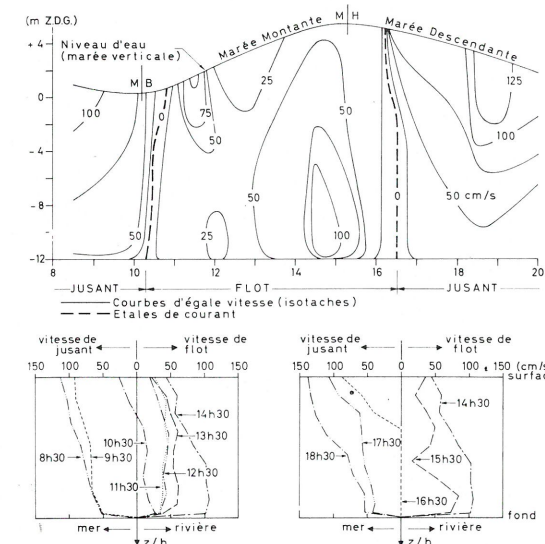


Fig. 15. — Mesures des courants à hauteur de la frontière belgo-néerlandaise le 15 octobre 1970.

Un calcul sur un cycle de marée permet d'estimer les gradients verticaux de ces vitesses, mais pas leur grandeur absolue (Fig. 16), car ils sont influencés par de nombreux facteurs tel que le lieu, la morphologie de la rivière, les changements d'amplitude de marée (37). On peut cependant affirmer, sans trop de risques de se tromper, que la stratification des vitesses résultantes est la plus forte à l'amont de la zone 2, et diminue vers l'aval pour devenir très faible dans la zone 3, où elle peut cependant être encore relativement élevée dans certains chenaux secondaires (Fig. 14). Ceci corrobore les observations de salinité et montre l'importance des recirculations entre chenaux de flot et de jusant sur les mécanismes de mélange dans la zone 3.

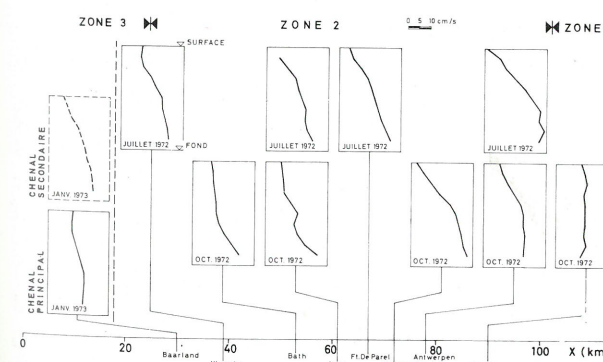


Fig. 16. — Résultats de quelques calculs de stratification des courants résultants au cours de la période mars 1972 à janvier 1973.

3.3.3. Influence des crues de l'Escaut

Dans les estuaires réels, des conditions d'état stationnaire ne peuvent exister (20). L'utilisation de modèles mathématiques est basée sur des observations de terrain ou de laboratoire et l'emploi d'expressions empiriques rend difficile, ou même impossible, la prédiction des modifications des intrusions de sel dans l'estuaire en régime non stationnaire. Les conditions aux limites sont, de ce point de vue, difficiles à définir. A titre d'illustration, pour l'Escaut, les variations de salinité à étales de marée haute à hauteur de Walsoorden (km 40), limite amont de la zone 2, ont été portées en graphique en fonction du débit d'amont de la rivière (Fig. 17).

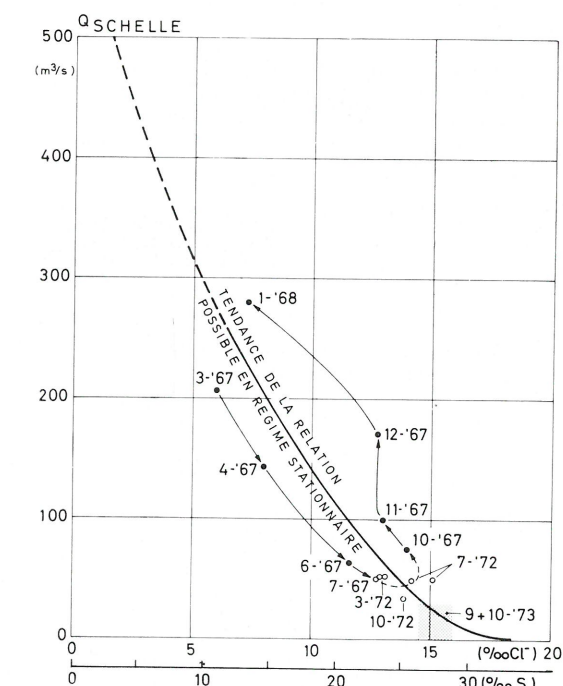


Fig. 17. — Relation débit d'amont à Schelle-chlorinité près de Walsoorden (km 40) à l'étales de marée basse.

Une étude du Rijkswaterstaat, Studiedienst Vlissingen (5) a également démontré la difficulté des prédictions de salinité à Vlissingen. Harleman et Thatcher (20) montrent que les coefficients de dispersion longitudinale, calculés à partir des données de distribution de salinité à étales de marée haute, à étales de marée basse et moyennées sur la marée peuvent être fort différents. La plupart des recherches s'orientent actuellement vers l'utilisation de paramètres sans dimension (« estuary number », « normalized stratification parameter », « densimetric Froude number » etc...

En raisonnant physiquement on peut supposer que la dispersion turbulente dans les estuaires étant en fait

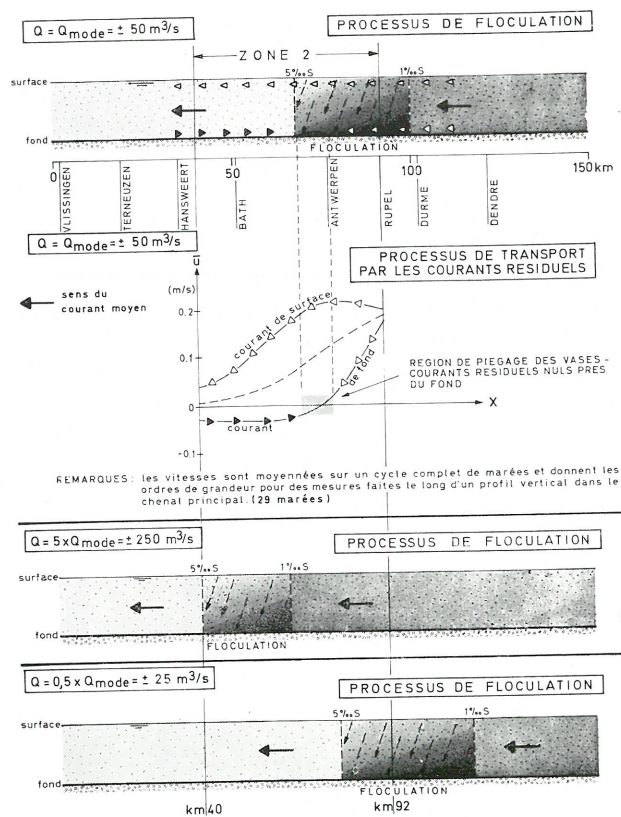


Fig. 18. — Influence de la salinité sur le transport des suspensions dans l'estuaire de l'Escaut.

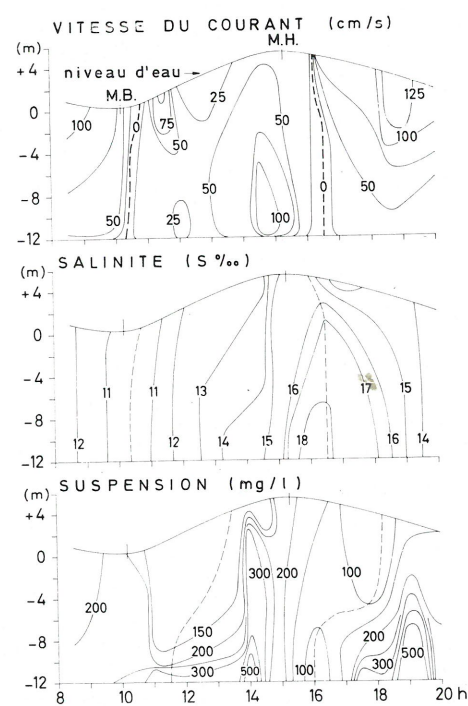


Fig. 19. — Courbes d'égale vitesse, salinité et turbidité à hauteur de la frontière belgo-néerlandaise le 15 octobre 1970.

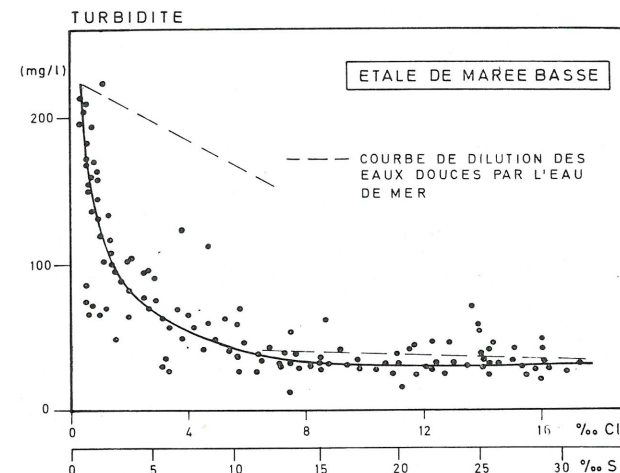


Fig. 20. — Evolution de la turbidité en fonction de la salinité dans l'Escaut en 1972 et 1973.

principalement un phénomène de transport par convection, ne peut varier aussi fortement que ne l'indiquent les variations des coefficients de dispersion turbulente, qui les caractérisent généralement. Un problème analogue se pose d'ailleurs dans l'étude de la dispersion dans les cours d'eau non soumis à marée. Il faut ici remettre en question la forme analytique de l'équation du bilan de sel. Des études récentes au Laboratoire de Recherches Hydrauliques (22) ont mis en évidence le rôle très important que peut jouer, dans le mécanisme de la dispersion turbulente, ce qu'on pourrait appeler l'effet de traînée. Un polluant introduit dans un cours d'eau tend à être capté par les zones « stagnantes » instables, qui forment en fait la rugosité et est relâché progressivement vers le courant principal. Ce mécanisme combiné avec celui de la dispersion classique, expliquerait l'allure asymétrique des courbes expérimentales relevées parfois sur terrain et en laboratoire dans lesquelles le nuage de polluant présente un front raide, mais s'étirant progressivement. Dans les estuaires à mélange partiel, ce mécanisme tend à disperser très rapidement un polluant par le jeu du flot et du jusant. Ceci expliquerait les coefficients de dispersion turbulente longitudinale élevés déterminés expérimentalement dans l'estuaire de l'Escaut à l'aide du modèle de Fick (40) (41) (32) (33). L'influence de la géométrie sur les coefficients de dispersion turbulente avait déjà été discutée par Schijf et Schönfeld en 1953 (35) pour les estuaires du delta Escaut-Rhin et par Okubo en 1973 pour les estuaires et baies en général (23).

L'effet d'une crue dans l'Escaut se marquera d'abord par une augmentation de la stratification, la dispersion turbulente dépendant principalement de l'énergie de marée. La circulation d'eau par convection longitudinale augmentera et le temps de séjour de l'eau douce

dans l'estuaire diminuera. Un tel effet a pu s'observer début février 1974 lorsque, après une augmentation rapide des débits d'eau douce, les matières solides en suspension furent évacuées vers la mer. Le maximum de turbidité se place vers l'aval (Fig. 21, 22).

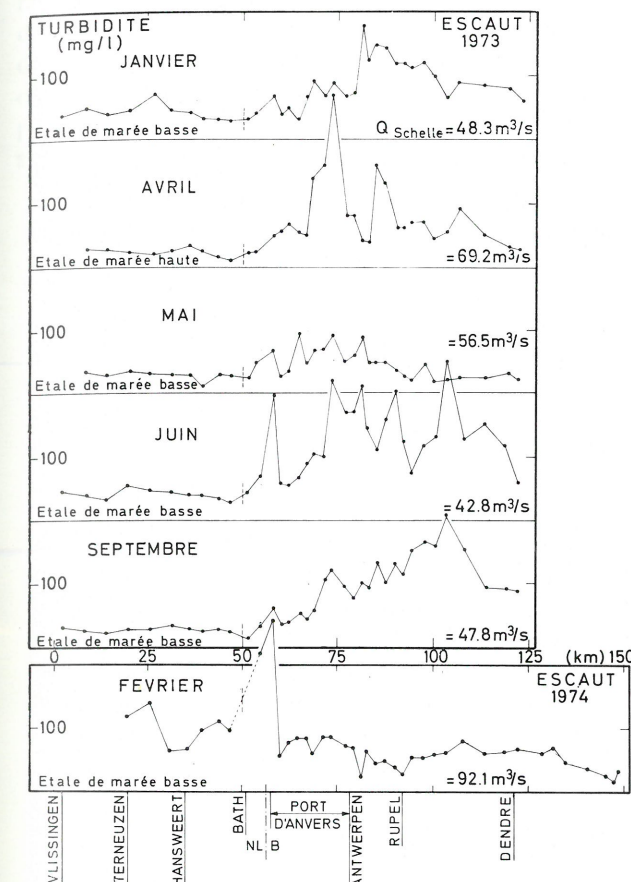


Fig. 21. — Profils longitudinaux de turbidité.

Un temps de séjour normal de l'eau douce dans l'estuaire en aval du Rupel est de 3 mois environ (41).

En cas de crue prolongée, des temps de séjour de moins d'un mois sont possibles. En période d'étiage prolongé, l'eau douce n'est pratiquement plus évacuée.

4. INFLUENCE DES MECANISMES DE MELANGE SUR LA SEDIMENTATION

La nature des sédiments de l'estuaire est très diversifiée, allant de l'argile aux sables moyens.

Les mécanismes de transport dans les estuaires sont complexes (24) (26) et il n'entre pas dans le cadre de cette étude de les décrire tous.

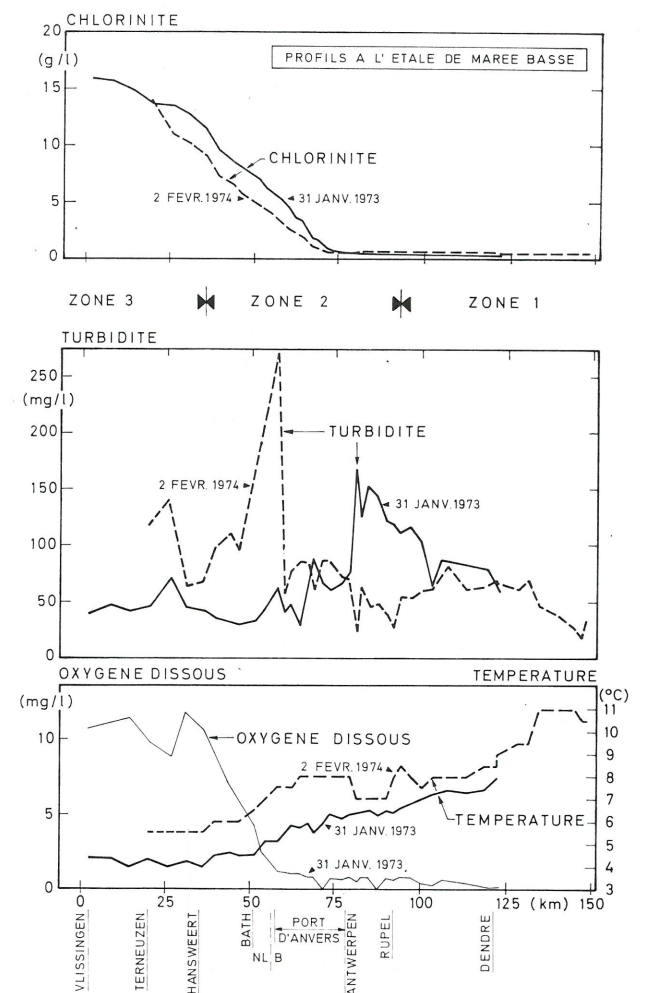


Fig. 22. — Profils longitudinaux de chlorinité, turbidité, température et oxygène dissous.

Dans l'estuaire de l'Escaut, tout comme dans la plupart des estuaires de plaine à mélange partiel, une zone d'envasement se forme sous l'influence du mélange des eaux douces et salées.

L'origine de ces vases est controversée. Il est cependant probable qu'une grande partie de celles-ci est amenée par les eaux de surface.

Les suspensions fines ont pour propriété de flocculer lorsqu'elles pénètrent dans la zone d'eau saumâtre. Cette flocculation augmente rapidement à partir d'une salinité de 1 ‰ S et se stabilise à 5 ‰ S. Les flocons ainsi formés sédimentent rapidement et sont alors transportés près du fond (Fig. 18).

A l'amont, dans la zone d'eau douce, les sédiments en suspension, qui suivent environ les mouvements de l'eau, seront entraînés vers l'aval. Dans la zone de mélange, la stratification des courants résiduels provoque, principalement dans les chenaux, une diminu-

tion de ceux-ci près du fond. A l'aval de l'estuaire, où les courants résiduels moyens de la section transversale sont faibles, la stratification verticale de ceux-ci provoque près du fond un courant résiduel vers l'amont.

Il existera donc une région où les courants résiduels sont nuls près du fond. Les mesures en nature ont permis de localiser cette région à hauteur du port d'Anvers (Fig. 17) (24) (25).

Les mesures montrent clairement l'effet de la stratification des courants et la remise en suspension (Fig. 19) sous l'effet des courants de marée. La sédimentation vaseuse a été explicitée indirectement, en montrant qu'en général la turbidité diminue rapidement en aval de la zone vaseuse (Fig. 20) (3). Les traits interrompus représentent ce qu'on obtiendrait par la simple dilution des eaux douces turbides par l'eau de mer relativement peu chargée de matières en suspension.

5. INFLUENCE DE LA ZONE D'ENVASEMENT DE L'ESTUAIRE DE L'ESCAUT SUR LES MECANISMES DE POLLUTION

La vase joue un rôle important dans les mécanismes de pollution de l'estuaire de l'Escaut.

La formation de la zone d'envasement à hauteur d'Anvers est un phénomène naturel et la vase a toujours été présente dans l'estuaire, car aussi bien les eaux de surface que l'eau de mer salée, contiennent une teneur naturelle de matières solides fines en suspension. La fermeture d'anciens bras de l'Escaut, tels le Sloe, le Brackman et l'Oosterschelde, et les atterrissements sur les bancs et slikkes, telle la région du Verdrongen Land van Saaftinge, ont réduit les zones de sédimentation privilégiées.

Jusqu'au début de ce siècle, certains polders étaient régulièrement inondés par les riverains pour permettre aux matières en suspension de se déposer sur les terres arables et ainsi les amender. La vase qui restait dans l'Escaut, était soumise à une série de transformations parmi lesquelles la destruction de la matière organique par les bactéries.

La teneur en matières solides en suspension entraînées par les eaux de surface vers l'estuaire, a fortement augmenté au cours des dernières décennies à cause de l'activité humaine. L'utilisation d'engrais chimiques et les déboisements des bassins versants des affluents ont provoqué une plus grande érosion des terres. Le développement des réseaux d'égouts des villes et villages, dont les superficies ne font que croître, et les travaux

d'amélioration aux cours d'eau destinés à combattre les inondations ont accéléré l'évacuation de quantités croissantes de matières solides vers l'estuaire.

La vase présente dans l'estuaire intervient dans les processus de pollution, notamment par son influence sur la consommation d'oxygène dissous et le transport des métaux lourds.

Consommation de l'oxygène dissous dans l'eau

La destruction de la matière organique en solution ou en suspension et certaines réactions chimiques consomment dans la zone d'envasement de grandes quantités d'oxygène dissous. Cette consommation est importante parce que les temps de séjour de l'eau et des suspensions dans l'estuaire sont grands, parce que les forts courants de marée remettent continuellement les vases sédimentées en suspension et parce que les marées verticales (mise à sec de bancs et slikkes) et horizontales (courants turbulents) ont pour effet de réaérer l'eau rapidement.

L'estuaire de l'Escaut possède donc un fort pouvoir d'auto-épuration à cause des marées de grande amplitude qui s'y propagent. Cependant, l'augmentation des apports de matières organiques, qui sédimentent principalement dans la zone d'envasement, peuvent faire dépasser localement le pouvoir d'auto-épuration, ce qui crée à ces endroits des milieux anaérobies (Fig. 22).

Adsorption des métaux lourds

Des quantités importantes de métaux lourds, dont certains comme le mercure, le plomb, le cadmium et le zinc sont très toxiques, sont actuellement encore rejetés en quantités non négligeables dans les cours d'eau avec les eaux usées. Des études récentes ont montré que ces métaux lourds rejetés en solution se fixent rapidement sur les matières solides en suspension, et principalement sur les particules fines et sur les matières organiques. Ils seront alors transportés dans les cours d'eau en suspension ou adsorbés sur les suspensions jusqu'à l'endroit où celles-ci sédimentent. Les zones d'envasement des estuaires sont donc des zones d'accumulation de métaux lourds. La destruction de la matière organique va relâcher une partie de ceux-ci qui seront à nouveau transportés en solution.

Ces mécanismes expliquent les faibles quantités de métaux lourds retrouvées dans les sédiments en mer à proximité de l'embouchure de l'Escaut (3) comparativement aux quantités rejetées dans les rivières. Les teneurs plus élevées trouvées près de l'embouchure du Rhin s'expliquent par le régime hydraulique de cet

estuaire, qui est responsable de l'évacuation vers la mer d'une plus grande partie des vases.

Dans les études de l'influence des travaux d'aménagement de l'estuaire de l'Escaut sur les mécanismes de pollution on ne peut ignorer les processus de sédimentation privilégiée de vase, liés directement au degré de stratification de l'estuaire et donc aux mécanismes de mélange des eaux. La figure 23 donne, à titre d'exemple, les résultats d'analyses de teneur en zinc, plomb, phosphate et matières organiques, effectuées sur des sédiments de l'Escaut prélevés en 1971 (3).

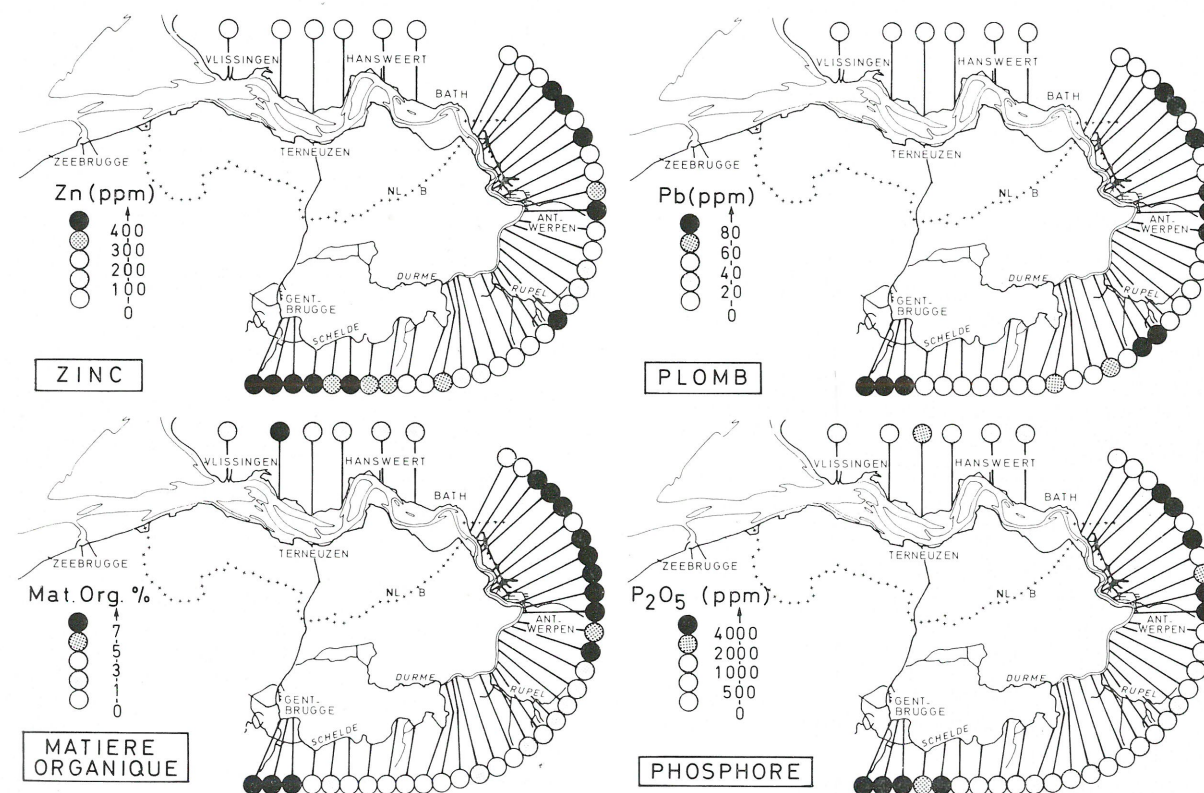


Fig. 23. — Teneurs de certains éléments de pollution dans des sédiments de l'Escaut prélevés en 1971.

6. UTILISATION DE MODELES MATHEMATIQUES

L'emploi de modèles mathématiques s'avère de plus en plus nécessaire lorsqu'il s'agit de prédire les modifications du régime de l'estuaire suite à des travaux d'aménagement ou à des modifications des débits d'amont. Bien que les équations différentielles qui gouvernent le modèle estuarien tridimensionnel, à savoir les équations de continuité, de quantité de mouvement et de conservation de la masse, sont connues, l'utilisateur se heurte encore actuellement à des

problèmes de puissance des ordinateurs, de solutions numériques et d'informations sur les fonctions spatiales tridimensionnelles et temporelles. L'ignorance de ces fonctions enlève souvent aux modèles mathématiques leur pouvoir de prédiction.

Un modèle unidimensionnel peut être utilisé dans des cas simples où les stratifications de densité et les circulations d'eau n'ont pas d'influence. De tels modèles ont déjà permis d'estimer pour l'Escaut les ordres de grandeur des coefficients de dispersion turbulente en état stationnaire (41) (31).

L'utilisation de modèles bidimensionnels stationnaires et non stationnaires est possible. Les observations de terrain et l'étude des facteurs qui déterminent les mélanges des eaux de l'estuaire permettent de définir les zones dans lesquelles ces modèles sont utilisables.

Dans la zone de l'embouchure, appelée plus haut zone 3, l'estuaire est bien mélangé, mais il est composé d'un système complexe de chenaux. Un modèle bidimensionnel intégré sur la profondeur convient dans ce cas. Citons l'exemple de l'influence sur le mélange des eaux et sur le transport des sédiments des travaux

d'extension du port de Zeebrugge, qui en fait se situe encore dans l'embouchure de l'estuaire (fig. 1).

Dans la zone 2, située entre Walsoorden (± 40 km en amont de Vlissingen) et de l'embouchure du Rupel (± 90 km en amont de Vlissingen), l'influence des stratifications de salinité et des circulations verticales nécessite un modèle bidimensionnel intégré sur la largeur dans l'étude des transports des corps en solution ou en suspension.

L'étude de l'estuaire par zones pose le problème des conditions aux limites de celles-ci, qui peut être résolu par des modèles unidimensionnels appliqués à l'entière-
té de l'estuaire.

On ne pourra donc assez insister sur l'importance de bonnes séries de mesures temporelles et spatiales, sans lesquelles les modèles perdent leur efficacité.

7. CONCLUSIONS

L'estuaire de l'Escaut appartient au groupe des estuaires à mélange partiel. Le mélange des eaux est bon dans sa partie aval et devient moins intense en amont de Walsoorden. Les stratifications de sel et de courant et la floculation sont responsables de la formation d'une zone d'envasement à hauteur du port d'Anvers. Cette zone naturelle d'envasement influence fortement les processus de pollution de l'estuaire, car elle forme un lieu de fixation de polluants. La consommation d'oxygène dissous y est favorisée par les grandes quantités de polluants organiques et chimiques qui s'y transforment.

L'étude de l'influence des travaux d'aménagement de l'estuaire sur la pollution et les moyens de combattre celle-ci nécessitent des recherches interdisciplinaires accompagnées de mesures indispensables aux modèles physiques et mathématiques.

REFERENCES

(1) ANONYMOUS, 1934. « Verslag over de in 1930, '31 en '32 op de Westerschelde verrichte metingen en waarnemingen ». Rapport Rijkswaterstaat Nederland.
(2) ANONYMOUS, Modèle Mathématique — Programme Belge Recherche et Développement sur l'Environnement — Projet Eau.
(2) — 1972 « Rapport Annuel ». Projet Mer et Estuaire.
(3) — 1973 « Rapport Annuel ». Projet Mer et Estuaire.
(4) — 1974 « Rapport Annuel ». Projet Mer et Estuaire. (en préparation).
(5) ANONYMOUS, 1974. « De Zoutgehalten in de Westerschelde en het mondingsgebied en de veranderingen ervan t. g. v. de deltawerken ». Eerste bericht. Nota 74.2. Maart 1974. Rijkswaterstaat-Directie Waterhuishouding en Waterbeweging-Studiedienst Vlissingen.

(6) BOWDEN, K.F. and HOWE, M.R., 1963. « Observations of turbulence in a tidal channel ». Jour. Fluid Mech., 17, 271-284.
(7) BOWDEN, K.F. and PROUDMAN J., 1949. « Observations on the turbulence fluctuations of a tidal current », Proc. Roy. Soc., A 199, 311-327.
(8) BOWDEN, K.F., 1967. « Circulation and Diffusion in Estuaries » in « Estuaries »-A.A.A.S. 84: 15-36.
(9) CAMERON, W.M. and PRITCHARD, D.W., 1963. « Estuaries » in « the Sea » (ed. M.N. Hill), Vol. 2, John Wiley Sons, N.Y., 306-324.
(10) CODDE, R.E.L., 1951. « Etudes physico-chimiques du Bassin Maritime de l'Escaut ». Bull. C. Etud., Recherch. Essais. Scient. Construct. Génie Civ. et Hydraul. Fluviale. T. V: 333-342.
(11) CODDE, R.E.L., 1958. « Het verloop van het zoutgehalte in de Zeeschelde ». Revue - C - Tijdschrift 1 (6): 1-6.
(12) COEN, I., 1974. « Debeten van het Scheldebekken ». Antwerpse Zeediensten. Ministère des Travaux Publics de Belgique.
(13) DE PAUW, N. and PETERS, J.J., 1973. « Contribution to the Study of the Salinity Distribution and Circulation in the Western Scheldt Estuary ». Commission Interministérielle de la Politique Scientifique (CIPS).
(14) DYER, K.R., 1973. « Estuaries: A Physical Introduction ». John Wiley & Sons. London.
(15) FISCHER, H.B., 1966. « Longitudinal Dispersion in Laboratory and Natural Streams ». Calif. Inst. of Technology, Keck Lab., Rept N°. KH-R-12, 250 p.
(16) FISCHER, H.B., 1967. « The Mechanics of Dispersion in Natural Streams ». Jour. Hydraulics Div., Am. Soc. Civil Engrs., v. 93, n° HY6, Proc. paper 5592, p. 187-216.
(17) FISCHER, H.B., 1968. « Dispersion Predictions in Natural Streams ». Jour. San. Engrg. Div., Am. Soc. Civil Engrs., v. 94, n° SA5, Proc. paper 6169, p. 927-943.
(18) FISCHER, H.B., 1969. « The Effect of Bends on Dispersion in Streams ». Water Resources Res., v. 5, n° 2, p. 496-506.
(19) FISCHER, H.B., 1970a. « A Method for Predicting Pollutant Transport in Tidal Waters ». Water Resources Center Contrib., n° 132, Hydraulic. Engrg. Lab., University of California Berkeley, 43 p.
(20) HARLEMAN, D.R.F. et THATCHER, M.L., 1974. « Longitudinal Dispersion and Unsteady Salinity Intrusion in Estuaries ». La Houille Blanche, n° spécial - n° 1/2 - 1974, p. 25-33.
(21) HAYS, I.R., KRENKEL, P.A. and SCHNELLE, K.B.Jr., 1966. « Mass Transport Mechanisms in Open-Channel Flow ». Vanderbilt University, San. and Water Rec. Engrg., Dept. of Civil Engrs. Technical Rept. n° 8, p. 138.
(22) MICHEL, D., 1974. « Modèle Stochastique de Dispersion Turbulente dans les Cours d'Eau ». Mémoire de licence en Sciences. Institut de Physique. Université Libre de Bruxelles.
(23) OKUBO, A., 1973. « Effect of Shoreline Irregularities on Streamwise Dispersion in Estuaries and other Embayments ». Netherlands Journal of Sea Research 6(1-2): 213-224.
(24) PETERS, J.J., 1972. « Les transports de sédiments dans l'estuaire de l'Escaut ». Laboratoire de Recherches Hydrauliques. Borgerhout-Anvers.
(25) PETERS, J.J., 1974. « Model voor de studie van de verontreiniging van het Scheldeestuarium ». Symposium The Golden Delta 2 - Pudoc (in press).
(26) POSTMA, H., 1967. « Sediment Transport and Sedimentation in the Estuarine Environment ». In « Estuaries », A.A.A.S. 83, p. 158-179.
(27) PRITCHARD, D.W., 1952. « Estuarine Hydrography ». Advan. Geophys. 1: 243-280.
(28) PRITCHARD, D.W., 1955. « Estuarine Circulation Patterns ». Proc. Amer. Soc. Civil. Eng., 81, n° 717.
(29) PRITCHARD, D.W., 1967. « Observations of Circulation in Coastal Plain Estuaries ». in « Estuaries » A.A.A.S. 83: 37-44.
(30) RASMUSSEN, H. and HINWOOD, J.D., « On Flow in Estuaries ». 1972 - Part I: « A Critical Review of some Studies of Slightly Stratified Estuaries ». Part II: « A Slightly Stratified Turbulent Flow ». La Houille Blanche n° 5 - 1972, p. 377-407.

1973 - Part III: « Derivation of General and Breadth Integrated Models ». La Houille Blanche n° 4 - 1973, p. 319-337.
(31) RONDAY, F. « Etude de l'envasement et de la variation longitudinale du coefficient de dispersion dans des estuaires partiellement stratifiés ». A paraître. Annales des Travaux Publics de Belgique.
(32) ROOVERS, P., 1966. « Collector afvalwaters Noorderkemp. Natuurmetingen. Lozing Rhodamine B in Westerschelde ». Rapport Waterbouwkundig Laboratorium. Borgerhout-Antwerpen.
(33) ROOVERS, P., 1968. « Collector afvalwaters Noorderkemp. Lozing van Broom-82 in de Westerschelde ». Rapport Waterbouwkundig Laboratorium. Borgerhout-Antwerpen.
(34) SAYRE, W.W., 1973. « Natural Mixing Processes in Rivers ». - in « Environmental Impact on Rivers » - River Mechanics 3, edited and published by H.W. Shen - 1973.
(35) SCHIJF, J.B. and J.C. SCHÖNFELD, 1953. « Theoretical Considerations on the Motion of Salt and Fresh Water ». Proc. Minnesota Inst. Hyd. Convention, Joined Meeting I.A.H.R. and Hydraulics Division ASCE.
(36) SCHULTZ, E.A. and D.B. SIMONS, 1957. « Fresh Water-Salt Water Density Currents, a Major Cause of Siltation in Estuaries ». 19th Congress Intern. of Navig. London. Section II - Communication 3.
(37) STERLING, A. and J.J. PETERS, 1975 (en préparation) « Contribution à l'hydrodynamique de l'estuaire de l'Escaut ».
(38) THEUNS, J. and I. COEN, 1973. « Overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken gedurende het tijdperk 1961-1970 ». Tijdschrift der Openbare Werken van België. 3: 139-222.
(39) VALCKE, E. et al., 1966. « Stormvloeden op de Schelde ». Ministerie van Openbare Werken, België.
(40) WAJC, S.J., WOLLAST, R., VANDERBOGHT J.P., 1973. « Propagation of a Local Instantaneous Pollutant Discharge in the Scheldt Estuary ». Rapport interne. Université Libre de Bruxelles.
(41) WOLLAST, R., 1973. « Origine et Mécanismes de l'Envasement de l'Estuaire de l'Escaut ». Service d'Océanographie Chimique. Institut de Chimie Industrielle - Université Libre de Bruxelles.

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	101
2. Circulation d'eau et de sel dans les estuaires	102

2.1. Définition d'un estuaire	102
2.2. Classification des estuaires	102
2.3. Processus de mélange des rivières naturelles	103
2.4. Processus de mélange des différents types d'estuaires	104
3. Circulation d'eau et de sel dans l'estuaire de l'Escaut	106
3.1. Facteurs de mélange	106
3.1.1. Paramètres géométriques	106
3.1.2. Paramètres hydrauliques	108
3.1.3. Classification des différentes zones de l'Escaut	109
3.2. Distribution de la salinité dans l'estuaire de l'Escaut	109
3.2.1. Répartition longitudinale	109
3.2.2. Répartition latérale	110
3.2.3. Répartition verticale	110
3.3. Circulation d'eau dans l'estuaire de l'Escaut	112
3.3.1. Généralités	112
3.3.2. Les vitesses résultantes dans l'Escaut	112
3.3.3. Influence des crues de l'Escaut	113
4. Influence des mécanismes de mélange sur la sédimentation	114
5. Influence de la zone d'envasement de l'estuaire de l'Escaut sur les mécanismes de la pollution	116
6. Utilisation de modèles mathématiques	117
7. Conclusions	118
Références	118

DE MENGMECHANISMEN VAN HET WATER IN HET SCHELDE - ESTUARIUM

Estuaria zijn altijd aantrekkingspolen geweest voor de menselijke activiteiten. Havens en de daaraan verbonden steden en industrieën hebben zich langsheen estuaria gevestigd en ontwikkeld. In ons sterk bevolkt en geïndustrialiseerd land komen grote hoeveelheden afvalwaters van de stroombekkens uiteindelijk terecht in het Schelde-estuarium. Zijn indrukwekkende afmetingen doen gemakkelijk vergeten dat dit estuarium slechts een kleine rivier is met een geringe zoetwaterafvoer.

Studies aangaande verbeteringswerken van de Schelde ten bate van de bevaarbaarheid of de beveiliging tegen overstromingen houden geen rekening met de mengprocessen tussen het zoete rivierwater en het zoute zeewater.

De verontreinigingsmechanismen moeten echter hiermee rekening houden. De menging van het rivierwater met het zeewater doet in de estuaria zeer complexe middens ontstaan, zowel uit fysisch, chemisch als biologisch oogpunt.

Tot voor enkele jaren werd de Schelde gerangschikt onder de homogene estuaria, d.w.z. waar het zoutgehalte regelmatig afneemt van zee in landwaartse richting en waar het zoutgehalte constant is in een dwarssectie. Recente metingen hebben aangetoond dat er wel zoutgradiënten zijn in een dwarssectie en dat deze de stromingen beïnvloeden.

Het estuarium kan onderverdeeld worden in drie zones;

Zone 1; of zoetwaterzone, ligt gewoonlijk opwaarts de Rupelmonding, maar kan bij zeer hoge zoetwaterafvoer tot de Belgisch-Nederlandse grens reiken.

Zone 2; ligt afwaarts zone 1 en reikt tot Walsoorden. Vanaf Antwerpen vormen er zich geleidelijk vloedgeulen, die volledig ontwikkeld zijn bij Walsoorden. Afwaarts de Belgisch-Nederlandse grens verbreedt de Schelde sterk. De mengingen zijn er intenser naarmate men meer afwaarts gaat, omwille van de stromingen rond en over de zandbanken.

De zoutverschillen in een dwarssectie zijn er het grootst en veroorzaken er onder andere een verticale snelheidsstratifikatie.

Zone 3; Afwaarts Walsoorden zijn de vloed- en ebgeulen goed ontwikkeld en de intense menging heeft als gevolg dat de zoutverschillen in een dwarssectie klein blijven. De verticale snelheidsstratifikatie verschilt van plaats tot plaats maar blijft klein.

Het suspensiemateriaal dat door de bovenrivieren wordt aangevoerd, zal onder invloed van de flokulatie, in contact met stijgende zoutgehalten gemakkelijker bezinken en meer bij de bodem getransporteerd worden. De snelheidsstratifikatie in Zone 2, als gevolg van de onvoldoende menging van zout- en zoetwater, zal tussen Bath en Hoboken een zone scheppen waar het sediment bij de bodem gemiddeld over een getij niet meer getransporteerd wordt.

In deze natuurlijke aanslibbingszone zullen pollutanten zich ophopen. Dit mechanisme verklaart de lage gehalten aan zuurstof, hoge gehalten aan organische bestanddelen, zware metalen enz. in de Schelde ter hoogte van de haven van Antwerpen.

Het gebruik van mathematische modellen om deze bezoedelingsproblemen te bestuderen moet met de mengprocessen rekening houden. In zone 1 kan een eendimensionaal model voldoen. In zone 2 mag men de verticale gradiënten niet verwaarlozen en moeten tweedimensionele modellen, geïntegreerd over de breedte, aangewend worden. In zone 3 mag men de laterale verschillen niet meer verwaarlozen en moeten driedimensionele, of eventueel tweedimensionele modellen geïntegreerd over de diepte, gebruikt worden. Driedimensionele modellen zijn echter tot op heden om technische redenen niet toepasbaar.

Veranderingswerken op het Schelde-estuarium zullen de verontreinigingsprocessen beïnvloeden. Voorspellingen hiervan vergen interdisciplinaire studies die moeten steunen op goede natuurmetingen. Deze zijn noodzakelijk voor het gebruik van zowel fysische als mathematische modellen.

COMPTES RENDUS - VERSLAGEN

LA PENTE D'EAU DE MONTECH

(Tarn et Garonne-France)

Rapport de Mission des 24 et 25 juin 1974

par

ir. R. DOYEN

Inspecteur Général des Ponts et Chaussées
à l'Administration des Voies hydrauliques

ir. P. LOHEST

Inspecteur Général à l'Administration de
l'Electricité et de l'Electromécanique

ir. J. SEYVERT

Inspecteur Général des Ponts et Chaussées
ff. à l'Administration des Voies hydrauliques

I. INTRODUCTION

a. Généralités

Afin de favoriser la rapidité de la navigation, il y a intérêt à augmenter les chutes de manière à diminuer le nombre d'ouvrages à construire: il est bien connu que les manœuvres d'approche, d'entrée et de sortie des bateaux exigent, généralement, des temps beaucoup plus importants que ceux nécessaires au rachat de la dénivellation proprement dite.

Aux types d'ouvrages utilisés jusqu'à présent pour racheter les fortes chutes (écluses, ascenseurs, plans inclinés), il convient de mentionner la pente d'eau imaginée par le Professeur AUBERT, Inspecteur général des Ponts et Chaussées de France e.r.

Le présent rapport donne la description de la pente de Montech mise en service en 1973 et fait part des

réflexions que nous inspire le système nouveau. Il se réfère à la littérature déjà parue à ce sujet et notamment aux articles des revues « Navigation, Ports et Industries » des 25.9.71, 10.10.71 et 10.5.73 rédigés par Messieurs J. AUBERT, Inspecteur général des Ponts et Chaussées, promoteur de ce type d'installation, P. CHAUSSIN et M. CANCELLONI, Ingénieurs en chefs des Ponts et Chaussées, ainsi qu'aux explications fournies sur place, par:

Messieurs — le Professeur J. AUBERT, déjà cité;
— Saint Martory, Ingénieur des Ponts et Chaussées du service de la navigation de Toulouse;
— Cubaine, Ingénieur des T.P.E.;
— Cussol, Conducteur;
— Girard, Ingénieur à la S.G.T.E.

b. Principe de la pente d'eau (Fig. 1 et photos)

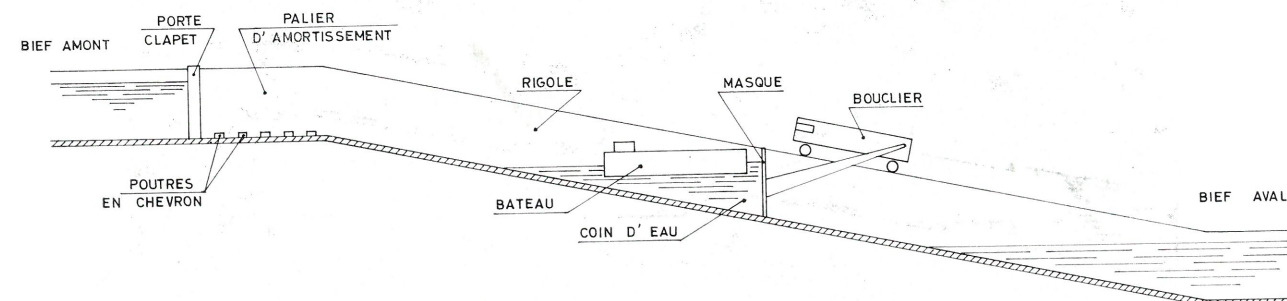


Fig. 1. — Pente d'eau — Représentation schématique.