

J.-J. PETERS *
ET R. WOLLAST **

ENVASEMENT DU CHENAL D'ACCÈS D'UNE ÉCLUSE SITUÉE SUR UN FLEUVE A MARÉE

Introduction

Le port maritime d'Anvers a connu ces dernières années une extension considérable. Plusieurs nouveaux bassins et un canal ont été construits au nord de la ville jusqu'à la frontière néerlandaise où une nouvelle écluse relie depuis 1967 ce canal à l'Escaut immédiatement au sud de la frontière. Le trajet de la mer du Nord au port a ainsi été raccourci de quelque 10 km (fig. 1).

L'écluse maritime de Zandvliet a une longueur de 500 m, une largeur de 57 m et une profondeur de 13,50 m sous marée basse, soit 18,50 m sous marée haute. Son chenal d'accès a une superficie de plus de 400 000 m².

Dès sa mise en service, on a observé un envasement de 10 kg de solide par mètre carré et par jour.

Le mécanisme de cet envasement peut dépendre d'un très grand nombre de variables telles que la turbidité et la salinité des eaux, les marées, les débits d'amont, etc.

Au cours de cette étude, nous avons relevé systématiquement la vitesse d'envasement en mesurant l'épaisseur, le poids spécifique et la teneur en eau du dépôt.

Les mesures de la vitesse, de la salinité, de la turbidité et de la température de l'eau le long de verticales ont mis en évidence que les courants de densité, dus principalement aux gradients de salinité, accélèrent le processus d'envasement.

* Laboratoire de Recherches hydrauliques, 115, av. de Berchem, Borgerhout-Anvers, Belgique.

** Université libre de Bruxelles.

Techniques de mesure

Forages.

Le tube de forage (fig. 2), conçu et réalisé au Laboratoire de Recherches Hydrauliques, permet de prélever des échantillons de vase peu remaniés d'un poids spécifique supérieur à 1,15 t/m³.

Le carottier est constitué par un tube en acier inoxydable de 70 mm de diamètre dans lequel on introduit un tube en chlorure de polyvinyle. Le tube est surmonté d'une tête renfermant un dispositif d'étanchéité muni d'un électro-aimant commandé depuis le bateau.

Un lest réglable et amovible fait pénétrer le carottier dans la vase.

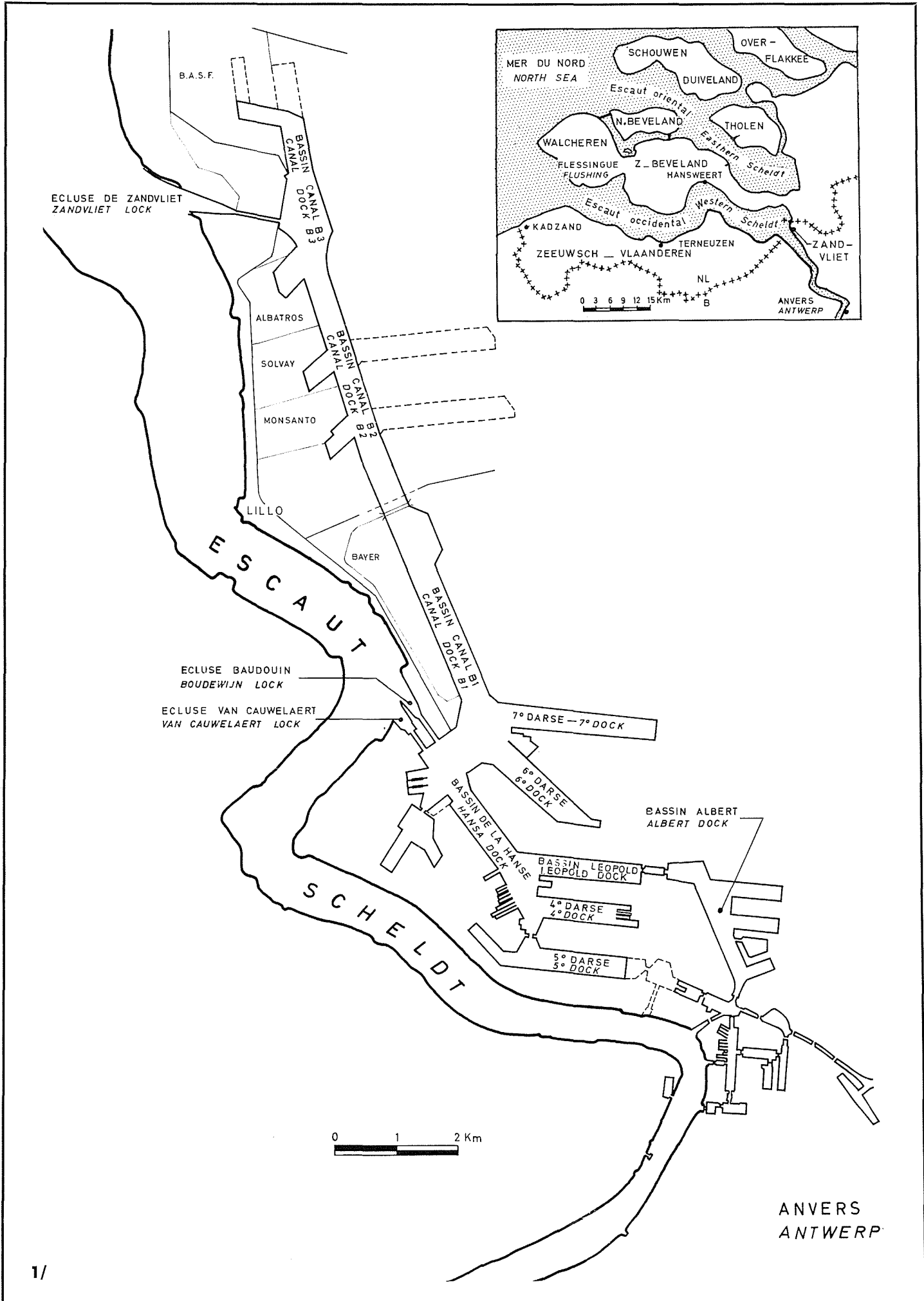
La carotte enfermée dans son tube en chlorure de polyvinyle est retirée. Le poids spécifique et la teneur en eau de la vase sont déterminés tous les 10 cm.

Les mesures de vitesse, de salinité, de température et de turbidité se font simultanément en plusieurs verticales toutes les demi-heures. (La circulation des navires dans le chenal ne permettant pas d'effectuer des mesures au milieu de celui-ci, nous nous sommes limités à des zones situées au voisinage des murs de quai).

Nous disposons de moulinets à axe vertical Bendix du type Savonius, avec indication de direction.

La variation de la salinité sur une verticale mesurée à un instant donné est assez faible. Il importe donc de la mesurer avec une grande précision.

Nous utilisons des conductivimètres E.C.R. (C 4 E) munis de sondes à quatre électrodes. La mesure se fait manuellement. La précision est de 0,025 mS



nécessaire, vu le faible gradient de salinité sur la verticale.

Nous avons adjoint à nos mesures celle du profil de température qui peut être enregistré rapidement avec une très grande précision. On peut déduire de ce profil l'existence de couches intervenant dans les courants de densité.

La mesure du profil de température est effectuée à l'aide de thermistances placées dans un pont électrique dont on enregistre le déséquilibre. Les caractéristiques de ce pont ont été calculées de sorte que le courant enregistré soit proportionnel à la température.

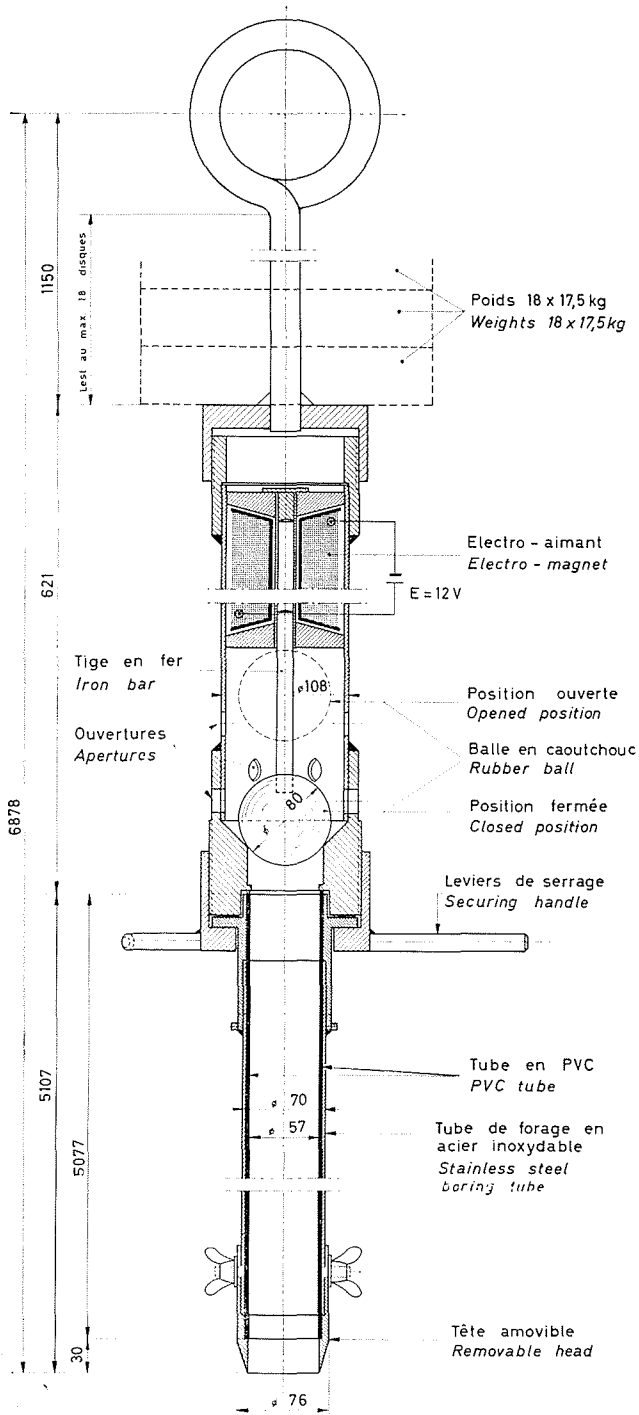
On peut à l'aide du dispositif que nous avons construit, mesurer des variations de température de

0,002 °C. Le temps de réponse de la thermistance est inférieur à 0,2 s, ce qui permet d'enregistrer un profil de température à la vitesse de 1 m par 10 s avec une précision de 0,002 °C.

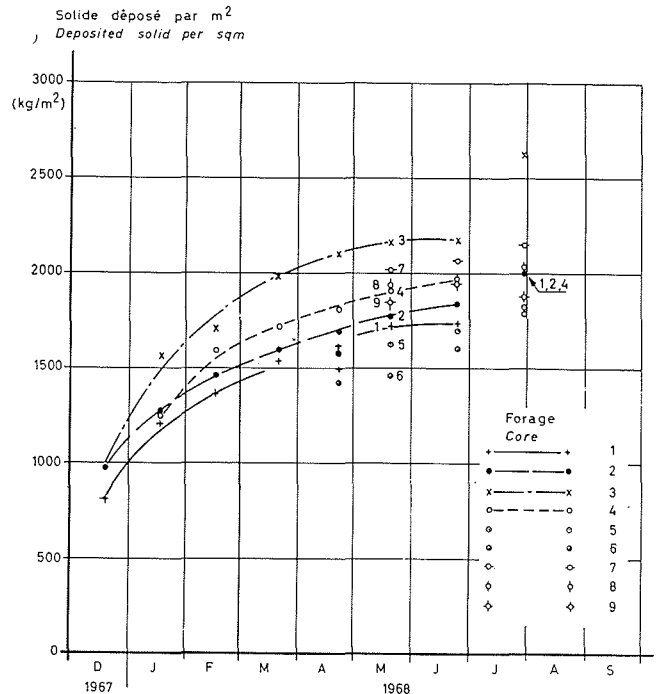
Pour la mesure de la turbidité, des échantillons d'eau sont prélevés à l'aide d'une pompe immergée. Ils sont passés sur filtres millipores dont l'ouverture de maille est de 0,22 µm.

Des mesures en continu se font avec un turbidimètre Sigrist. Cet appareil fonctionne suivant le principe de la diffusion de la lumière par les particules en suspension.

Il existe une relation directe entre la lumière diffusée et la teneur en solide pour des particules dont le diamètre est inférieur à 60 µm. Les parti-



2/



3/

cules supérieures à ce diamètre donnent lieu à une diffusion trop faible de la lumière et ne sont pas dosées correctement.

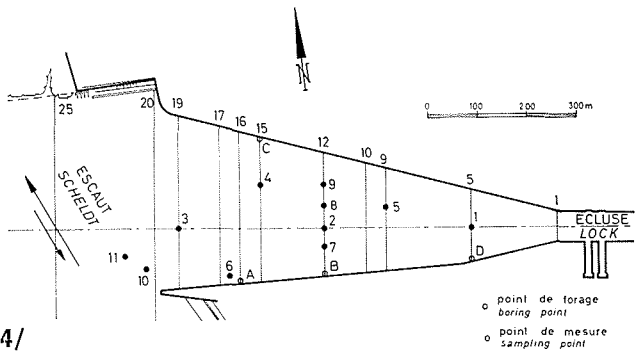
Dans le cas du chenal de Zandvliet, la suspension est composée de particules dont 95 % environ sont inférieures à 60 µm. La mesure à l'aide du turbidimètre est donc largement représentative.

Mesures de l'envasement

La mesure de l'épaisseur du dépôt vaseux, à l'aide d'un écho-sondeur, ne permet pas d'apprécier le degré d'envasement à cause des variations de poids spécifiques de la vase.

L'utilisation du tube de forage permet par contre de situer la répartition du solide en profondeur et d'apprécier exactement la quantité de solide déposée.

Nous avons pu suivre l'envasement du chenal d'accès pendant huit mois entre deux dragages d'entretien. La figure 3 représente la variation du



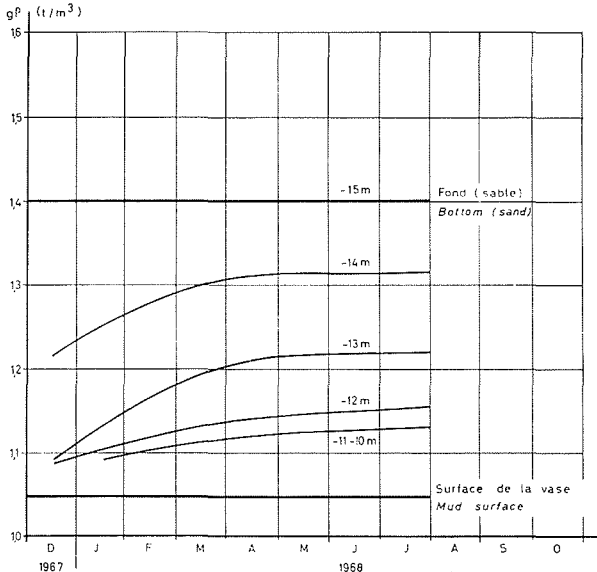
4/

pois de solide déposé par m² en différents points répartis dans le chenal suivant le croquis de localisation (fig. 4).

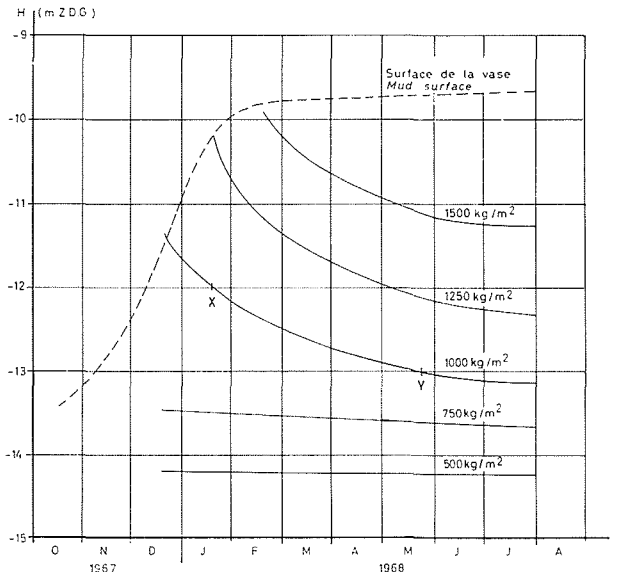
Nous pouvons remarquer que l'envasement est plus important près de l'Escaut. Dans l'axe du chenal, le rythme d'envasement est freiné par les remous dus aux passages des navires.

L'envasement a été le plus important les premiers mois et a ensuite diminué progressivement.

Il est d'autre part intéressant de suivre l'évolution du poids spécifique du dépôt selon un profil vertical au cours du temps. Celui-ci varie de



5/



6/

1,05 t/m³ à la surface supérieure du dépôt jusqu'au maximum 1,6 t/m³ au fond.

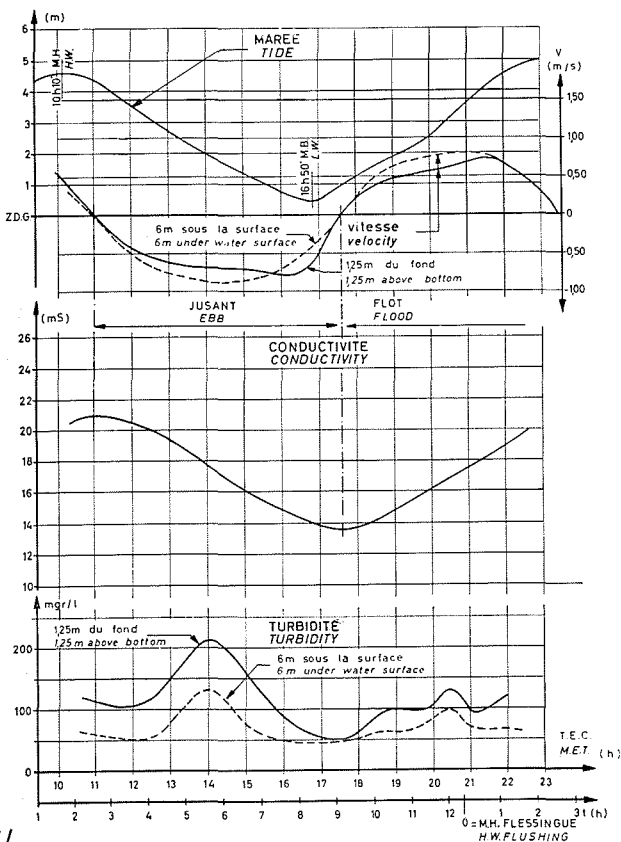
La figure 5 représente la variation du poids spécifique à différentes profondeurs au cours du temps.

Au début de l'envasement, le dépôt est homogène et présente un poids spécifique moyen égal à 1,05 t/m³. Au cours du temps, il se produit une consolidation de la vase par tassement qui dure pendant six mois environ. Après cette période le tassement est faible et ne se marque plus que dans les couches supérieures.

La figure 6 représente la variation de hauteur des couches renfermant un même poids de solide au cours du temps. On constate, par exemple, qu'à mi-janvier (point x) la couche de vase située entre les cotes -15 m et -12 m renferme 1 000 kg de solide par mètre carré. Cette couche, alors épaisse de 3 m, est réduite à 2 m à la fin mai (point y).

Des figures 5 et 6 on peut déduire que le niveau supérieur du dépôt s'est stabilisé vers la cote -9,50 m. Lorsque celle-ci fut atteinte, l'apport de solide combla apparemment la réduction de volume due au tassement.

Cette cote limite correspond environ au seuil séparant le chenal de navigation de l'Escaut et le chenal d'accès de l'écluse. Les remous provoqués par les navires remettent continuellement la couche de vase supérieure en suspension. Celle-ci ne se consolide donc que très lentement.



7/

Le coin salé

Variations de la salinité dans l'Escaut.

Par suite de sa configuration et des conditions hydrauliques la diffusion turbulente est importante et l'estuaire de l'Escaut se comporte comme un mélangeur presque parfait.

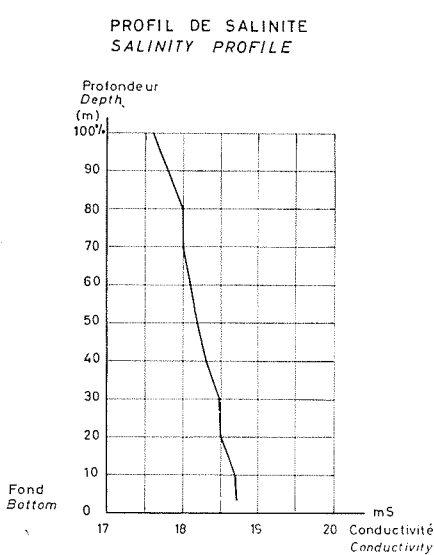
La figure 7 montre, à titre d'exemple, les variations au cours d'une marée, de la vitesse, de la salinité et de la turbidité à Fort Frederik, 1 500 m en amont de l'écluse de Zandvliet.

Malgré les variations importantes de la salinité

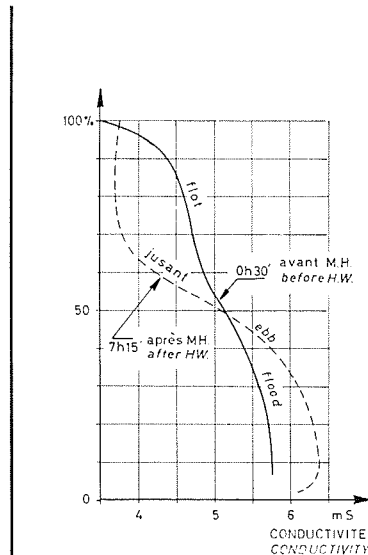
La montée du niveau d'eau et l'accroissement de la salinité sont particulièrement rapides surtout pendant les deux dernières heures avant marée haute, alors que la descente des eaux et la diminution de la salinité sont toujours lentes. Une courbe de marée relevée à Zandvliet est représentée à la figure 10.

La figure 11 montre les variations de salinité et de vitesse enregistrées lors du flot et du jusant à l'entrée de ce chenal. On constatera que, lors du jusant, les variations sont trop faibles pour entraîner l'apparition d'un coin salé.

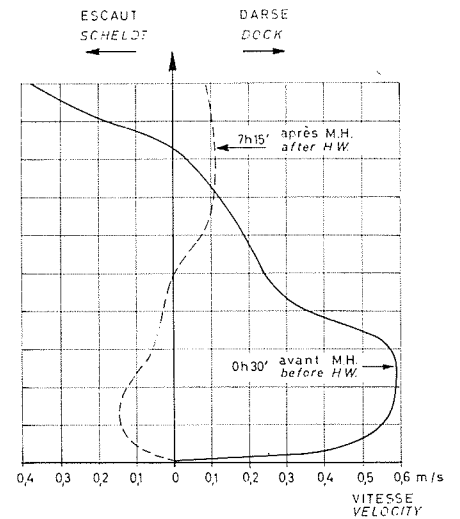
Remarquons que la forme en entonnoir du che-



8/



9/



et l'amplitude de la marée, on ne décèle pas de grandes différences de salinité le long d'une verticale (fig. 8) dans l'estuaire.

Toutefois, à l'entrée des chenaux d'accès aux écluses et des darses, les variations de densité de l'eau de l'Escaut au cours de la marée entraînent l'apparition de courants de densité à l'intérieur de ces ouvrages. Ceux-ci se superposent aux courants de remplissage et de vidange dus aux variations de niveau.

L'existence d'un gradient de densité provoque des mouvements de couches d'eau horizontales dont les vitesses relatives sont proportionnelles à la différence de masse spécifique relative des couches $(v b \sqrt{[(\Delta\rho)/\rho]} gh)$.

Il en résulte que le phénomène sera d'autant plus marqué que la variation de salinité dans le fleuve est importante et rapide.

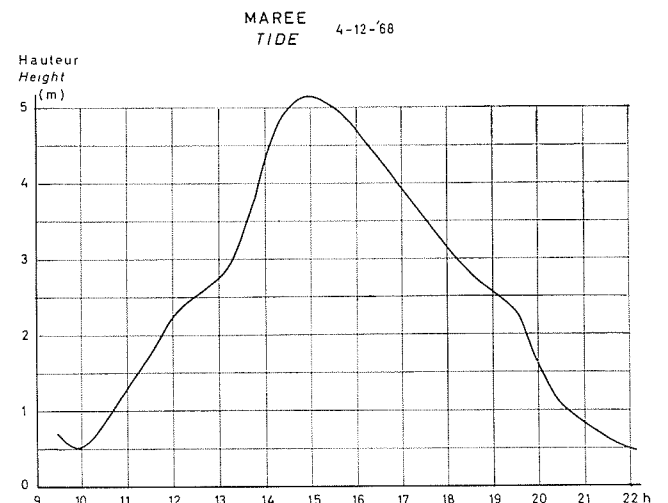
Ces conditions sont particulièrement bien réalisées dans la région du port d'Anvers.

La figure 9 représente les variations de salinité et de vitesse sur une verticale située à l'entrée de la darse qui a servi à la construction du nouveau tunnel sous l'Escaut à Anvers. Ce bassin a une ouverture assez rétrécie et un volume relativement faible, tous facteurs favorables au phénomène. Il apparaît aussi bien au flot qu'au jusant.

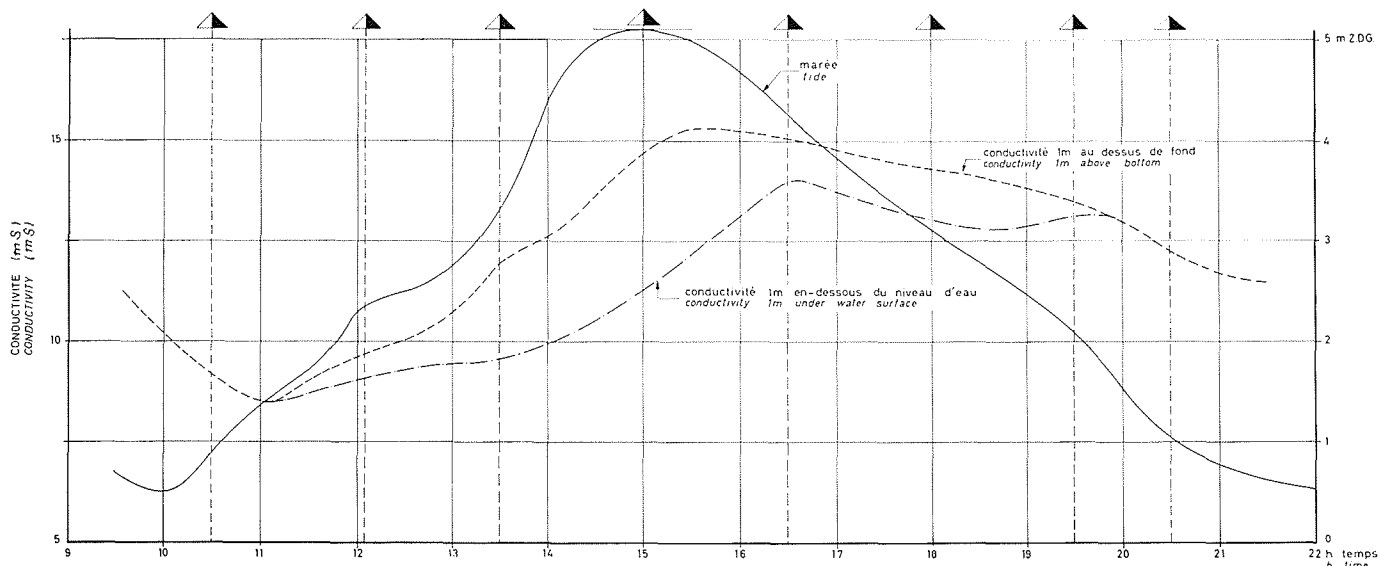
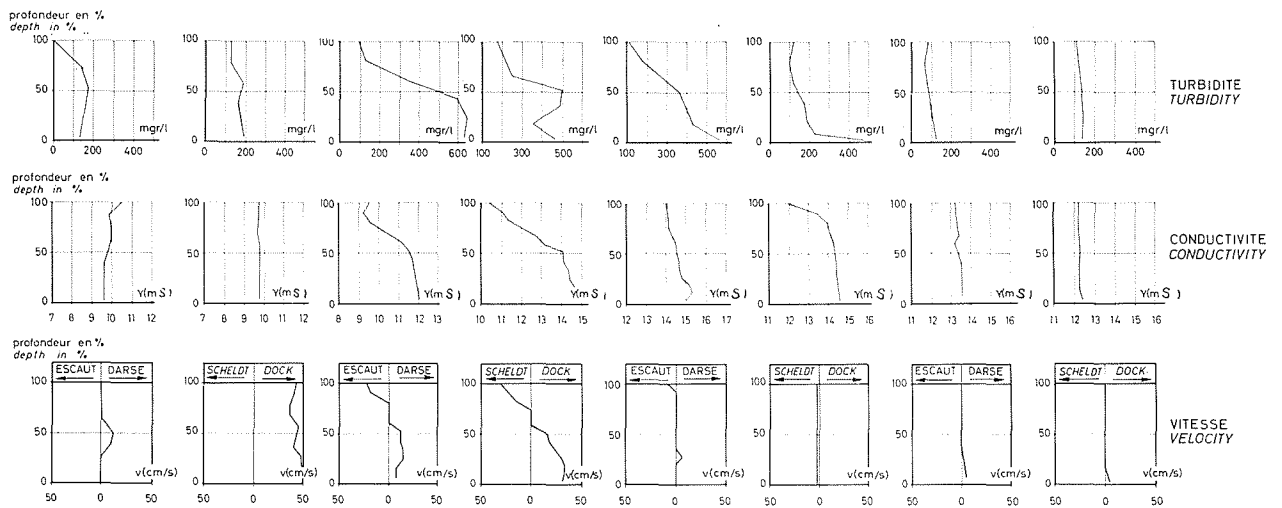
La situation du chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet est différente par suite de la géométrie de l'ouvrage.

nal et son orientation par rapport à l'Escaut sont responsables de l'existence de courants giratoires qui compliquent l'analyse des courants.

La figure 12 représente les profils verticaux de vitesse et de salinité simultanés dans une section transversale. On remarque que les courants d'eau salée provenant de l'Escaut pénètrent dans le chenal le long de sa face sud donnant lieu à une inclinaison des isohalines.



10/



11/

Le débit net le long de la face sud est dirigé vers le chenal d'accès, alors que celui le long de la face nord est dirigé vers l'Escaut.

La figure 13 montre les trajectoires des courants dans le chenal pour trois profondeurs lors du flot.

L'existence de ces courants complexes a pour conséquence que le volume d'eau qui pénètre dans le chenal d'accès est largement supérieur au volume obtenu en multipliant la surface de celui-ci par l'amplitude de la marée.

La vitesse des couches d'eau peut y atteindre jusqu'à 1 m/s alors que les vitesses nécessaires au seul remplissage ne devraient pas excéder 5 cm/s.

Influence du coin salé sur l'envasement

Des levés récents effectués sur l'Escaut par Bastin A ont montré l'existence d'importants dépôts vaseux qui se situent principalement en amont de la frontière belgo-hollandaise. Ces dépôts sont remis partiellement en suspension lorsque les vitesses des couches de fond sont suffisantes. Cette situation se produit au maximum de vitesse lors du flot et du jusant. Les particules solides remises en suspension se redéposent lors des étales.

La figure 14 illustre particulièrement bien ce phénomène mis en évidence à Fort-de-Parel.

Or le maximum des vitesses au flot coïncide avec les courants de densité les plus importants dans les bassins ouverts au fleuve. L'eau de l'Escaut qui pénètre par le fond dans ces ouvrages est donc particulièrement chargée en sédiments. La figure 15 montre à titre d'exemple les mesures effectuées sur un profil vertical situé à l'entrée du chenal d'accès à Zandvliet, lors du maximum de vitesse au flot. Notons que le solide en suspension contribue à accroître la densité de la couche d'eau d'une manière non négligeable et entraîne de ce fait une augmentation des courants de densité. La contribution du solide en suspension au gradient de densité peut être du même ordre de grandeur que celle de la salinité.

Le solide en suspension qui entre de cette manière dans les ouvrages se trouve dans une situation favorable au dépôt.

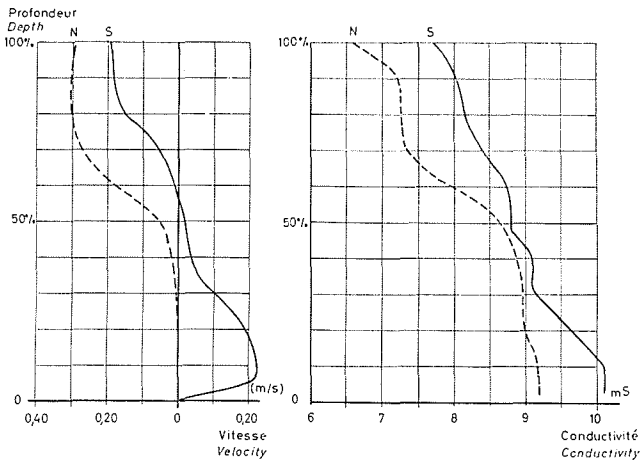
Tout d'abord la vitesse des couches de fond diminue progressivement lorsque celles-ci pénètrent dans le chenal et n'est plus suffisante pour maintenir tout le solide en suspension (fig. 11).

A l'étales des courants dans le chenal d'accès, la plus grande partie du solide se dépose et ceci d'autant plus que la salinité est alors à son maximum, favorisant la floculation des particules colloïdales.

Au début de la vidange du chenal, seules les couches supérieures se mettent en mouvement. La

FLOT (1h avant M.H.)
FLOOD (1h before H.W.)

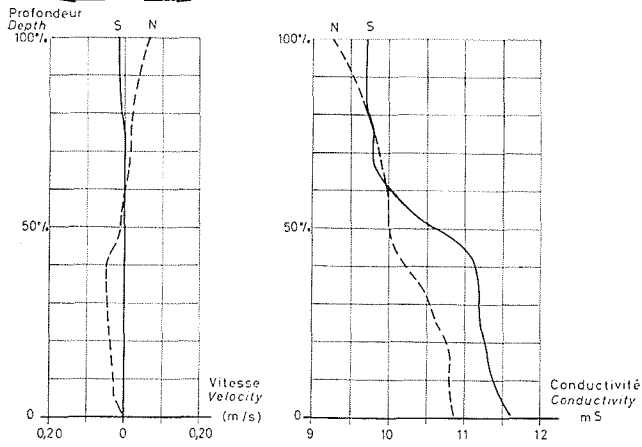
ESCAUT SCHELDT ← → ECLUSE LOCK



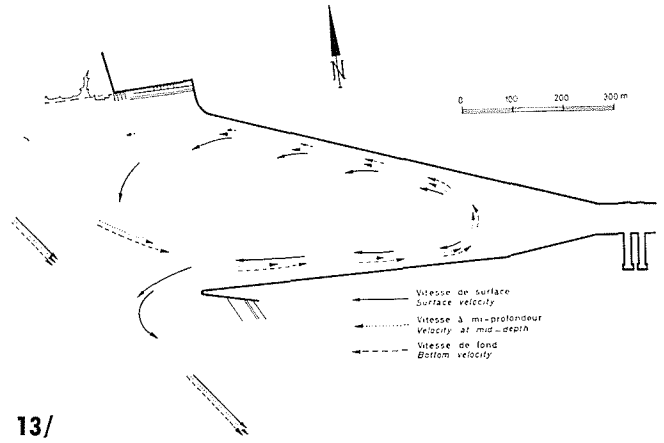
12 a/

FLOT (3h après M.H.)
FLOOD (3h after H.W.)

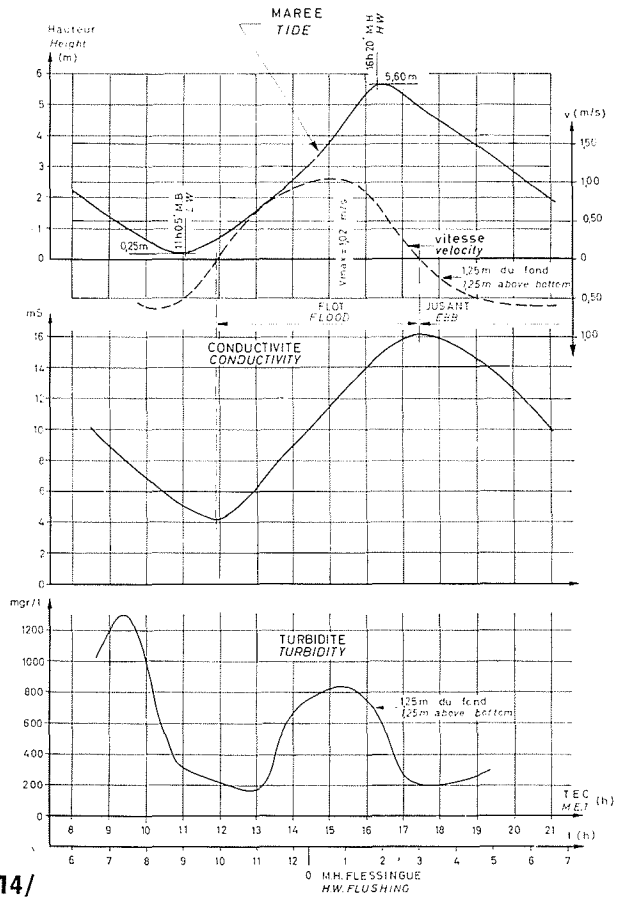
ESCAUT SCHELDT ← → ECLUSE LOCK



12 b/



13/



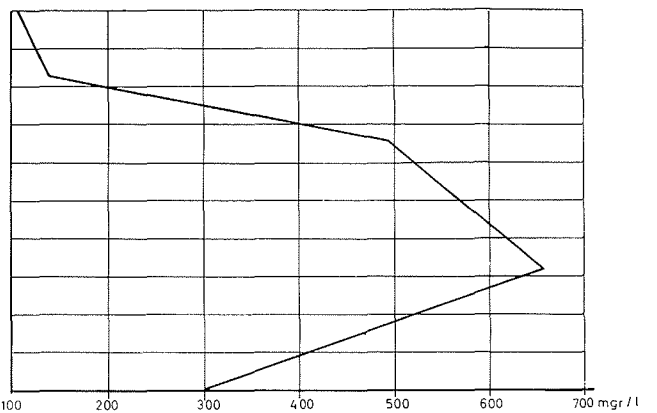
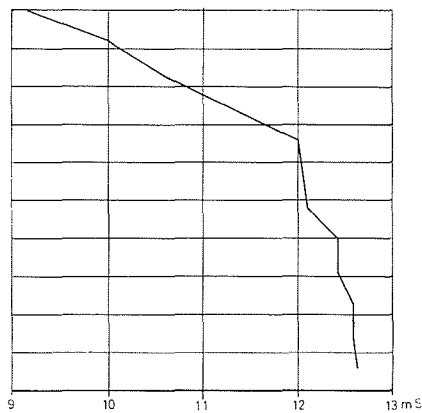
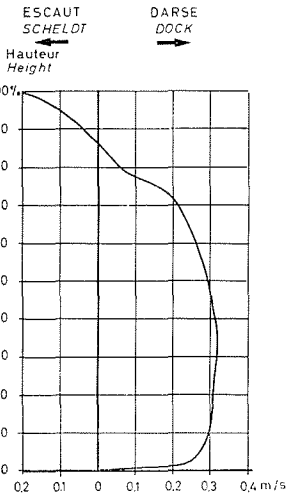
14/

VITESSE VELOCITY

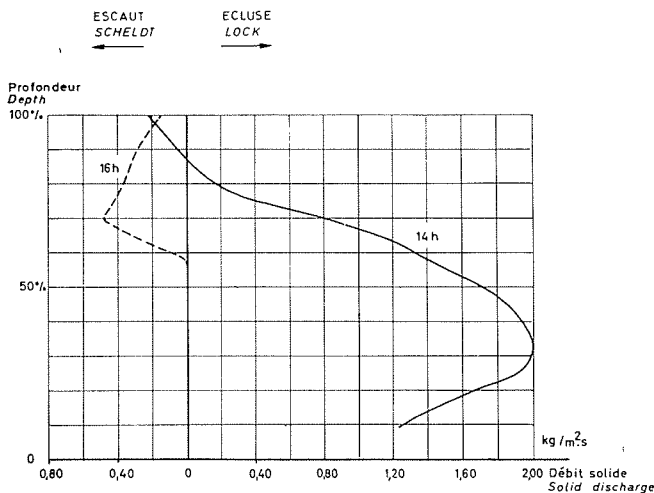
CONDUCTIVITE CONDUCTIVITY

1h avant M.H.
1h before H.W.

TURBIDITE TURBIDITY



15/



16/

couche de fond est maintenue immobile jusqu'à ce que la couche supérieure de moindre densité soit évacuée. La figure 16 met bien ce phénomène en évidence et montre par ailleurs que les faibles vitesses de vidange au fond sont insuffisantes pour remettre le dépôt en suspension.

La complexité des courants lors du remplissage et de la vidange du chenal rendent le calcul d'un bilan global du solide hasardeux. D'autre part, nous observons des variations quotidiennes et saisonnières non négligeables bien que le phénomène global reste inchangé.

Nous avons toutefois estimé un ordre de grandeur de la quantité de solide, accumulée lors de marées au cours des mois d'octobre 1968 et de janvier 1969. Nous avons, pour cela, admis que le solide se déplace en première approximation à la même vitesse que l'eau. On peut alors calculer à tout moment le flux de solide au travers d'une section transversale unitaire. En intégrant ce flux sur une section transversale donnée pendant une marée complète, on peut estimer la quantité de solide qui s'est déposée au-delà de la section choisie.

Nous avons obtenu des valeurs d'accumulation de solide oscillant de 5 à 10 kg de matière sèche par mètre carré et par jour.

Malgré les imprécisions du calcul, ces valeurs sont comparables aux mesures d'envasement effectuées par forages et selon lesquelles l'accumulation se situait entre 3 et 10 kg de matière solide par mètre carré et par jour (voir fig. 2).

Les variations de salinité le long de l'estuaire de l'Escaut et la géométrie particulière des chenaux et des darses sont particulièrement favorables à l'apparition de courants de densité dans ceux-ci.

Grâce aux mesures effectuées tout au long de l'année 1968, nous avons pu montrer, d'une manière quantitative, la contribution des courants de densité à l'envasement de ces ouvrages et préciser le mécanisme de ce phénomène.

Il résulte tout d'abord de notre étude que le volume d'eau échangé à chaque marée par l'ouvrage avec le fleuve dépasse largement le volume d'eau nécessaire aux variations du niveau d'eau. Dans le cas du chenal d'accès à l'écluse de Zandvliet, nous avons pu estimer que l'eau de l'ouvrage était renouvelée complètement deux fois par marée. Ce volume représente six fois le volume de remplissage dû à la marée.

Les courants de densité sont d'autre part responsables de l'apparition de vitesses importantes. Celles-ci favorisent le transport du solide. Il est d'autant plus important que l'apparition du coin salé au flot coïncide avec les turbidités les plus élevées observées dans le fleuve.

Le solide ainsi introduit dans les ouvrages se trouve dans des circonstances favorables à la sédimentation, par suite de la salinité élevée et de la durée de séjour des couches d'eau pendant le jusant.

L'envasement calculé à partir des mesures de débit solide, dû aux courants de densité, est du même ordre de grandeur que celui relevé par les forages.

Si l'existence d'un seuil entre l'Escaut et le chenal d'accès peut jouer un rôle dans la stabilisation de l'épaisseur du dépôt, celui-ci n'intervient pas dans le mécanisme d'envasement du chenal d'accès.

Nos mesures indiquent que les dépôts de vase situés dans l'Escaut à hauteur de Zandvliet ne sont pas amenés dans le chenal d'accès par simple écoulement, comme le suggèrent certains sédimentologues.

Ainsi que nous l'avons montré, le solide pénètre dans le chenal d'accès principalement pendant une fraction déterminée de la marée et dans une tranche d'eau limitée située près du fond et épaisse d'environ 5 m. On peut espérer diminuer l'envasement en agissant sur cette couche par des ouvrages qui pourraient être étudiés sur modèle réduit.

