

# S. I - C. 2

---

## RAPPORT

par

**J. B. SCHIJF**

Ingénieur en chef du Laboratoire Hydraulique de Delft.

---

### 1. — INTRODUCTION ET APERÇU.

L'étude du problème de la protection des rives de cours d'eau, faite dans ce rapport, sera limitée au cas d'un bateau naviguant dans un canal relativement étroit.

Le risque que le fond et les talus du canal soient dégradés, est déterminé par le caractère et l'intensité des mouvements qui naissent de la navigation et qui, à leur tour, dépendent principalement du rapport entre la section mouillée du bateau et celle du canal, et de la vitesse de navigation. La forme du bateau joue également un rôle, ainsi que le mode de propulsion.

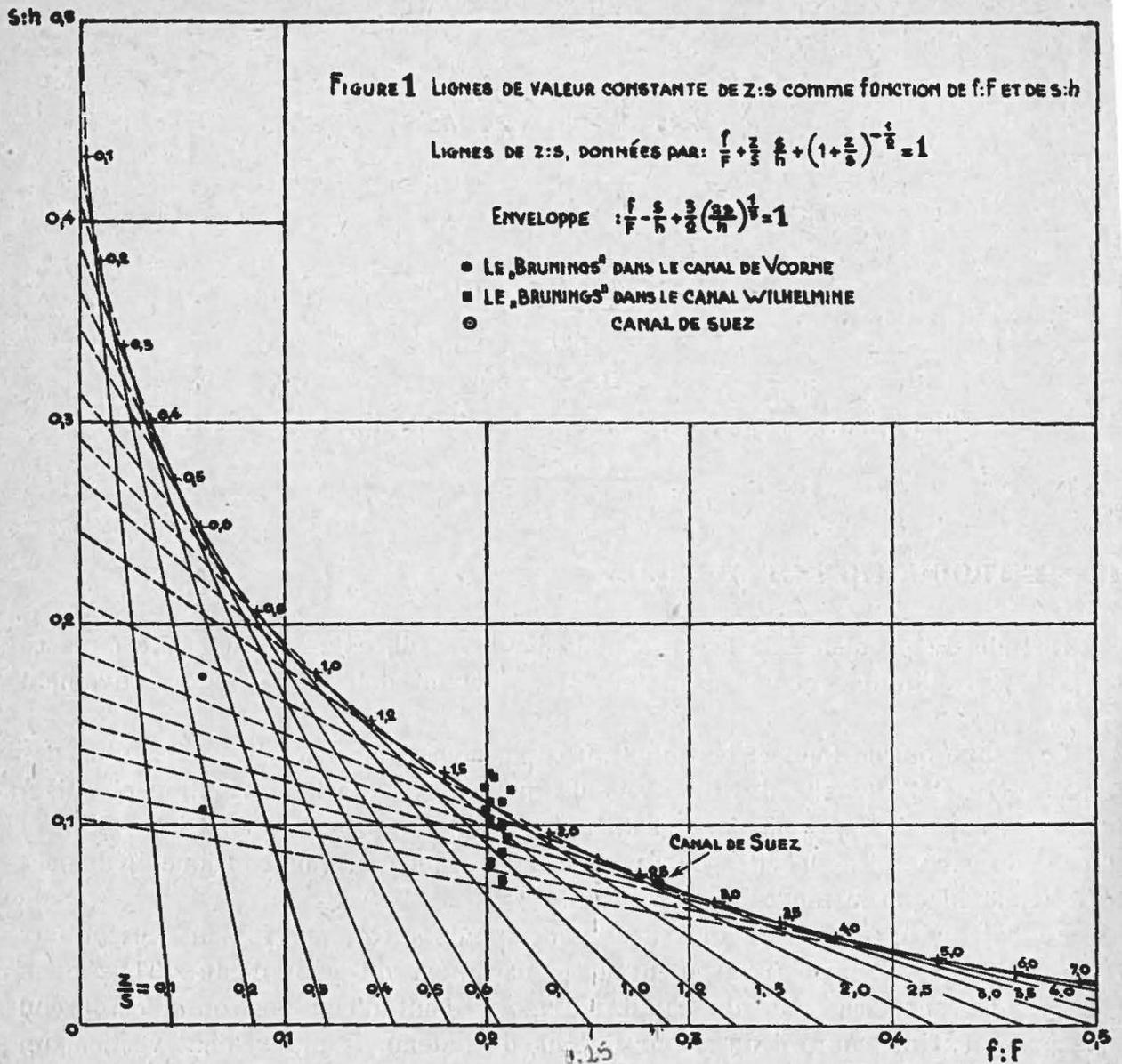
Le bateau naviguant produit des mouvements d'eau aussi bien horizontaux (courant) que verticaux (relèvement et abaissement du plan d'eau). Tous deux peuvent dégrader les talus du canal. Le mouvement d'eau horizontal comprend principalement un courant de retour le long du bateau, le mouvement vertical un abaissement du plan d'eau autour du bateau et un ensemble d'ondes qui accompagnent le bateau.

Aussi bien au sujet du courant de retour, qu'en ce qui concerne l'abaissement du niveau, un simple calcul d'approximation peut nous fournir quelques renseignements. C'est que la vitesse des bateaux dans un canal assez étroit est astreinte à une limite « naturelle ». Cette limite a été établie dans le § 2 et est représentée dans la figure 1. Sa signification a été discutée dans le § 3.

Près de cette limite, conformément à ce que l'on peut prévoir théoriquement, se produit un fort mouvement ondulatoire à l'arrière du bateau ou même une onde déferlante sur toute la largeur du canal. Ce phénomène a déjà été mentionné dans le rapport n° 31 du XVI<sup>e</sup> Congrès (Bruxelles 1935). Quand la propulsion se fait au moyen de la force de réaction de l'eau (hélice, roues, bateau-poussoir), la limite peut à peine être dépassée. Quand le bateau est halé par un remorqueur, le dépassement peut être plus grand et s'il est mû ou déplacé à l'aide d'une hélice-à-air ou d'une tuyère d'éjection, un dépassement considérable devient même physiquement possible.

Dans des cas pareils la résistance au mouvement augmente cependant tellement, que des raisons d'ordre économique imposent quand même une limite.

La limite déduite théoriquement a été confirmée lors d'essais de navigation sur des canaux néerlandais et dans le Laboratoire Hydraulique à Delft. Si le



bateau navigue à une vitesse plus petite que ne l'indique la limite naturelle, son abaissement est à peu près égal à la valeur calculée d'après la théorie d'approximation, à condition qu'il ne soit pas mû par son propre moyen de propulsion. Il s'abaisse plus profondément, surtout à l'arrière, quand il est propulsé par sa propre hélice. A la vitesse limite on a observé 1.4 fois la valeur calculée; pour des vitesses plus petites ce coefficient augmente encore.

Si les talus du canal peuvent supporter le mouvement d'eau produit par la navigation, l'abaissement du niveau est le facteur déterminant pour la vitesse maximum admissible.

Les talus sont composés de matériaux attaquables par l'érosion; la vitesse du courant de retour le long du bateau, éventuellement combinée avec un courant qui existe déjà sur le canal, détermine la vitesse admissible. La figure 3 donne cette vitesse. Si les talus du canal sont inclinés, les ondes produites par le bateau déferlent sur ce talus (rapport n° 39, XVI<sup>e</sup> Congrès). Au cas où les rives ne peuvent pas résister à ce déferlement, les talus doivent être réalisés verticalement jusqu'à une certaine profondeur. Il n'est pas possible de déduire cette profondeur exactement des données que l'on possède actuellement. Une ligne limite globale a été dessinée dans la figure 10.

Dans tous les cas la vitesse maximum dépend du rapport entre le maître couple du bateau et la coupe transversale du canal ( $f : F$ ). En général il n'est pas logique de fixer pour un canal la même limite pour tous les bateaux, les grands et les petits.

## 2. — DEDUCTION THEORIQUE APPROXIMATIVE.

Par rapport à un système de coordonnées qui se déplace avec le bateau, le mouvement d'eau peut être considéré comme permanent. Que l'eau non-troublée dorme ou coule, ne fait rien à l'affaire.

Pour simplifier l'étude, les hypothèses suivantes ont été faites :

1. Le bateau s'abaisse avec le plan d'eau;
2. Le courant de retour est uniformément distribué sur le profil du canal qui reste à côté du bateau;
3. Le frottement le long des talus du canal et sur la carène est négligé;
4. Les pertes de turbulence autour de la proue du bateau sont négligées.

En tenant compte de ces hypothèses, le théorème de de Bernoulli :

$$v^2 : 2g = (v + u)^2 : 2g - z \quad (1)$$

est applicable, ainsi que l'équation de continuité :

$$vF = (F - f - Bz) (v + u) \quad (2)$$

dans lesquels  $F$  représente le profil du canal,

- $f$  la surface du maître couple du bateau,
- $B$  la largeur du plan d'eau,
- $z$  l'abaissement du plan d'eau,
- $v$  la vitesse de l'eau non-troublée,
- $v + u$  la vitesse à côté du bateau.

(Pour un bateau naviguant dans de l'eau dormante,  $v$  est donc la vitesse du bateau et  $u$  celle du courant de retour.)

Dans ces deux équations se trouvent deux inconnues  $z$  et  $u$ . En éliminant une des deux, on obtient une relation dans laquelle on ne rencontre plus que l'autre. On trouve alors :

$$\frac{f}{F} + \frac{z}{s} \frac{s}{h} + \left(1 + \frac{z}{s}\right)^{-1/2} = 1 \quad (3)$$

et

$$\frac{f}{F} + \frac{s}{h} \left[ \left(1 + \frac{u^2}{v^2}\right) - 1 \right] + \left(1 + \frac{u}{v}\right)^{-1} = 1 \quad (4)$$

dans lesquelles  $h = F : B$ , la profondeur moyenne du canal, et  $s = v^2 : 2g$ .

Entre  $u : v$  et  $z : s$  existe la relation :

$$1 + \frac{u}{v} = \left(1 + \frac{z}{s}\right)^{1/2} \quad (5)$$

Les équations (3) et (4) peuvent aussi s'écrire :

$$\frac{f}{F} + \frac{z}{h} + \left(1 + \frac{z}{h} \frac{h}{s}\right)^{-1/2} = 1 \quad (3a)$$

et

$$\frac{f}{F} + \frac{s}{h} \left[ \left( 1 + \sqrt{\frac{s_u : h}{s : h}} \right)^2 - 1 \right] + \left( 1 + \sqrt{\frac{s_n : h}{s : h}} \right)^{-1} = 1 \quad (4a)$$

dans laquelle  $su = u^2 : 2g$ .

L'application de ces équations ou bien des équations (3) et (4) dépend de ce que l'on veut exprimer le rapport entre l'abaissement du niveau, respectivement le courant de retour, et la vitesse de navigation ou bien la profondeur du canal.

Dans l'équation (3)  $f : F$  ainsi que  $s : h$  sont linéaires, de sorte que dans un diagramme avec ces deux grandeurs comme coordonnées, des lignes de valeur constante de  $z : s$  se présentent comme des lignes droites. Celles-ci sont montrées dans la figure 1 dans le domaine limité par  $0 < f : F < 0,5$  et  $0 < s : h < 0,5$ , qui est le plus intéressant pour la pratique.

La figure représente un ensemble de lignes droites qui se coupent. Ces lignes possèdent une enveloppe qui est tangente aux axes quand  $f : F = 0$ ,  $s : h = 0,5$  et quand  $s : h = 0$ ,  $f : F = 1$ . L'enveloppe est donnée par la formule :

$$\frac{f}{F} - \frac{s}{h} + \frac{3}{2} \left( \frac{s}{h} \right)^{1/3} = 1 \quad (6)$$

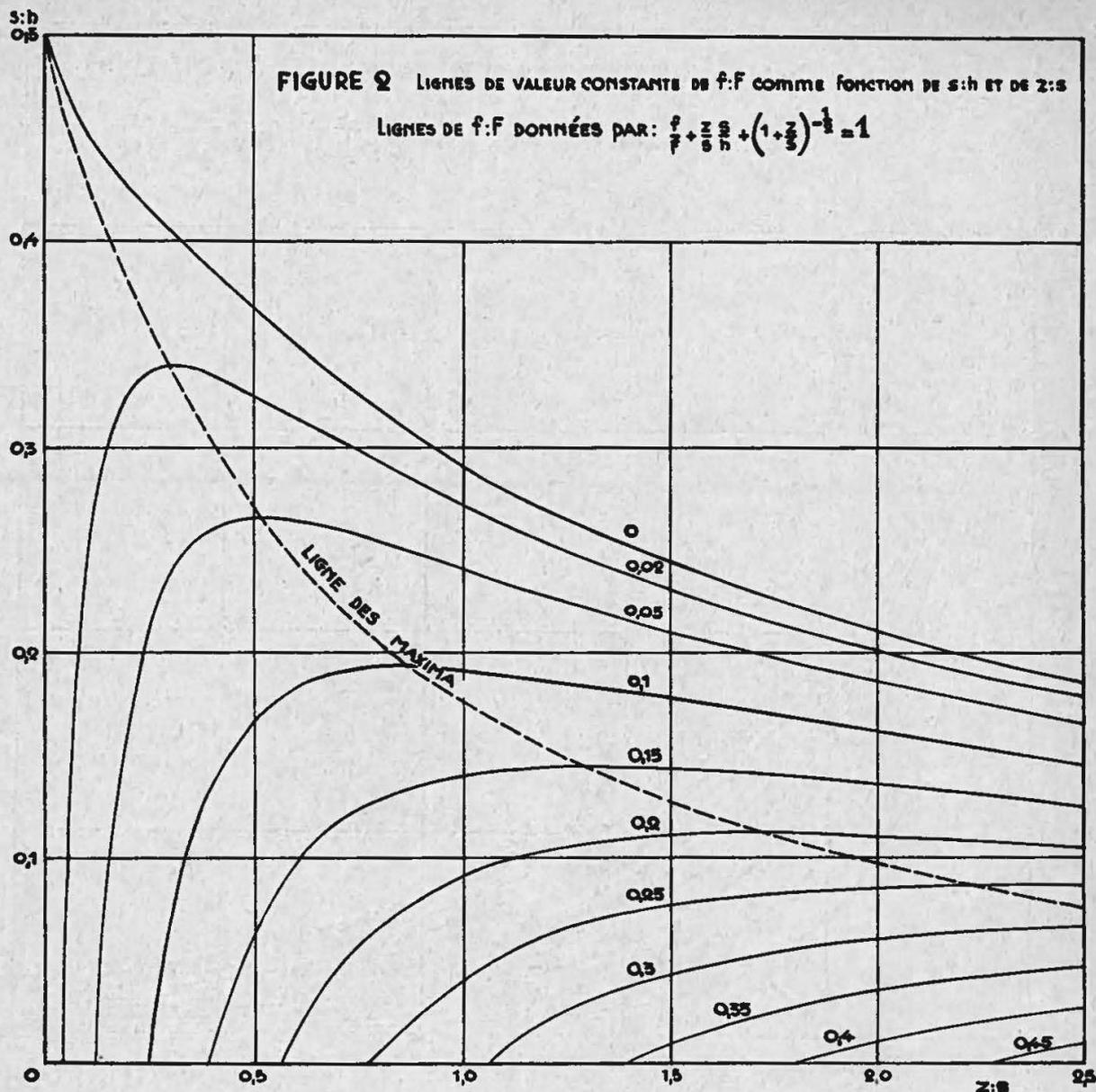
Le fait que les lignes, avec des valeurs égales de  $z : s$ , se coupent, signifie que les équations pour chaque combinaison de  $f : F$  et de  $s : h$  qui est à ranger sous l'enveloppe, donne deux valeurs de  $z : s$  (l'équation (3) étant du troisième degré en  $z : s$ , il y en a même trois, mais une des trois peut immédiatement être exclue comme physiquement impossible). Il ressortira de ce qui suit que seule une des deux valeurs restantes de  $z : z$  peut avoir une signification physique, à savoir la plus petite. Ceci signifie que seule la partie des lignes à partir de l'axe  $s : h = 0$  jusqu'à leur point de tangence avec l'enveloppe (la partie tracée dans la figure 1) est applicable.

On comprend cela, quand l'équation (3) est mise en graphique d'une autre manière, c'est-à-dire sous forme de lignes de valeur égale de  $f : F$ . Ceci a été fait dans la figure 2. Les lignes montrent un maximum, dont le lieu géométrique a la même signification que l'enveloppe de la figure 1. L'équation, à laquelle cette ligne des maxima répond, peut être réduite à l'équation (6).

Il en résulterait que, pour un rapport donné de  $f : F$ , le rapport  $s : h$ , par conséquent la vitesse  $v$ , ne peut dépasser une certaine valeur. Si elle était dépassée, alors la quantité d'eau refoulée latéralement par le bateau, donc le débit du courant de retour, deviendrait trop grande pour pouvoir passer par le profil rétréci par la présence du bateau et l'abaissement du plan d'eau. On peut constater ceci en différenciant par rapport à  $z$  le courant de retour total donné par l'équation (2), et en mettant le quotient différentiel égal à zéro.

Il s'agit ici d'une analogie du cas d'un débit maximum dans un profil rétréci, par exemple à cause de la présence d'une pile. Comme la figure 1 le montre, on arrive à cette situation, surtout dans le cas d'un canal étroit ( $f : F$  grand), longtemps avant que le bateau ait atteint la vitesse limite  $\sqrt{gh}$  du canal. Cette vitesse limite est caractérisée par la ligne  $s : h = 0,5$ .

Dans la figure 3 l'équation (4a) a été mise en graphique sous forme de lignes de valeur constante de  $su : h$ , par conséquent le rapport entre la hauteur-vitesse

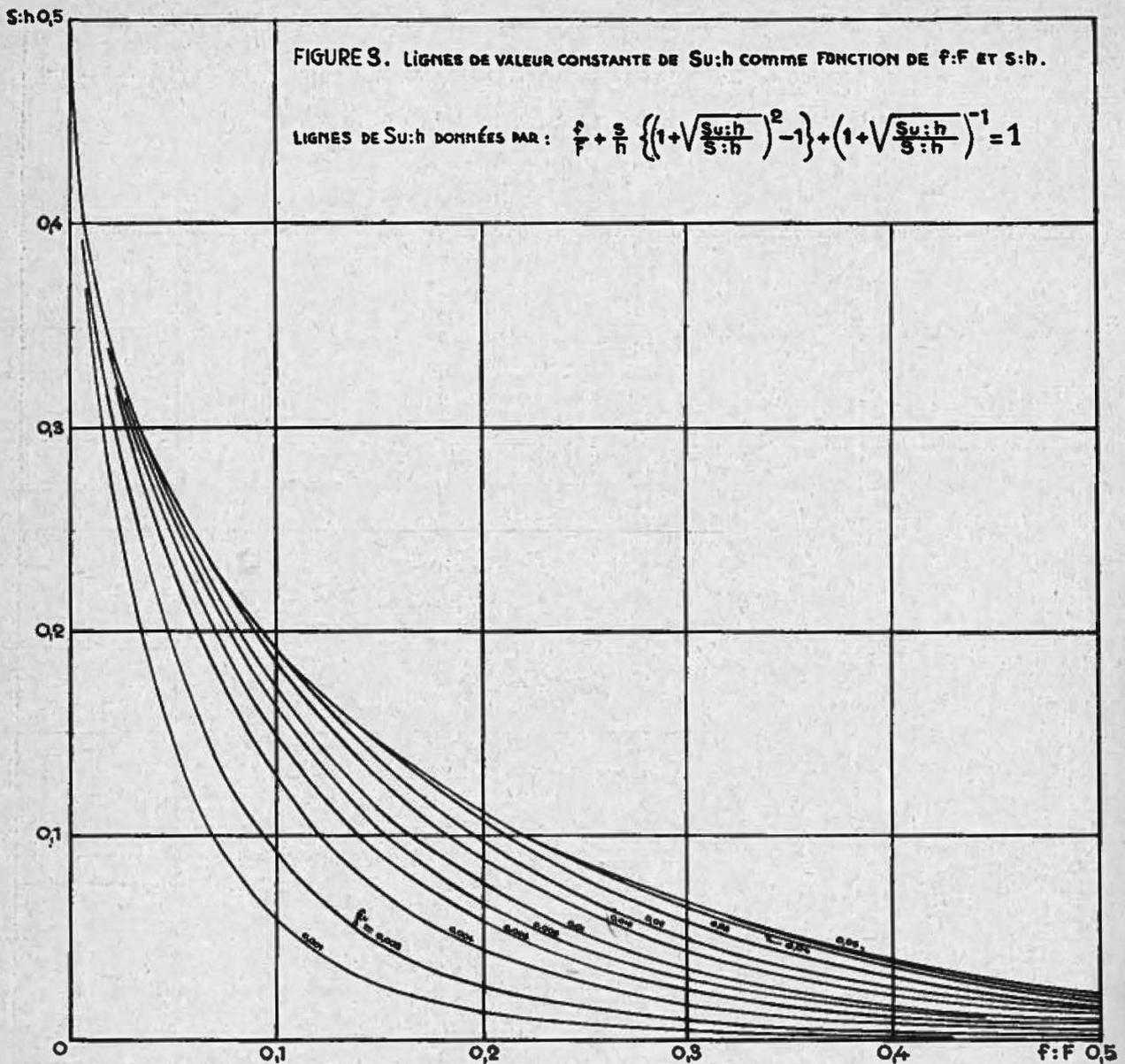


du courant de retour et la profondeur moyenne de l'eau. Ce diagramme donne la même enveloppe que la figure 1. Les courbes de  $s:h$  sont maintenant tangentes à cette ligne.

### 3. — SIGNIFICATION DE LA LIMITE DEDUITE.

Si l'on voulait majorer la vitesse du bateau au-dessus de la valeur critique en question, en d'autres mots si l'on se trouvait dans le domaine au-dessus de l'enveloppe dans la figure 1, le résultat serait que le niveau d'eau devant le bateau serait refoulé. Le profil  $F$  et la profondeur moyenne  $h$  deviendrait alors plus grands, de sorte que  $f:F$  et  $s:h$  diminueraient jusqu'à ce que la ligne enveloppante soit atteinte. Les équations développées dans le paragraphe précédent ne peuvent plus être appliquées alors telles quelles.

Si le bateau se déplace par sa propre force, l'augmentation de la vitesse au-dessus de la limite est à peine possible. L'ensemble des efforts exercés par le bateau sur l'eau est alors en équilibre. L'effort résultant qui agit sur l'eau est alors le frottement du courant de retour le long du fond, mais celui-ci est trop petit pour produire un refoulement d'importance. La signification de la limite



pour ce cas est donc, que la vitesse de navigation y relative peut à peine être dépassée. La majoration de la puissance de l'installation de propulsion a alors comme seul résultat une plus grande turbulence derrière le bateau, mais pas une augmentation notable de la vitesse. C'est également le cas quand le bateau est poussé par un remorqueur.

La question est différente pour un autre bateau tiré par un remorqueur. Dans ce cas également, si l'on considère tout le système, il n'y a que le frottement sur le fond par suite du courant de retour qui reste comme force résultante, mais il est bien possible qu'il se produise un relèvement du plan d'eau entre les deux bateaux. De cette façon il se peut donc que la limite (relative aux valeurs originales de  $F$  et  $h$ ) soit dépassée. Toutefois, cela va de pair avec une augmentation importante de la résistance, de sorte que dans ce cas également, un dépassement considérable dans la pratique est bien exclu.

Il en est encore autrement pour un bateau halé ou, plus généralement, quand la résistance n'est pas vaincue par une force de réaction sur l'eau (par exemple une hélice-à-air ou une tuyère d'éjection). Il se produit alors une impulsion sur l'eau par suite de la force de traînage, augmentée du frottement de fond. Ici aussi il est concevable, ne fut-ce de nouveau qu'au prix d'une résistance fortement augmentée, que la vitesse limite soit largement dépassée. Le refoulement

devant le bateau prend alors le caractère d'une onde de translation allant en avant du bateau, tandis qu'une onde de translation négative doit se produire derrière le bateau. Le bateau fonctionne alors comme piston dans le canal.

La limite donnée par l'enveloppe dans la figure 1 peut donc vraiment être considérée comme une limite naturelle, dont un dépassement un peu important n'est physiquement pas possible quand il s'agit de bateaux naviguant seuls.

#### 4. — LE MOUVEMENT D'ONDE A L'ARRIERE DU BATEAU.

Quand la vitesse de navigation d'un bateau, quelle que soit la façon dont il est propulsé, s'approche de la vitesse limite, le courant de retour prend le caractère du débit maximum. Alors la transition du niveau d'eau abaissé au niveau normal derrière le bateau, ne se fait plus régulièrement, mais montre des ondes plus ou moins fortes du même caractère que celles que l'on rencontre derrière un déversoir à la limite de son fonctionnement comme déversoir noyé ou déversoir dénoyé. On trouve quelques exemples de ceci dans les figures 4, 5, 6 et 7 qui se rapportent à un bateau à vapeur avec un rapport de profil ( $f : F$ ) de 0.2 et dans la figure 8 d'un bateau modèle remorqué avec  $f : F = 0.11$ . Dans la figure 6 les crêtes des ondes commencent à déferler, tandis que dans la figure 7 le déferlement n'est complet que le long des rives, où la profondeur est la plus petite. La figure 9 montre une onde déferlant sur toute la largeur, également produite par le bateau modèle remorqué. La vitesse limite est dépassée et il se produit donc du refoulement.

#### 5 — VERIFICATION PAR RAPPORT AUX OBSERVATIONS.

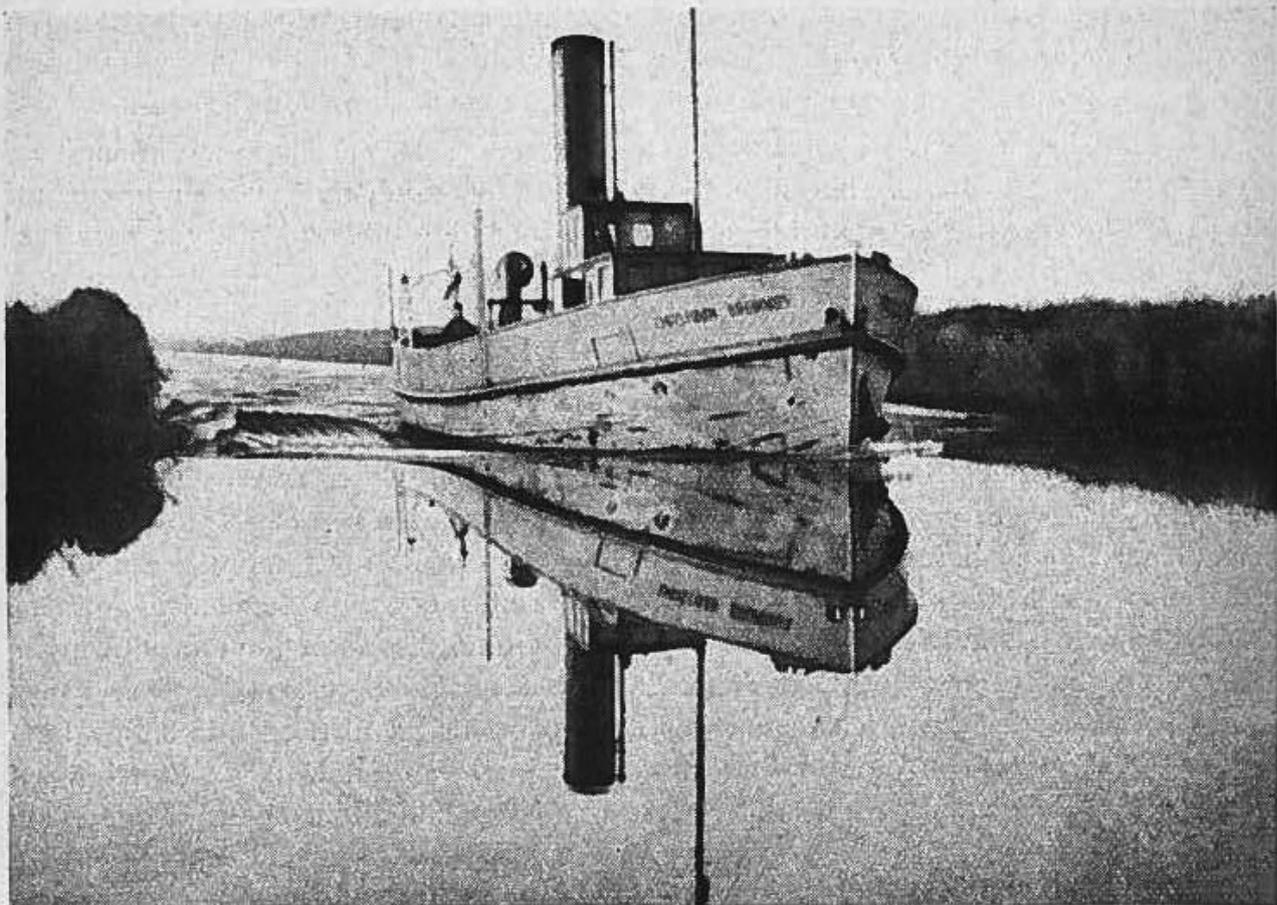
Comme il n'y avait que peu de temps disponible, le nombre d'observations recueillies est assez restreint. Il consiste en deux séries d'essais de laboratoire et en observations faites avec le bateau du Rijkswaterstaat, le Christiaan Brunings, sur le canal traversant l'île de Voorne et sur le canal Wilhelmina entre les écluses à sas II et III.

La première série d'essais de laboratoire a été faite avec un bateau modèle fixé dans une rigole à profil rectangulaire et à parois en verre. On pouvait disposer dans cette rigole d'un courant d'eau de profondeur et de vitesse variées.

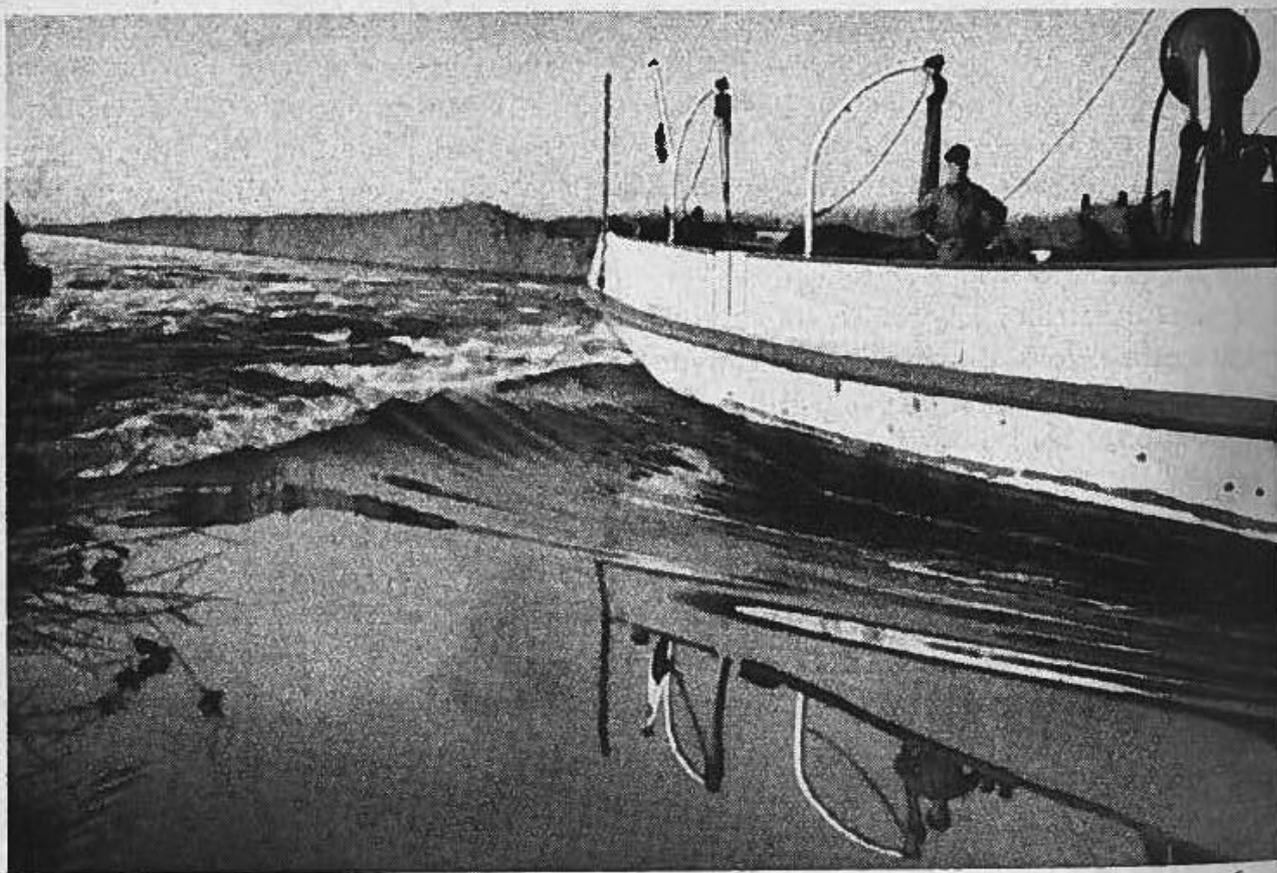
Le but des essais était surtout d'observer qualitativement le caractère des ondes et de contrôler la présence de la limite déduite dans le par. 2. Ils étaient satisfaisants à ce point de vue. La vitesse a été augmentée non seulement jusqu'au-dessus de la vitesse limite pour un débit maximum le long du bateau, mais même jusqu'au-dessus de la vitesse limite  $\sqrt{gh}$  dans la rigole. Il fut alors constaté, en conformité avec la théorie de ce cas, que le niveau d'eau de part et d'autre du bateau se relevait au lieu de s'abaisser.

A la deuxième série d'essais de laboratoire des bateaux modèles furent halés dans une rigole remplie d'eau, à l'aide d'un chariot. Les dimensions furent choisies telles, que les phénomènes dans un canal néerlandais de grandeur moyenne, furent représentés à l'échelle 20. Le rapport de profil varia de 0,1 à 0,25.

La rigole étant d'une longueur limitée, il fut difficile de faire des observations exactes. D'une part ceci rendait difficile d'éliminer la perturbation causée lors de



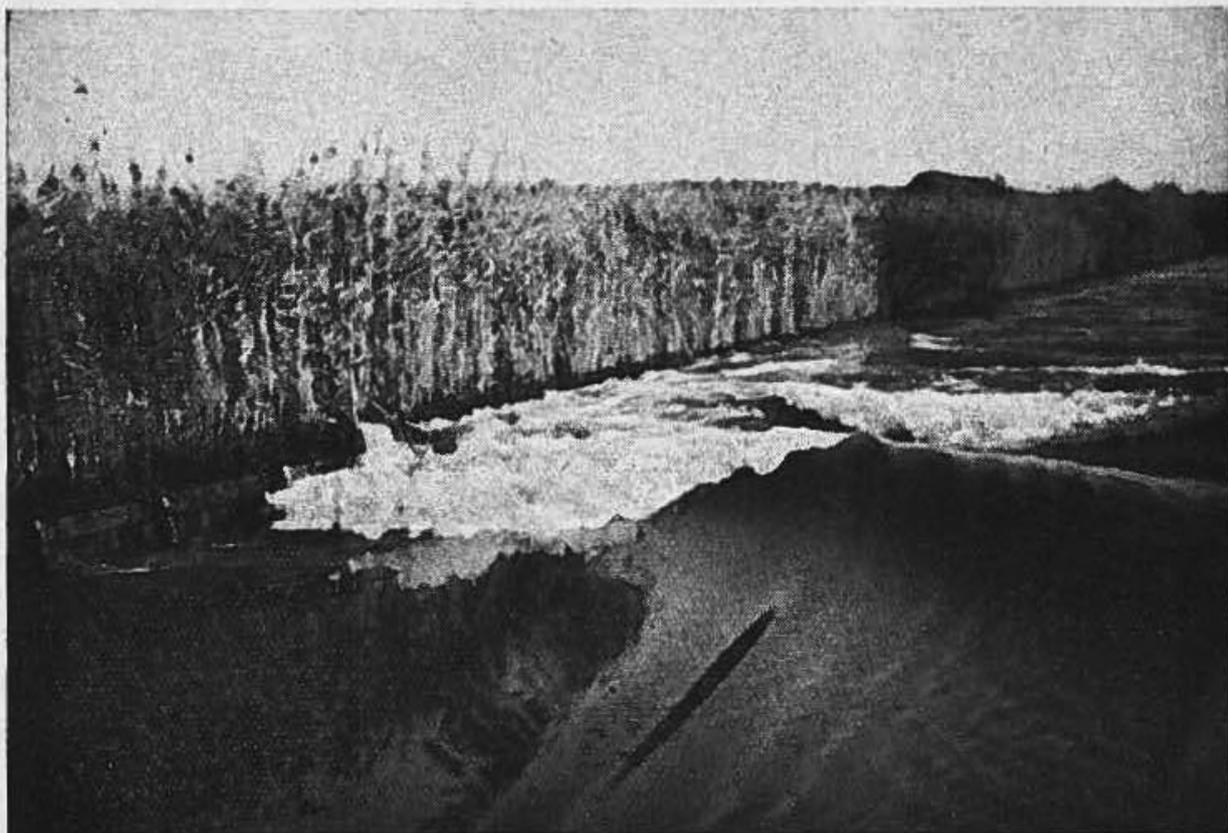
*Fig. 4. — Le « Brunings » sur le Canal Wilhelmina.*



*Fig. 5. — Onde d'arcasse du « Brunings » (cas limite).*



*Fig. 6. — Ondes d'arcasse recourbantes.*



*Fig. 7. — Déferlement de l'onde d'arcasse le long de la rive.*

la mise en mouvement du bateau, d'autre part la conséquence en était que l'ensemble des courants et des ondes pouvait à peine se développer — surtout à de plus grandes vitesses — avant que le chariot eût atteint le bout de la rigole. On réussit cependant à recueillir un certain nombre de mesures, relatives aussi bien à l'abaissement de l'eau qu'à la vitesse du courant de retour. Il parut en outre, en corcordance avec ce qui a été dit dans le par. 3, que le niveau d'eau devant le bateau fut refoulé quand une certaine vitesse fut dépassée. Il était difficile de déterminer où se trouvait exactement cette limite; on pouvait bien constater qu'elle se trouvait très près de la ligne enveloppante de la figure 1. Quand la limite fut dépassée, naquit aussi le fort mouvement ondulatoire visible sur la figure 8 et à une autre augmentation de la vitesse, l'onde déferlante de la figure 9 (1).

En général le bateau se trouvait, lors des essais, dans l'axe du canal. Lorsque ce n'était pas le cas, les phénomènes de déferlement se produisaient d'abord du côté où le bateau était le plus près de la rive.

Lors des observations avec le « Brunings », bateau à vapeur long de 30 m., large de 6 m. et d'un tirant d'eau de 1,90 m., le rapport de profil  $f : F$  dans le canal de Voorne était environ 0.06, alors que  $s : h$  pouvait être augmenté jusqu'à 0.175. La vitesse était alors de 3.9 m./sec. (14 km./h.). Il était impossible de l'augmenter davantage, parce qu'il devenait alors difficile de diriger le bateau. La vitesse limite ne fut donc pas atteinte ici.

Ceci était bien le cas dans le canal Wilhelmina. Là le rapport de profil était 0.20 jusqu'à 0.21. La plus grande vitesse que l'on pouvait atteindre était de 2.25 m./sec. (8.1 km./h.), ce qui correspond à  $s : h = 0.125$ . Ici la vitesse limite théorique a donc été dépassée légèrement. Les fissures 4, 5, 6 et 7 donnent une idée de l'ensemble des ondes qui se produisaient à côté et derrière la poupe du bateau. La figure 1 donne les points qui correspondent aux différents essais de pratique.

Comme il ressort de ce qui précède, la théorie approximative est confirmée de façon satisfaisante pour autant qu'il s'agisse de la présence et de la position de la limite naturelle. Cependant on rencontre de plus grandes difficultés quant à la grandeur de l'abaissement du niveau. Le contrôle en est rendu difficile par le fait que cette grandeur n'est pas partout la même. C'est pour cela que nous avons pris la descente de la poupe comme critère. Elle est toujours beaucoup plus grande que la descente de l'avant du bateau et peut être mesurée assez facilement et clairement,

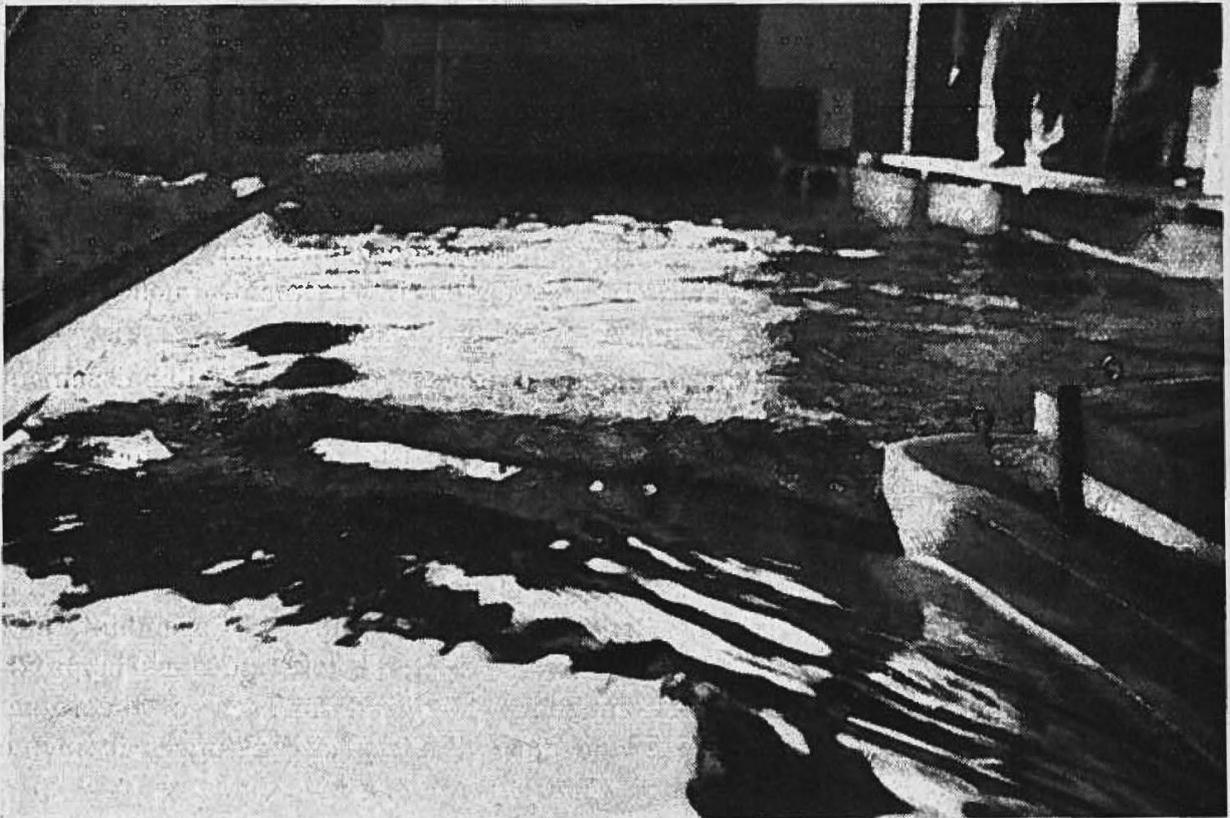
Une différence remarquable se produit entre les observations de laboratoire et celles faites dans la pratique. Alors que dans les premières, à quelques exceptions près, les abaissements de niveau (et de même les courants de retour) correspondent bien aux résultats de la formule (3) ou à la figure 1, un abaissement beaucoup plus grand que celui donné par le calcul a été mesuré dans la pratique et cela sans exception. Ceci se voit sur le tableau n° 1, dans lequel les résultats de toutes les mesures ont été comparés aux valeurs calculées d'après la figure 1 (tableau voir page 16). La différence est la plus grande à mesure que les circon-

---

(1) En comparant la figure-8 aux figures 5 et 6 on constate que l'écumme manque dans le modèle. La cause de la différence est la plus grande influence de la tension de surface dans le modèle qui, pour le reste, n'influence que très peu le phénomène.



*Fig. 8. — Onde d'arcasse d'un modèle de bateau (cas limite.)*



*Fig. 9. — Onde d'arcasse déferlante (limite largement dépassée).*

stances de l'observation se trouvent plus éloignées de la limite. Pour les points de mesure près de la limite (en grasse dans le tableau) le rapport entre l'abaissement mesuré et celui calculé diffère de 1,15 à 1,6 avec une moyenne de 1,4. A des vitesses plus petites, le rapport augmente et peut même monter à 3.

Comme il n'y a pas de raison d'attribuer la différence à un effet d'échelle, il est logique de penser à l'influence de la propulsion. On peut en effet se figurer que le mouvement d'eau produit par l'action de l'hélice augmente l'enfoncement du bateau. Ceci est un point qui sera à éclaircir par des essais complémentaires.

## 6. — RAISONS POUR RESTREINDRE LA VITESSE DE NAVIGATION.

A part le mouvement d'onde nuisible dans la proximité de la limite naturelle, représentée à la figure 1 par l'enveloppe, il y a encore deux autres causes de dégradation des talus de canaux, à savoir : la vitesse du courant de retour et le déferlement des ondes dans l'eau peu profonde le long de la rive.

Quant à la vitesse du courant, les critères pour la vitesse de navigation peuvent être déduits comme suit, à l'aide de la figure 3. Nous acceptons que la composition du fond et des talus et la nature du revêtement du canal mettent une certaine limite connue à la vitesse de courant  $u$ . On trouve alors la grandeur de  $s_u = u^2 : 2g$  et de  $s_u : h$ . La courbe  $y$  relative dans le diagramme donne pour chaque type de bateau avec une certaine surface de maître couple donnée (et par conséquent avec une certaine valeur de  $f : F$ ), une valeur de  $s : h$ . On en déduit  $s$  et la vitesse de navigation admissible  $v = \sqrt{2gs}$ . L'attention doit être attirée sur le fait que les valeurs de  $s_u : h$ , déduites théoriquement, sont probablement trop petites, surtout en cas de propulsion à hélice. L'étude ne tient pas compte non plus de l'action directe du courant d'hélice. Cependant, celui-ci n'érodera généralement le fond que localement et sera peu nuisible, à moins que le bateau ne se déplace près de la rive.

Pour le déferlement de l'onde contre la rive, un critère peut également être déduit. Il est évident que même de très petites ondes déferleront quand le talus au niveau d'eau est à pente faible. On peut prévenir ceci, comme d'ailleurs cela se fait souvent en Hollande, en construisant une paroi verticale d'une certaine hauteur (rapport n° 39, XVI<sup>e</sup> Congrès). Il s'agit alors de déterminer jusqu'à quelle profondeur cette paroi verticale doit être placée ou inversement, quelle vitesse de navigation peut être admise à une certaine profondeur.

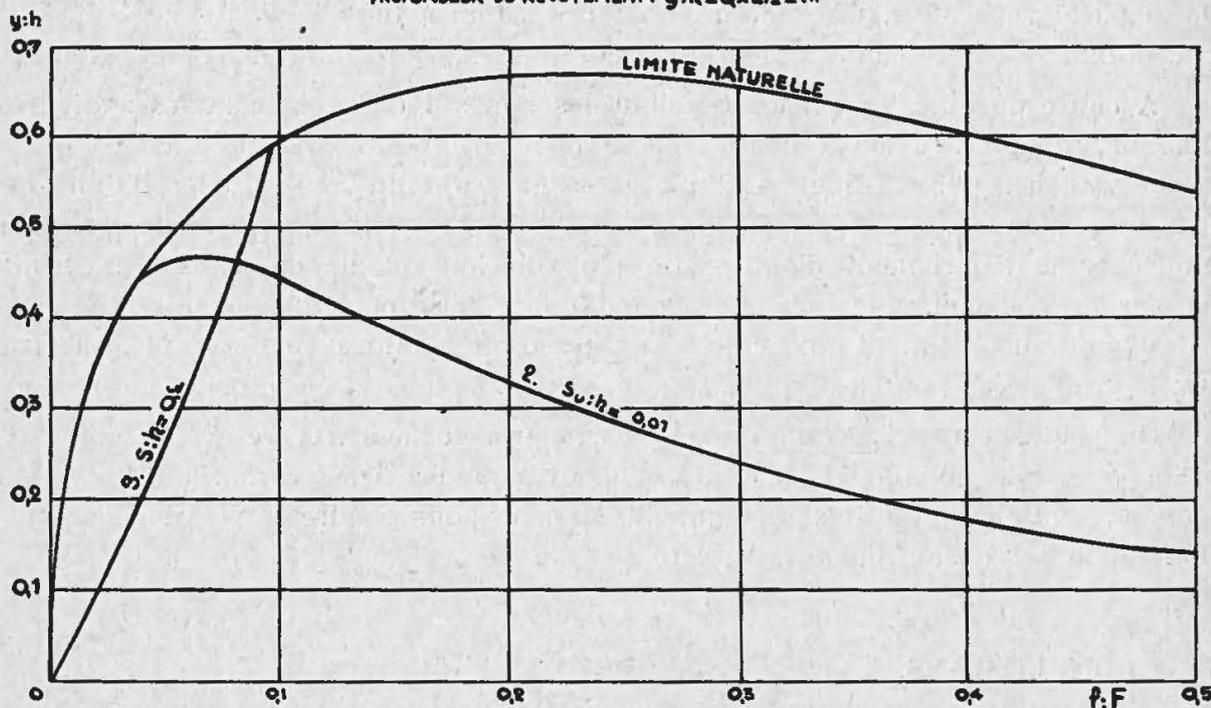
Si l'on accepte que la hauteur de l'onde d'arcasse est égale à l'abaissement de niveau  $z$  (comme Krey (1) l'a fait) et ensuite que l'onde ne déferlera pas aussi longtemps que la profondeur d'eau est supérieure à  $1 \frac{1}{2}$  fois la hauteur d'onde, alors la profondeur à la rive sous le niveau d'eau normal doit être  $y = z + 1 \frac{1}{2}z = 2 \frac{1}{2}z$ .

Considérons d'abord le cas où la vitesse de navigation n'est pas limitée. La valeur de  $z$  doit alors être tirée de l'enveloppe de la figure 1. Cependant, aux observations décrites dans le § 5 un abaissement réel fut constaté dans la proximité de la limite naturelle, qui est en moyenne 1,4 fois l'abaissement théorique. Bien qu'il ne soit pas du tout certain que dans d'autres circonstances le même

(1) H. Krey. Fahrt der Schiffe auf beschränktem Wasser. Schiffbau 1913.

rapport soit applicable, on peut commencer, en attendant des données plus précises, à l'appliquer provisoirement pour toute l'enveloppe. On trouverait alors :  $y = 1.4 \times 2\frac{1}{2}z = 3\frac{1}{2}z$ . En multipliant les valeurs de  $z : h$  pour l'enveloppe par  $3\frac{1}{2}$ , on peut donc obtenir  $y : h$  et de là la profondeur recherchée.

FIGURE 10. PROFONDEUR NECESSAIRE DU REVÊTEMENT VERTICAL  
PROFONDEUR DU REVÊTEMENT :  $y:h = Q \times 2\frac{1}{2} z:h$



Ceci a été détaillé dans la figure 10 (ligne 1), où  $y : h$  a été pointé comme fonction de  $f : F$ . La figure nous fait voir que même pour les canaux assez larges, la paroi verticale doit être prolongée jusqu'à une grande profondeur afin d'empêcher le déferlement. La ligne montre un maximum à  $f : F = 0.23$ . En cas de canaux encore plus étroits, la vitesse limite diminue tant, que par suite de cela la hauteur d'onde est restreinte.

Nous avons également examiné quelle profondeur serait nécessaire si la vitesse de navigation était limitée à cause de vitesses de courant trop grandes. Pour cela fut prise la ligne  $s_u : h = 0.01$  de la figure 3 (ceci signifie par exemple une vitesse de courant admise de 0.8 m./sec. dans un canal ayant une profondeur moyenne de 3,25 m.). On obtient alors la ligne 2 de la figure 10, qui montre que la plus grande profondeur est nécessaire (par conséquent que les ondes sont les plus grandes) pour une assez petite valeur de  $f : F$ , notamment de 0.06 à 0.07. C'est en effet presque toujours le cas, que le plus grand danger — que des ondes nuisibles se produisent le long de la rive — provient de petits bateaux qui se déplacent à grande allure.

D'après la ligne la paroi verticale devrait s'étendre jusqu'à presque la moitié de la profondeur moyenne (dans le canal choisi comme exemple jusqu'à plus de 1.5 m. sous le niveau d'eau moyen).

A la composition de la ligne 2 on a de nouveau tenu compte, autant que possible, de la différence entre l'abaissement du niveau d'eau mesuré et du niveau d'eau calculé.

Un travail analogue a été fait enfin pour le cas où la vitesse de navigation est également limitée pour tous les bateaux. Pour ceci on a pris  $s : h = 0.2$ , ce qui est une vitesse de 3.6 m./sec. (13 km./h.) dans le canal ayant une profondeur moyenne de 3.25. Cette restriction n'est importante que pour des bateaux où  $f : F$  est plus petit que 0.1 (voir figure 1), parce que des bateaux plus grands n'atteignent pas cette vitesse.

Le résultat est montré par la ligne 3 dans la figure 10. L'immersion nécessaire de la paroi verticale n'a pas diminué pour le canal à libre navigation, et n'a que peu diminué pour le canal à restriction de vitesse, pris comme deuxième exemple.

A cause de l'inclinaison assez faible des lignes 1 et 2 (et de lignes similaires obtenues d'un autre choix de la vitesse de courant admissible) la coupe de la partie gauche, par la fixation d'une vitesse maximum absolue, ne réduit que peu la profondeur jusqu'à laquelle un revêtement vertical doit s'étendre pour empêcher le déferlement d'ondes. En plus du fait qu'elle engendre un certain danger de collision, une telle vitesse maximum n'a donc que peu d'utilité. Seul est logique un règlement qui admet une vitesse plus petite pour de grands bateaux ( $f : F$  grand) que pour des petits, ce qui est très souvent déjà d'usage.

On peut encore faire remarquer que la paroi verticale, outre qu'elle doit posséder assez de solidité et de stabilité pour pouvoir résister aux ondes qui la longent, doit surtout être suffisamment étanche pour rendre impossible l'aspiration de la terre se trouvant derrière.

## 7 — CONCLUSIONS.

Tout compte fait, on a l'impression que la simple approximation du § 2 représente bien l'essence du phénomène. Le fait qu'une vitesse limite se produise près de l'enveloppe dessinée dans la figure 1, a été confirmé aussi bien par des mesures de laboratoire que par des observations sur des canaux réels. Des bateaux naviguant seuls peuvent à peine dépasser cette vitesse limite, ce qui est possible pour des bateaux remorqués ou halés, bien que ce soit au prix d'une augmentation importante de la résistance.

Quand la vitesse de navigation s'approche de cette limite, qui dépend du rapport entre le maître couple et le profil du canal, ainsi que de la profondeur moyenne du canal, il se produit à l'arrière du bateau un fort mouvement d'onde, qui peut facilement être accompagné de phénomènes de déferlement.

La situation exacte de la limite et la question de savoir de combien on peut s'en approcher sans courir de risque, ne pouvaient pas être déduites du petit nombre d'observations dont on disposait. C'est également au sujet de l'influence du mode de propulsion et de la forme du bateau que des recherches plus approfondies devront fournir de plus amples renseignements.

Entretiens le § 3 nous a appris qu'il est à peine nécessaire de tenir compte de la possibilité que la limite naturelle soit dépassée. En premier lieu il est physiquement impossible à des bateaux naviguant seuls (à part des bateaux pourvus d'une hélice-à-air ou d'une tuyère d'éjection) de se déplacer à une vitesse qui dépasse considérablement la vitesse limite. Mais ceci est également exclu dans la pratique pour des bateaux remorqués ou halés, parce que dans ce cas la résistance augmente trop.

Cependant, on ne pourra déjà admettre, en général, que la vitesse limite soit atteinte. Ce n'est le cas que lorsque les canaux sont creusés dans les rochers ou quand le revêtement des rives est très solide.

Sinon, il sera souvent nécessaire de prescrire une telle restriction de vitesse, que le courant de retour n'obtient pas une valeur inadmissible. Les lignes dans la figure 3 fournissent les données.

Enfin, il sera nécessaire que les talus du canal soient verticaux jusqu'à une profondeur qui se rapporte à l'abaissement du plan d'eau, à moins que le revêtement de la rive puisse supporter l'attaque des ondes déferlantes. Pour quelques cas cette profondeur a été donnée dans la figure 10. Si la profondeur au pied de la paroi verticale n'est pas suffisamment grande, une restriction supplémentaire de la vitesse sera nécessaire.

En général les petits bateaux peuvent naviguer plus vite que les grands, sans que le canal soit dégradé. On en tient déjà compte dans les règlements.

### 8. — EXEMPLES D'APPLICATION.

Comme illustration nous avons examiné pour un seul cas quels sont les résultats quand les considérations discutées ci-dessus sont appliquées. On a choisi pour cela un canal aux dimensions suivantes :

profil. ... .. F = 92.5 m<sup>2</sup>  
 profondeur moyenne. ... .. h = 2.5 m.

Les plus grands bateaux naviguant sur ce canal ont une surface de maître couple (f) de 22 m<sup>2</sup>; les bateaux à f = 13.5 m<sup>2</sup> sont aussi fréquents.

Pour le plus grand type on trouve f : F = 0.24. La limite naturelle pour ce type se trouve d'après l'enveloppe de la figure 1, à s : h = 0.09, c'est-à-dire à une vitesse de navigation v de 2.1 m./sec. ou de 7.6 km./h.

On doit cependant examiner la question de savoir si ceci est acceptable en vue de la vitesse du courant de retour. En mettant comme limite pour cette vitesse 0.7 m./sec., s<sub>u</sub> : h = 0.01. D'après la figure 3 la valeur de s : h, quand f : F = 0.24, ne peut alors être plus grande que 0.056, ce qui donne une vitesse admissible de 1.65 m./sec. ou de 6.0 km./h.

Pour empêcher que dans ce cas la rive ne soit dégradée par suite du déferlement de l'onde d'arcasse, un revêtement vertical peut servir, dont la profondeur y peut être déduite de la figure 10. Celle-ci donne à f : F = 0.24 et s<sub>u</sub> : h = 0.01, la valeur y : h = 0.3, donc y = 0.75 m.

Pour le type de bateau plus petit, à f = 13.5 m<sup>2</sup>, le rapport de profil f : F = 0.145. Pour la limite naturelle y relative on trouve s : h = 0.15, ce qui signifie une vitesse de 2.7 m./sec. ou de 9.8 km./h. Cependant, la restriction du courant de retour jusqu'à 0.7 m./sec. impose, également pour ce type de bateau, une plus petite limite, c'est-à-dire d'après la figure 3, s : h = 0.118. La vitesse devient alors 2.4 m./sec. ou 8.7 km./h.

Toutefois, d'après la figure 10, la valeur y : h pour ce cas-ci devrait s'élever à 0.4 et par conséquent la profondeur au pied du revêtement à 1 m. Si cette profondeur n'était qu'à 0.75 m., une plus grande diminution de la vitesse, jusqu'à 7 km./h. serait nécessaire.

Enfin on peut encore examiner quelles prescriptions doivent être faites pour de très petits bateaux, par exemple pour des bateaux à f = 1.2 m<sup>2</sup>, donc f : F = 0.013. La limite naturelle est atteinte ici pour s : h = 0.365, ce qui signifie

une vitesse de navigation de 4.25 m./sec. ou plus de 15 km./h., le courant de retour ne dépasse pas la limite de 0.7 m./sec. et d'après la figure 10 un revêtement jusqu'à 0.75 m. sous le plan d'eau ( $y : h = 0.3$ ) est suffisant.

Un autre exemple peut être emprunté au Canal de Suez. Si l'on accepte ici pour le profil normal une profondeur de 12 m., une largeur de 60 m. à une profondeur de 10 m. et des talus de 1/3, alors la surface  $F = 1008 \text{ m}^2$  et la profondeur moyenne  $h = 8.4 \text{ m}$ . On peut chercher à quelle vitesse un grand navire, avec par exemple une largeur de 95 ft (28.95 m.) et un tirant d'eau de 34 ft (10.36 m.), c'est-à-dire une surface de maître couple d'environ  $285 \text{ m}^2$ , pourrait marcher.

On obtient de ces données :  $f : F = 0.283$ . La vitesse limite donnée par l'enveloppe pour cette relation de profil va de pair avec  $s : h = 0.073$  et s'élève donc à  $3.47 \text{ m./sec.} = 12.5 \text{ km./h.} = 6 \frac{3}{4} \text{ mph}$ . L'abaissement du plan d'eau serait alors (d'après la figure 1), 1.6 m. et si l'on tient compte des résultats des mesures (influence de la propulsion) même  $1.4 \times 1.6 = 2.2 \text{ m}$ . Ceci est plus que la surprofondeur au tirant d'eau accepté ( $12 - 10.36 = 1.64 \text{ m}$ ).

Pour rendre possible la navigation de navires de ces dimensions à une vitesse supérieure, le canal devrait donc être agrandi, tout en augmentant surtout la profondeur au milieu pour empêcher que les bateaux ne touchent le fond du canal par suite de l'abaissement de leur arrière.

Ce rapport est basé sur des investigations qui ont été financées par le « Rijkswaterstaat », le « Waterloopkundig Laboratorium », le « Provinciale Waterstaat van Noord-Holland » et le « Provinciale Waterstaat van Zuid-Holland ».

Le travail théorique et expérimental a été fait par un grand nombre de personnes, dont les suivantes ont spécialement prêté leur concours : du Rijkswaterstaat : M. A. G. Maris, ingénieur en chef, directeur du Service Gelderland et M. le Dr J. J. Dronkers, mathématicien du Service Benedenrivieren; du Laboratoire : M. le Prof. J. Th. Thijsse, directeur et M. M. J. Bossen, ingénieur-conseil.

Tableau 1. Observations faites avec le « Brunings ».

N <sup>o</sup>	f : F	v (m/sec)	s : h	z (m)	z : s		mesuré théorie
					théorie	mesure	
1	0,06	3,05	0,108	0,25	0,20	0,53	2,6
2	0,06	3,9	0,175	0,38	0,25	0,49	1,95
3	0,210	1,94	0,095	0,40	1,2	2,1	1,75
4	0,202	2,05	0,102	0,47	1,2	2,2	1,82
5	0,200	2,23	0,120	0,58	1,7	2,3	1,35
6	0,200	2,12	0,108	0,60	1,4	2,62	1,88
7	0,204	2,25	0,125	0,64	1,7	2,48	1,45
8	0,202	1,82	0,081	0,47	0,95	2,78	2,92
9	0,212	2,13	0,118	0,47	1,75	2,02	1,15
10	0,208	1,98	0,100	0,49	1,3	2,45	1,88
11	0,202	2,25	0,126	0,71	1,7	2,75	1,62
12	0,207	1,68	0,072	0,25	0,9	1,75	1,95
13	0,207	1,85	0,087	0,49	1,05	2,82	2,7
14	0,202	2,14	0,113	0,63	1,7	2,72	1,6
15	0,207	2,10	0,112	0,54	1,75	2,4	1,38

La valeur de f est d'environ  $11 \text{ m}^2$ .

## SOMMAIRE.

	Page
1. Introduction et aperçu .....	1
2. Dédution théorique approximative .....	3
3. Signification de la limite déduite .....	5
4. Le mouvement d'onde à l'arrière du bateau .....	7
5. Vérification par rapport aux observations .....	7
6. Raisons pour restreindre la vitesse de navigation .....	10
7. Conclusions .....	13
8. Exemples d'application .....	15

## SUMMARY.

*In the present report the discussion of the problem concerning the protection of the embankments of navigation-canals will be restricted to the case of a ship moving in a comparatively narrow channel.*

*The risk of the bottom and slopes of the channel being eroded is determined by the nature and the intensity of the fluid-movements which are caused by the movement of the ship and which, in their turn, are chiefly dependent on the proportion of the midship-section of the ship to the cross-section of the channel, and on the velocity of the ship. The shape of its hull as well as the method of propulsion are factors also.*

*The movement of the ship causes both horizontal fluid-movements (currents) and vertical ones (rising and lowering of the water-level); both may erode the channel-walls. The horizontal fluid-movement consists mainly in a return-current along the ship, the vertical one in a lowering of the water-level round about it and in a wave-system accompanying it.*

*As regards the return-current as well as the lowering of the water-level some insight may be gained by means of a simple approximative calculation. It appears from this calculation that the velocity of ships moving in a comparatively narrow channel is tied to a « natural » limit, as indicated in fig. 1. Its definition is given in section 3. Near this limit there develops at the ship's stern (figs. 6, 8, 9), as was to be expected on theoretical grounds, a system of waves which is characterized by a continuous crest from bank to bank or even a breaking wave. This phenomenon has already been mentioned in report n° 31 of the XVIII Congress (Brussels, 1935). When the ship is propelled by means of the reaction of the water (propeller, paddles, another ship that pushes the original one), the limit can hardly be exceeded. The excess may be larger in the case of a ship towed by a tug; when the propelling force does not exert any reaction upon the water, i.e. when the ship is towed from a tow-path or propelled by means of an air-screw or by jet, the limit no longer exists.*

*In suchlike cases, however, the resistance to the movement increases to such an extent that the limit remains all the same, for reasons of economy.*

*The limit deduced theoretically has been demonstrated during experiments made in Netherlands canals and in the Hydraulic Laboratory at Delft. When the ship is propelled from outside and its velocity does not reach the « natural » limit, its settling roughly*

equals the value calculated on the ground of the approximative theory. When the ship is propelled by a propellor of its own it settles deeper, especially at the stern. At the limit  $1.4 \times$  the calculated value has been observed, at lower speeds even more.

If the channel-walls are proof against the fluid-movement caused by the movement of the ship, the highest speed admissible is determined by the settling.

If the walls consist of erodable material the admissible speed may be determined by the velocity of the return-current along the ship combined, if necessary, with a current which exists in the canal already. That speed is shown in fig. 3. In case the canal has sloping banks the waves generated by the ship break on those bank (report n° 39, XVIth Congress). If the banks are not proof against this, they have to be made vertical down to a certain depth. This depth cannot be determined exactly by means of the data at present available. An approximate limit is shown in fig. 10.

In all cases the maximum speed depends upon the proportion of the midship-section of the ship to the cross-section of the channel ( $f:F$ ). Generally speaking, it is illogical to fix one and the same limit for all ships, large as well as small ones, in one single canal.