

LES COURANTS DE DENSITÉ ET LE PROJET DE L'ÉCLUSE DE MARDYCK A DUNKERQUE

PAR
G. RIBES * et C. BLANCHET **

Introduction

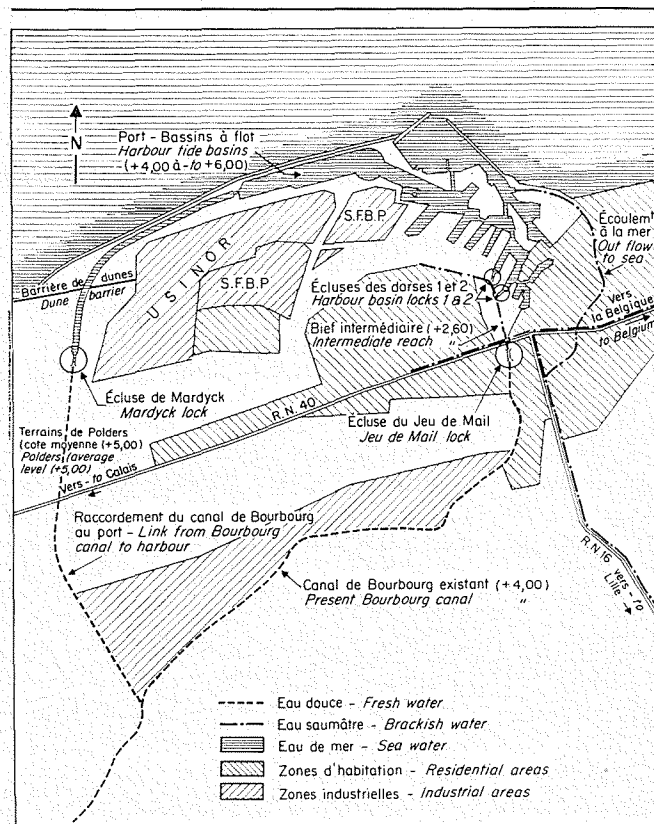
L'aboutissement au port de Dunkerque de la liaison fluviale à grand gabarit, Valenciennes-Dunkerque, exige la construction, sur 10,500 km de longueur, d'un nouveau canal avec écluse reliant le canal de Bourbourg en eau douce (niveau + 4) (*) à l'extrémité ouest du nouveau bassin à flot en eau de mer (niveau variable entre + 4 et + 6,50) (fig. 1).

Ce canal sera creusé comme le canal de Bourbourg dans les « Wateringues » à la cote + 5, qui sont de véritables polders, puisque les hautes mers atteignent la cote + 7,15.

Cette nouvelle liaison ne doit pas introduire d'eau salée dans le réseau fluvial au-delà d'une limite admissible par l'agriculture (1,5 g/l) et ne doit consommer que très peu d'eau douce (500 l/s en été et 1 m³/s en hiver), car les disponibilités actuelles, surtout en saison sèche, sont absorbées en grande partie par la réalimentation des nappes phréatiques et par l'industrie en forte extension.

La protection actuelle des wateringues, contre la salure, est assurée par les canaux d'eau douce à la cote + 4, qui agissent par alimentation ou drainage des nappes, et par des canaux de drainage qui abou-

tissent à un bief intermédiaire à la cote + 2,60 se vidangeant à basse mer.



1/ Plan de situation.
Site plan.

* Ingénieur des Ponts et Chaussées.

** Ingénieur à la SO.G.R.E.A.H.

(*) Toutes les cotes non rapportées au zéro des cartes marines, qui est à 3,35 m en dessous du zéro N.G.F.

Dans ce même but, la liaison fluviale existante avait été conçue, à la fin du siècle dernier, avec un système de double écluse de type classique, l'une, l'écluse du Jeu de Mail, reliant le bief d'eau douce à + 4 au bief intermédiaire d'eau saumâtre à + 2,60, et l'autre reliant ce dernier bief au bassin à flot (entre + 4 et + 6,50). Le bief intermédiaire est en eau saumâtre, car il reçoit les écluses d'eau douce côté canal et les écluses d'eau de mer, côté port.

Solutions envisagées

a) ECLUSE UNIQUE DU TYPE CLASSIQUE.

Le remplissage s'effectue en eau de mer à partir du port et la vidange s'effectue par pompage de la tranche d'eau de mer correspondant à la dénivellée. Cette solution trop sommaire situe l'importance des deux problèmes (perte d'eau douce et introduction de sel). Grâce au pompage de la tranche supérieure d'eau de mer, on évite l'introduction de 66 t de sel pour la dénivellée moyenne et de 140 t pour la dénivellée maximale. Mais l'ouverture des portes côté terre met en présence de l'eau de mer et de l'eau douce; un courant d'échange par densité s'établit. D'après une étude récente effectuée aux Pays-Bas (*Reduction of salt water intrusion through locks by pneumatic barriers*, by G. van den Burg) pour une ouverture des portes de 10 mn, le pourcentage de remplacement de l'eau de mer par de l'eau douce serait de 84 % du volume total (7 000 m³), soit 6 000 m³ d'eau douce qui, au remplissage, se mélangera à l'eau de mer et ira vers le port après l'ouverture des portes côté port, et 180 t de sel introduit du côté terre.

Cette solution n'est donc pas satisfaisante.

b) SOLUTION AVEC DOUBLE ÉCLUSE ENTRE BIEF INTERMÉDIAIRE BAS.

On peut penser que, si la dénivellée entre le bief d'eau douce et le bief intermédiaire en eau saumâtre est égale ou supérieure à la profondeur d'eau du canal d'eau douce, on évite l'échange par densité lorsque le sas est ouvert côté eau douce. Cela n'est qu'en partie exact, car cela suppose que l'eau douce est superposée sans mélange à l'eau saumâtre et que l'entrée ou la sortie des bateaux laisse immobile la tranche saumâtre, ce qui n'est pas le cas. Le bief d'eau saumâtre, plus bas que les marées basses ordinaires, devrait être vidé par pompage. Les deux écluses à fortes dénivellées sont coûteuses et ralentissent le trafic. Le graphique n° 2 indique la pénétration actuelle du sel dans le canal de Bourbourg par l'écluse du Jeu de Mail, à partir du bief intermédiaire d'eau saumâtre.

c) SOLUTION a) AMÉLIORÉE par les dispositifs étudiés aux Pays-Bas.

Un rideau d'air, placé entre le sas et les biefs, réduit le taux d'échange par densité; en appliquant les résultats des études de G. van den Burg, le taux devient 25 % au lieu de 84 %, soit encore 54 t de sel introduites côté terre et 1 800 m³ d'eau douce perdus, sans compter l'effet des bateaux. Or, le rideau d'air est incapable de s'opposer à l'effet de

pistonnage d'entrée et de sortie des bateaux, qui n'est pas pris en compte dans ces études.

Un deuxième dispositif complémentaire, constitué par une surprofondeur du canal côté terre, permet d'accumuler au fond du bassin ainsi constitué le courant de densité d'eau salée pendant la phase d'échange. On élimine ensuite par pompage l'eau salée ainsi accumulée. Ce dispositif peut donc résoudre le problème de l'introduction de sel, mais non celui de l'économie d'eau douce, car toute eau mélangée est perdue pour le côté terre. Il manque en plus un dispositif de récupération de l'eau douce introduite dans le sas par la sortie des bateaux.

d) AMÉLIORATION DE LA SOLUTION PRÉCÉDENTE c).

On peut stopper le coin salé (ou le coin d'eau douce côté port) par pompage de l'écoulement et rejet au fond du sas de manière à créer un circuit fermé. Si l'on ajoute à ce circuit la possibilité de faire varier par rejet le volume intéressé par ce circuit, on peut annuler l'effet de pistonnage des bateaux. Cette solution se révélait complexe, tout en exigeant de forts débits de pompage.

e) SOLUTION ADOPTÉE.

C'est ainsi qu'on fut amené à la solution suivante, qui fut adoptée.

Le principe en est le suivant : il fallait qu'avant l'ouverture des portes, côté port, le sas soit rempli totalement en eau de mer, et inversement, lorsque le sas serait ouvert côté terre, il soit rempli en eau douce. Pour cela, utilisant l'effet de différence de densité, qui permet de superposer l'eau douce à l'eau de mer avec une interface horizontale, on peut, par aspiration ou refoulement depuis le fond, introduire ou éliminer la tranche d'eau douce par l'intermédiaire d'orifices et d'aqueducs placés à bonne hauteur.

Description de la solution choisie

(fig. 3 et 4)

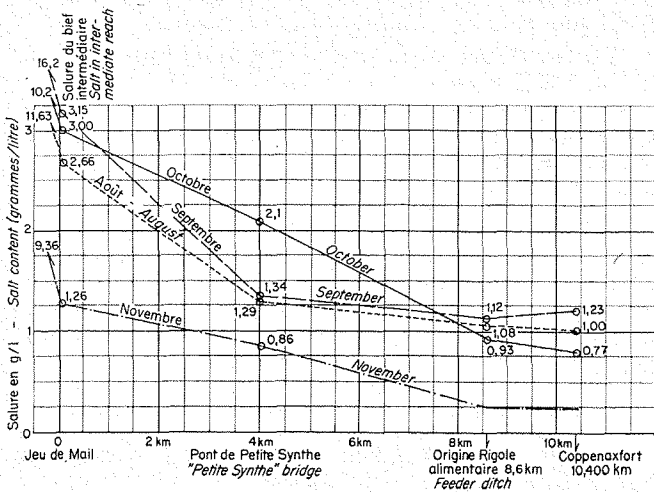
Le sas de l'écluse a 144,60 m de long, 12 m de large et 4 m de tirant d'eau. Ce grand sas peut être divisé par une porte intermédiaire en un petit sas et en un sas moyen. Il comporte un double circuit d'alimentation :

a) UN CIRCUIT DE REMPLISSAGE ET VIDANGE EN EAU DE MER, débouchant dans le sas par le fond perforé de nombreux trous et, de l'autre côté, dans le canal côté port. Une station de pompage avec vannes d'arrêt et by-pass permet de créer les écoulements dans un sens ou dans l'autre.

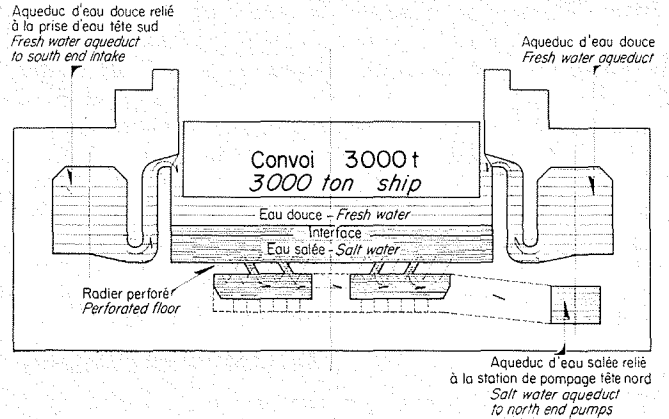
b) UN DOUBLE AQUEDUC D'EAU DOUCE, un de chaque côté, débouchant dans le sas par une série d'orifices à la cote (+ 4) environ et ouvert à l'autre extrémité sur le canal côté terre. Chaque aqueduc est équipé d'une vanne abaissante d'arrêt et d'une vanne pour la partition des sas.

Chaque opération de remplissage ou de vidange comporte deux phases avant ouverture des portes :

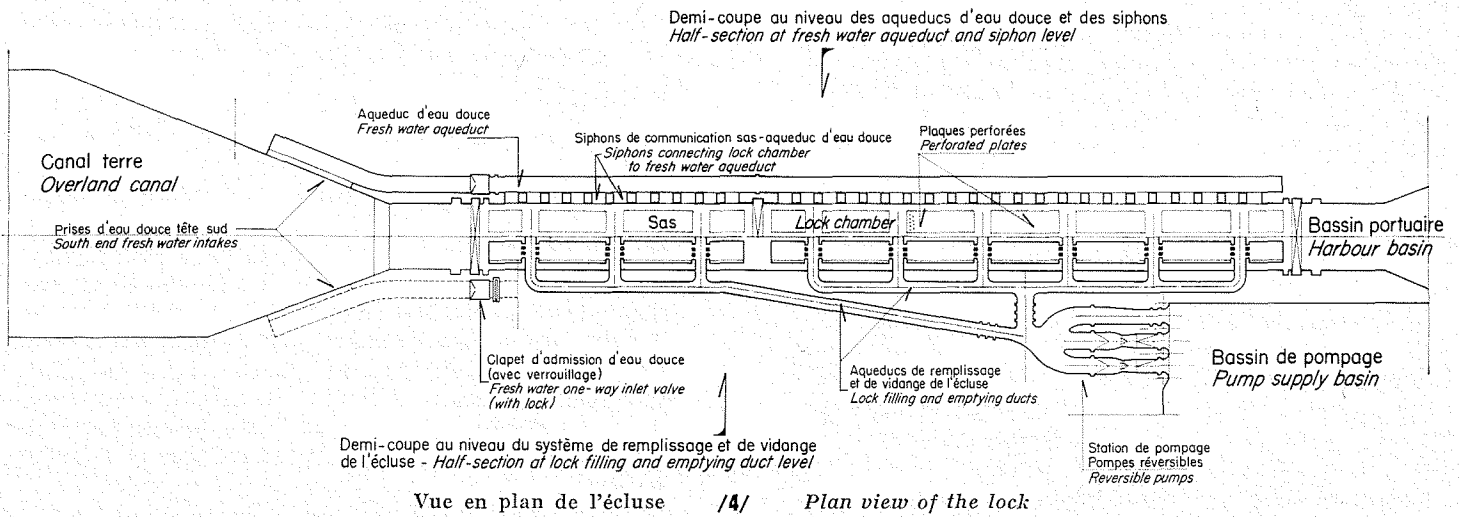
— Une phase d'échange d'eau à niveau pratiquement constant dans le sas (environ + 4), au



2/ Mesures de salinité dans le canal actuel de Bourbourg.
Measured salinity in the present Bourbourg canal.



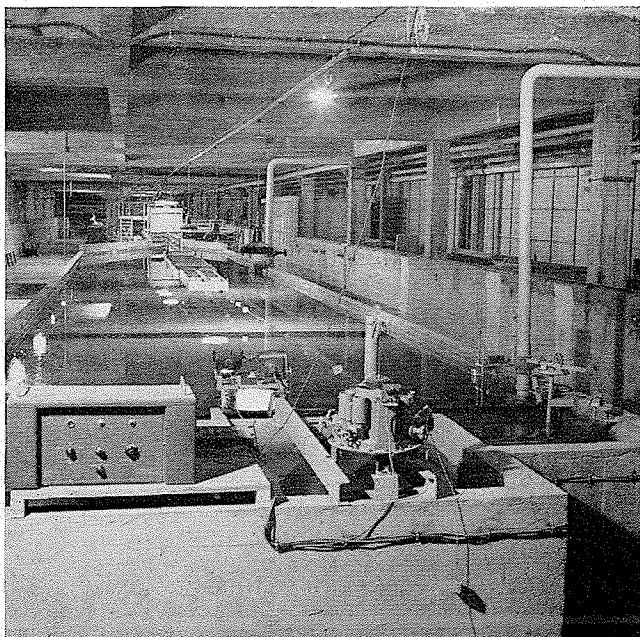
3/ Coupe en travers type de l'écluse.
Representative lock cross-section.



Demi-coupe au niveau des aqueducs d'eau douce et des siphons
Half-section at fresh water aqueduct and siphon level

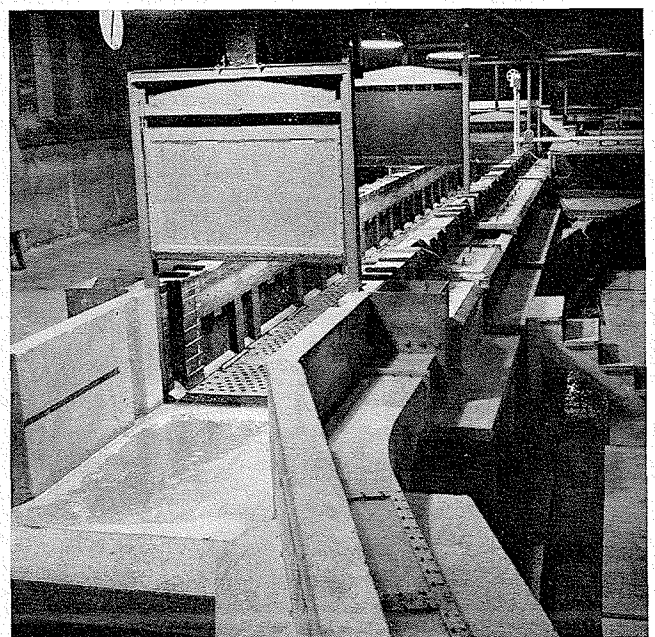
Demi-coupe au niveau du système de remplissage et de vidange de l'écluse
Half-section at lock filling and emptying duct level

Vue en plan de l'écluse /4/ Plan view of the lock



a/

Photographie du modèle



b/

Photographie du modèle

cours de laquelle l'eau salée étant refoulée ou aspirée par le fond, l'eau douce est chassée ou aspirée par les orifices et aqueducs d'eau douce ouverts;

- Une phase d'élévation ou abaissement de niveau, pendant laquelle le sas étant en eau de mer et les aqueducs d'eau douce fermés, on fait monter ou descendre le niveau comme dans une écluse ordinaire par gravité ou pompage d'eau salée;
- Cette disposition a été complétée par un bassin antisalure côté terre, pour arrêter les écoulements de fond encore susceptibles de se produire.

Mise au point de la solution

Cette mise au point a été conduite avec l'aide d'un modèle réduit à l'échelle 1/12,5 réalisé dans les laboratoires de la Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques (SO.GR.E.A.H.) (fig. 5).

Elle a comporté 4 phases :

a) SIMILITUDE ET CHOIX DE L'ÉCHELLE.

Le principe de la solution étant fondé sur la superposition et l'écoulement gravitaire de liquides de densités différentes dans les ouvrages de formes géométriques très accusées, la similitude de Froude devait être strictement respectée. Mais les défauts de ce principe résidant dans les mélanges par turbulence entre eau douce et eau salée, il fallait tenir compte des règles de similitude de Reynolds ou de celles qui en dérivent.

L'examen des très nombreux types d'écoulement que comporte ce type d'écluse et la comparaison avec des résultats d'expériences élémentaires connus, nous ont conduits à un modèle relativement grand (échelle 1/12,5). Un essai spécial de confirmation a consisté à comparer à l'échelle 1/1 et 1/10 les écoulements et mélanges obtenus par injection d'eau salée par un orifice de fond dans une cuve remplie préalablement d'eau douce. La concordance des observations fut satisfaisante.

b) RÉGLAGE DU MODÈLE.

Ce réglage avait pour but d'assurer une répartition régulière des eaux refoulées ou aspirées par le fond perforé de l'écluse et par les orifices et aqueducs d'eau douce. Ce réglage a été obtenu en jouant sur les pertes de charge et les dimensions et dispositions des conduites et orifices de répartition.

Au préalable, au cours de l'étude sur plan, on avait dans la mesure du possible équilibré les inerties hydrauliques de manière à ne pas gêner cette répartition en régime transitoire.

c) PHASE D'OBSERVATION.

Elle a consisté à repérer les causes et les lieux de mélanges et les pertes directes d'eau douce. Parmi les phénomènes les plus importants citons :

- le pistonnage des bateaux, qui se répercute profondément dans les aqueducs d'eau douce ou d'eau salée, obligeant ainsi à placer l'interface très à l'intérieur de ces ouvrages et pour cela à faire déboucher les orifices d'eau douce au

fond de l'aqueduc par siphon, de manière à changer l'eau des aqueducs;

- l'entonnement ou la sortie de l'eau douce côté terre;
- le calage en altitude des orifices d'eau douce, qui ne peut s'adapter parfaitement à l'inversion de la ligne de charge suivant que l'on refoule ou aspire l'eau douce;
- des pompages ou aspirations trop poussés;
- l'effet de la présence des bateaux.

Après modification partielle en fonction de ces observations (les modifications complexes n'étant faites qu'au stade du dessin définitif), on a procédé aux essais quantitatifs.

d) ESSAIS QUANTITATIFS.

Les paramètres des essais ont été les suivants :

Avec ou sans convoi; grand ou petit sas; vitesses de vidange ou de remplissage; niveau dans le port; hauteur de la prise d'eau douce; pompage continu ou non dans le bassin antisalure; surpompage dans le sas à la vidange.

Chaque essai consistait à faire cinq cycles de sassement avec ou sans aller-retour d'un convoi de 3 000 t, et à faire les bilans suivants :

- pertes directes d'eau douce;
- pertes d'eau douce par mélange accumulé par le bassin antisalure;
- tonnage de sel introduit dans le bassin antisalure;
- tonnage de sel pompé pour ramener la concentration dans ce bassin à 1,5 g/l;
- quantité d'eau douce perdue après cette opération.

En résumé, on peut dire que le poids de sel introduit dans le bassin antisalure dépend essentiellement de deux variables :

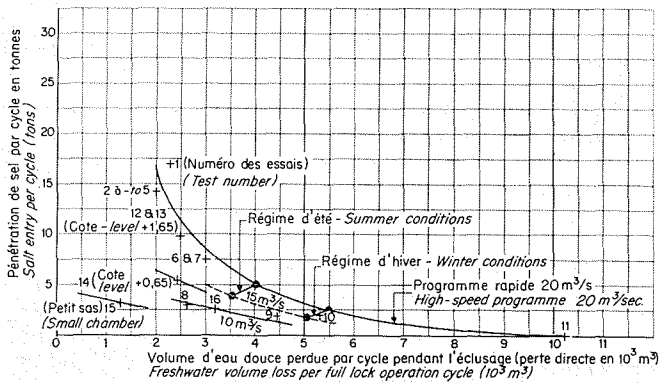
- la vitesse des opérations, c'est-à-dire le débit de remplissage ou de vidange du sas pendant la phase d'échange d'eau à niveau constant. Pour réduire les effets d'inertie les débits de régime doivent être atteints progressivement;
- le volume d'eau douce que l'on accepte de perdre en prolongeant le plan d'échange à la vidange ou au contraire en écourtant cette phase au remplissage.

L'ensemble des essais réalisés peut donc être groupé sur deux graphiques (fig. 6 et 7) :

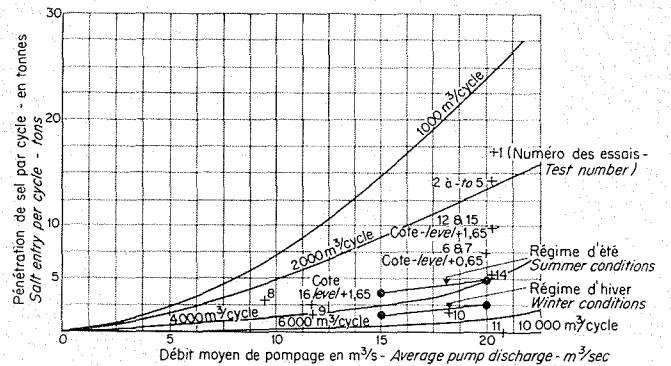
- relation entre le poids de sel introduit dans le bassin antisalure et la perte d'eau douce;
- relation entre le poids de sel introduit et le débit de pompage pendant la phase d'échange.

Compte tenu du volume d'eau disponible et de la durée maximale du cycle de double sassement, on a été conduit à retenir deux régimes de fonctionnement indiqués sur les graphiques :

- un régime d'été à économie maximale d'eau;
- un régime d'hiver profitant des disponibilités d'eau douce, ce qui donne une introduction de sel de 3 à 5 t par cycle en été et 1 à 3 t en hiver, chiffres très faibles par rapport aux autres solutions et par rapport à l'écluse actuelle du Jeu de Mail, qui peut introduire 16 t par écluse en été.



6/ Relation entre le poids de sel introduit dans le bassin antisalure et la perte en eau douce.
Relationship between weight of salt entering the salinity control basin and fresh water loss.



7/ Relation entre le poids de sel introduit et le débit de pompage pendant la phase d'échange.
Relationship between weight of salt entering the salinity control basin and pump discharge during the exchange phase.

Le bassin antisalure prévu, doit, dans la mesure où les hélices des bateaux ne créent pas d'agitations excessives, permettre d'éliminer la moitié du sel introduit.

Le modèle a permis d'établir les consignes des opérations. Il est, en effet, prévu un fonctionnement automatique des opérations hydrauliques, mais après une option préalable de l'écluseur lui permettant, selon le tonnage du convoi, la saison,

le temps disponible, de choisir la manœuvre la plus favorable.

Pour terminer, ajoutons qu'après une étude hydrogéologique approfondie de la région, on a déterminé l'importance de l'introduction d'eau salée par la nappe phréatique à partir de la branche en eau de mer du canal. La faible perméabilité moyenne du sous-sol de sable très fin et les dénivellées relativement faibles ont conduit à une infiltration peu importante.

Discussion

Président : M. Gougenheim

M. le Président remercie M. BLANCHET et constate que l'essai a permis d'établir un modèle qui paraît extrêmement satisfaisant, puisque la réduction du tonnage de sel entrant semble assez considérable. Il demande si l'on trouve des rendements comparables dans les écluses hollandaises.

M. BLANCHET croit que le problème est différent, car les Hollandais ont beaucoup d'eau douce; ils se préoccupent donc beaucoup moins de perdre de l'eau douce et beaucoup plus d'empêcher le sel d'entrer.

M. KOLKMAN dit qu'il y a, en Hollande, beaucoup d'anciennes écluses qui n'ont aucun dispositif particulier. On commence actuellement à installer des écrans d'air. Pour la nouvelle écluse de mer à Terneuzen, on a en plus prévu l'aspiration d'une grande partie du coin salé au moment où il entre dans le canal d'eau douce. Ce qui n'est pas aspiré tout de suite, sera recueilli dans un bassin antisalure, d'où on peut aspirer ou repomper à faible vitesse.

M. BLANCHET indique que, près de Dunkerque, on se préoccupe beaucoup de perdre le moins possible d'eau douce, car on se trouve dans une zone industrielle qui en a un besoin très grand.

M. KOLKMAN ajoute qu'en Hollande on économise de plus en plus l'eau douce et que l'on suit avec beaucoup d'intérêt la solution adoptée à Dunkerque, afin de pouvoir faire des comparaisons avec ce qui, jusqu'à présent, a été fait en Hollande.

M. STERLING dit que le procédé de repompage a été envisagé et est même en construction pour la nouvelle écluse de Zandvliet à Anvers: il s'agit d'une écluse 60 fois plus

grande que celle de Mardyck et les quantités de sel qui peuvent entrer se chiffrent par milliers de tonnes. On a prévu un bassin antisalure important, afin de pouvoir évacuer le sel à chaque marée basse. On doit pouvoir accumuler plusieurs éclusages dans le bassin et là, il serait impensable de repomper.

Dans le cas de Mardyck, ne peut-on pas évacuer l'eau salée par gravité au moment de la marée basse, comme cela est prévu à l'écluse de Zandvliet?

La distance élevée entre l'écluse et la mer est sans doute une des raisons de la nécessité de pompage de l'eau salée.

M. BLANCHET répond qu'effectivement la distance rendait cette évacuation par gravité très difficile.

En effet, elle ne pouvait être faite dans le bassin à flot, à niveau toujours plus haut. Pour déboucher dans la mer, il fallait traverser la plage et retrouver la basse mer qui se retire assez loin. Pour déboucher dans l'avant-port ou dans le bief intermédiaire, il fallait parcourir 4 à 5 km.

De toute manière, l'évacuation par gravité du bassin antisalure ne peut présenter d'intérêt que dans la solution d'écluse ordinaire où l'encaisse toute l'eau salée de l'écluse; les débits à évacuer sont alors très forts. Comme cette solution ne résoud pas le problème d'économie d'eau douce, elle ne peut être retenue. Avec la solution retenue le bassin antisalure ne reçoit qu'une faible portion de l'écluse, le débit à évacuer est faible et peut être repompé sans difficulté.

M. le Président remercie les auteurs de cette communication.