

# Distances d'arrêt des grands navires en canal

Etude de l'extension du canal de Suez :  
essais sur modèle \*

**Jean Sommet**

Ingénieur Expert, Etudes Maritimes SOGREAH

**François Parthiot**

Ingénieur d'Etudes, Service Maritime SOGREAH

## Définition et importance du problème

Parmi de nombreux problèmes soulevés par l'extension du canal de Suez pour permettre le transit de navires de 150 000 à 200 000 dwt, l'un des plus importants consiste à définir les intervalles minimaux qui, à une vitesse donnée, doivent séparer deux navires successifs d'un convoi.

Il est bien évident que des intervalles serrés assurent, à vitesses égales, un débit plus important. Mais les impératifs de sécurité exigent que chaque navire du convoi, dans le cas où son matelot d'avant se trouve brusquement immobilisé par suite d'échouage sur la berge, puisse lui-même ralentir et casser son erre avant d'arriver au contact de celui-ci.

Ces principes sont valables quelle que soit l'organisation du trafic adoptée, que ce soit le système actuel de navigation en convoi, ou, à la limite, une navigation plus ou moins continue dans certaines parties du canal ou dans sa totalité.

Les règles fixent les intervalles non en distance, mais en temps de parcours  $T$  séparant deux navires consécutifs à la vitesse normale du convoi ; pratique judicieuse car lorsque la vitesse du convoi fluctue autour de la vitesse de consigne, ce qui se produit inévitablement au cours d'un transit, les créneaux entre navires augmentent avec celle-ci et vice-versa.

Les intervalles actuels sont ainsi de :

- 6 min. pour les cargos et autres navires de tonnage inférieur à 30 000 t
- 10 min. pour les pétroliers de moins de 45 000 t
- 20 min. pour les pétroliers de plus de 45 000 t.

Cette durée  $T$  de l'intervalle type doit prendre en compte des temps morts divers, mais elle est conditionnée essentiellement par la distance nécessaire pour

amener le navire de sa vitesse normale de transit à une vitesse pratiquement nulle par rapport aux berges.

Le terme "pratiquement nulle" demande à être précisé. Il est admis qu'à partir d'une vitesse résiduelle de 4 km/h environ, le navire a la possibilité de casser très rapidement son erre par les manœuvres suivantes, qu'il peut effectuer plus ou moins simultanément :

- mouillage d'une ancre à draguer (longueur de chaîne : 1,5 à 2 fois la profondeur),
- machine en arrière toute,
- accotage à la berge, le navire étant amené au contact du talus avec une obliquité aussi faible que possible,
- passage d'amarres sur les bollards à terre.

C'est donc en définitive cette distance brute d'arrêt, entre la vitesse de transit et 4 km/h, qu'il s'agissait de déterminer, pour différentes classes de navires envisagées dans les projets d'extension du canal.

Ceux-ci n'étant pas encore finalisés au moment de l'étude, deux phases d'extension ont été retenues, définies par les approfondissements et élargissements nécessaires pour assurer le transit de navires de 53' et 67' de tirants d'eau -- 16,15 m et 20,45 m -- soit de 160 000 t et 260 000 t de port en lourd environ.

## Méthodologie

L'expérience concernant les distances d'arrêt des navires réels en canal est très pauvre, et tout à fait inexistante en ce qui concerne les navires des dimensions considérées.

Des essais effectués en 1964 avec l'Esso Yorkshire, de 90 000 t pl., dans le canal de Suez, avaient conduit à des distances de l'ordre de 2000 à 2300 m, pour une vitesse de transit de 14 km/h. A défaut d'étude plus systématique, on ne sait pas extrapoler ces résultats à des tonnages supérieurs.

(\*) Avec l'aimable autorisation de l'Autorité du Canal de Suez.

Pour ces grands navires, des mesures ont été effectuées en pleine mer, notamment sur le Magdala, de 220 000 t par MM. Jourdain et Nizery de l'IRCN. Mais les problèmes de l'arrêt en mer au large et de l'arrêt en canal sont foncièrement différents non seulement parce que la résistance hydrodynamique à l'avancement est modifiée par l'existence d'une section limitée, mais surtout à cause des différences fondamentales dans la nature des manœuvres qu'il est possible de réaliser. Alors qu'en mer, la manœuvre s'effectue soit avec la barre immobile soit en s'efforçant de garder approximativement une route moyenne, il est nécessaire en canal de conserver rigoureusement le centrage du navire sur l'axe du canal, avec un cap peu écarté de cet axe : la manœuvre d'arrêt pose donc un problème de propulsion mais aussi un problème délicat de gouverne, les deux étant étroitement corrélés du fait des réactions très importantes des variations d'allure de l'hélice, en particulier du passage en marche arrière, sur la tenue de cap du navire.

Les grands navires concernés possèdent très généralement une seule hélice, dont l'effet évolutif, déjà sensible en eau profonde, se trouve multiplié ou combiné avec les effets dus à la faible profondeur et surtout à la proximité des talus de berges.

Ces contraintes de gouverne ont naturellement des incidences très importantes sur le processus de la manœuvre d'arrêt qui ne peut s'exécuter avec la même rapidité qu'en mer libre, et il en résulte que les distances nécessaires pour arrêter le navire sont très différentes.

En conclusion, il apparaît que l'étude des distances d'arrêt commence par la définition des procédures de manœuvre.

Etant donné donc, d'une part l'absence de données disponibles, d'autre part l'urgence du problème à résoudre, puisque sa réponse est une des données de base de l'étude du trafic, elle-même pierre angulaire de l'ensemble de l'étude d'extension du canal, l'Autorité du Canal de Suez a décidé de faire procéder à des essais sur modèle confiés à SOGREAH à Grenoble.

Ce sont l'exécution et les résultats de ces essais qui sont commentés ci-après.

## Moyens d'essais Programme d'exécution

La modélisation de la manœuvre d'arrêt pose un problème difficile dans la mesure où cette manœuvre met en cause, comme nous l'avons vu, un facteur humain très important constitué par l'intervention du pilote pour assurer la tenue de route du navire d'après ses seules observations visuelles.

L'expérience acquise par SOGREAH dans ce genre de simulation, notamment au centre de Revel, l'a conduit à proposer des essais avec une maquette conçue pour le pilotage avec pilote embarqué, les essais étant toutefois réalisés en laboratoire pour des raisons pratiques évidentes.

Une seule maquette de navire a été utilisée, représentant à deux échelles différentes, soit 1/39 et 1/44, des navires de 160 000 dwt et 260 000 dwt respectivement.

Les dimensions correspondantes sont indiquées dans le tableau ci-après :

| Dimensions          | Maquette           | Pétrolier<br>160 000 dwt | Pétrolier<br>260 000 dwt |
|---------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| Longueur (entre pp) | 7,62 m             | 297 m                    | 335 m                    |
| Largeur             | 1,18 m             | 46 m                     | 52 m                     |
| Tirant d'eau        | 0,420 m<br>0,464 m | 16,40 m<br>—             | —<br>20,40 m             |
| Déplacement total   |                    | 186 200 t                | 295 600 t                |

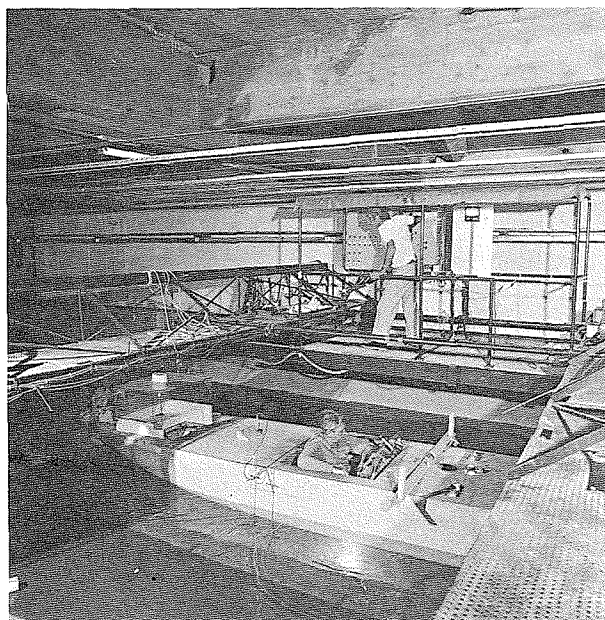


Figure 1

La fig. 1 représente cette maquette, mais en position "ballast", alors que tous les essais d'arrêt ont été réalisés avec navire "pleine charge".

La maquette était réglée en inertie de lacet autour de son centre de gravité, pour assurer la similitude correcte des manœuvres, l'assiette étant presque nulle, ce qui correspond aux conditions recommandées dans le canal.

Les temps de réponse de la barre et de la machine ont été reproduits à l'échelle, c'est-à-dire :

- la vitesse de rotation du safran multipliée par  $\sqrt{\lambda}$ , soit ici  $13^\circ/\text{s}$  modèle, pour  $2^\circ/\text{s}$  réel,
- les vitesses de montée et descente en allure de la machine (ou les temps), divisés par  $\sqrt{\lambda}$ , soit par exemple pour passer de "avant toute" à "arrière toute" : 20 s modèle pour 2 min. réel.

Les temps de réaction du pilote se trouvent ici légèrement réduits pour un pilote entraîné au modèle et concentrant son attention, quoique dans une proportion très inférieure à l'échelle ; mais ce temps de réaction reste bref par rapport aux temps de réponse ci-dessus et d'autre part on a été amené à le diminuer par la suppression du timonier, le pilote contrôlant directement la barre et la machine.

Un facteur naturellement important de la similitude de manœuvre réside dans la reproduction correcte de

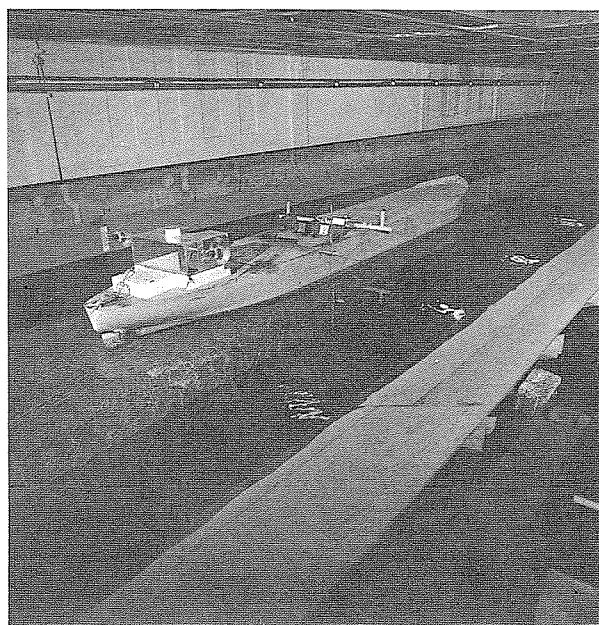


Figure 2

la relation vitesse rotation de l'hélice/poussée/vitesse.

La similitude de Froude n'assurant par une représentativité rigoureuse de cette relation, il a été nécessaire d'utiliser l'artifice connu d'une poussée additionnelle  $Pa$  précalculée à partir des coefficients de frottements réel et modèle (abaques de Schoenher), la difficulté résidant ici dans le fait que les vitesses sont en constante évolution entre la vitesse de transit et la vitesse nulle, de sorte que cette poussée doit être automatiquement et instantanément ajustée en fonction de cette vitesse par rapport à l'eau.

Pour obtenir ce résultat, la poussée  $Pa$  était fournie par deux ventilateurs contrarotatifs (visibles fig. 1) pilotés à partir d'une détection de  $V$  par courantomètre monté à bord de la maquette, et par l'intermédiaire d'un montage analogique permettant de représenter la loi précalculée :

$$Pa = 11,7 V^{1,75}$$

Un chariot indépendant de la maquette accompagnait celle-ci pour la mise en vitesse initiale (Fig. 2).

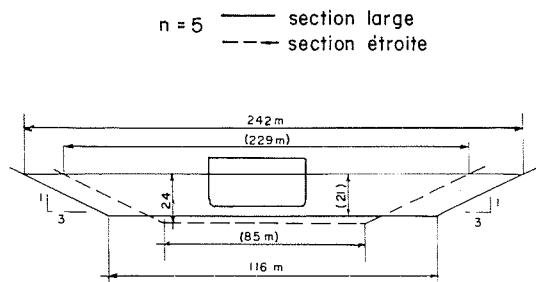
Pour reproduire l'histoire du mouvement à chaque transit, les paramètres suivants étaient enregistrés : angle de barre, vitesse de rotation de l'hélice, ordres du pilote, position et cap du navire par magnétoscopie, la caméra de prise de vue étant portée par le navire, en son centre de gravité, une grille de référence matérialisée au plafond du local.

Le bassin avait une longueur hors tout de 90 m, avec une base de mesure de 70 m, soit à l'échelle environ 2800 m.

Etant données les longueurs d'arrêt nécessaires, il était nécessaire de diviser la manœuvre d'arrêt en deux phases, avec un recouvrement suffisant entre les deux permettant leur raccordement.

Le canal de Suez y était reproduit aux deux échelles de 1/39 et 1/44 correspondant aux deux navires représentés, et caractérisés par :

Profil du canal pour un navire de 160.000t



Profil du canal pour un navire de 260.000t

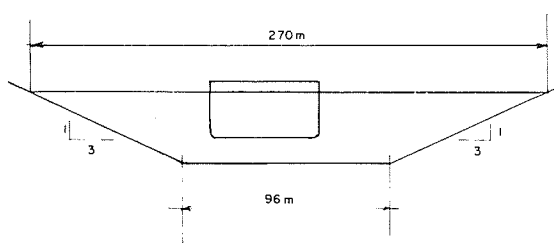


Figure 3 - Extension du canal de Suez

- des pentes de berge 3/1
- des rapports de section :

$$n = \frac{S}{s} \text{ section du canal/maître couple du navire}$$

- différentes profondeurs relatives, caractérisées par :

$$p = \frac{c}{H} \text{ clair sous quille/profondeur du canal}$$

- différentes largeurs, caractérisées par un facteur d'aisance :

$$r = \frac{1}{B} \frac{\text{largeur du canal au niveau de la quille}}{\text{largeur du navire}}$$

La figure 3 représente deux profils correspondant à  $n = 5$  pour le projet 160 000 t ; et un profil pour le projet 260 000 t.

Les cas suivants ont fait l'objet des essais :

| Navire 160 000 t |     |     |      |     | Navire 260 000 t |     |      |      |      |
|------------------|-----|-----|------|-----|------------------|-----|------|------|------|
| Profil canal     | n   | c m | p    | r   | Profil canal     | n   | c m  | p    | r    |
| a                | 4   | 4,2 | 0,20 | 2,4 | A'               | 4   | 4,45 | 0,22 | 2,36 |
| b                | 4,5 | 5,9 | 0,36 | 2,6 | B'               | 4,5 | 6,56 | 0,32 | 2,60 |
| c                |     | 3,1 | 0,19 | 2,9 | B''              | 5   | 4,35 | 0,21 | 3,03 |
| d                | 5   | 7,6 | 0,46 | 2,8 |                  |     |      |      |      |
| e                |     | 4,6 | 0,28 | 3,1 |                  |     |      |      |      |
| g                | 6   | 7,7 | 0,47 | 3,5 | D'               | 6   | 8,56 | 0,42 | 2,84 |

Dans chaque cas, plusieurs vitesses de transit initiales ont été utilisées, échelonnées entre 15 et 9 km/h.

Enfin chaque cas a donné lieu à au moins trois transits pour tenir compte des facteurs aléatoires inhérents à ce genre d'essais.

## Résultats

### Procédure d'arrêt

La recherche d'une procédure d'arrêt efficace et sûre a fait l'objet d'une première série d'essais. Les résultats confirment les observations faites autrefois sur le canal.

Le navire étant à sa vitesse de transit, tout ralentissement brutal entraîne une déstabilisation de son cap, du fait que le système de vagues important qui l'accompagne rattrape celui-ci par l'arrière. Il s'ensuit une diminution de l'efficacité du gouvernail et, pour le pilote, une grande difficulté à maintenir une bonne tenue de route, de sorte que le navire a toutes chances de venir au contact de la berge à une vitesse élevée.

En conséquence, pour garder le contrôle du navire, la machine ne doit pas être stoppée immédiatement, et encore moins mise en marche arrière ; mais sa vitesse doit être réduite de façon très progressive.

Pour les rapports de section étudiés -  $n = 4,5$  à  $6$  - la procédure d'arrêt ne doit pas être démarrée avant que le navire ait été centré exactement dans l'axe du canal, son cap ne déviant que faiblement de l'axe de navigation.

Alors seulement, la vitesse peut être diminuée de 25 % environ de sa vitesse de route ; le pilote maintient

ou ramène le navire sur l'axe. Il peut ensuite réduire graduellement la vitesse de 10 en 10 % environ tous les 500 m.

Une remarque importante est que, au cours de ce ralentissement, la déviation du cap ne doit pas dépasser  $5^\circ$ , sinon le navire se décentre rapidement et les effets de suction des berges augmentent très vite.

Au-dessous de 9 à 8 km/h, la machine peut être stoppée.

Toutefois dans cette dernière phase de l'arrêt, le navire étant très peu manœuvrant, il est nécessaire d'employer de grands angles de barre et de relancer la machine en avant dans de brefs intervalles par à-coups pour profiter d'effets de "coup de fouet" sur le gouvernail.

Enfin à 4 km/h, le navire échappe à tout contrôle, et la machine est mise en "arrière toute" pour assurer l'arrêt, le navire approchant une berge en position plus ou moins oblique.

Cette procédure de manœuvre est illustrée par la figure 4 qui met en évidence :

- l'augmentation des angles de barre et de leur durée, au fur et à mesure que la vitesse diminue,
- la loi progressive de décroissance des vitesses de rotation de l'hélice pendant la 1<sup>ère</sup> phase de freinage.

Les fig. 5 et 6 qui donnent la loi de décroissance de la vitesse en fonction du temps font apparaître une décélération sensiblement constante de :

- pour le 160 000 t :

$$\frac{\Delta V}{t} = \text{-- } 0,40 \text{ km/h/min ou -- } 0,0019 \text{ m/s}^2$$

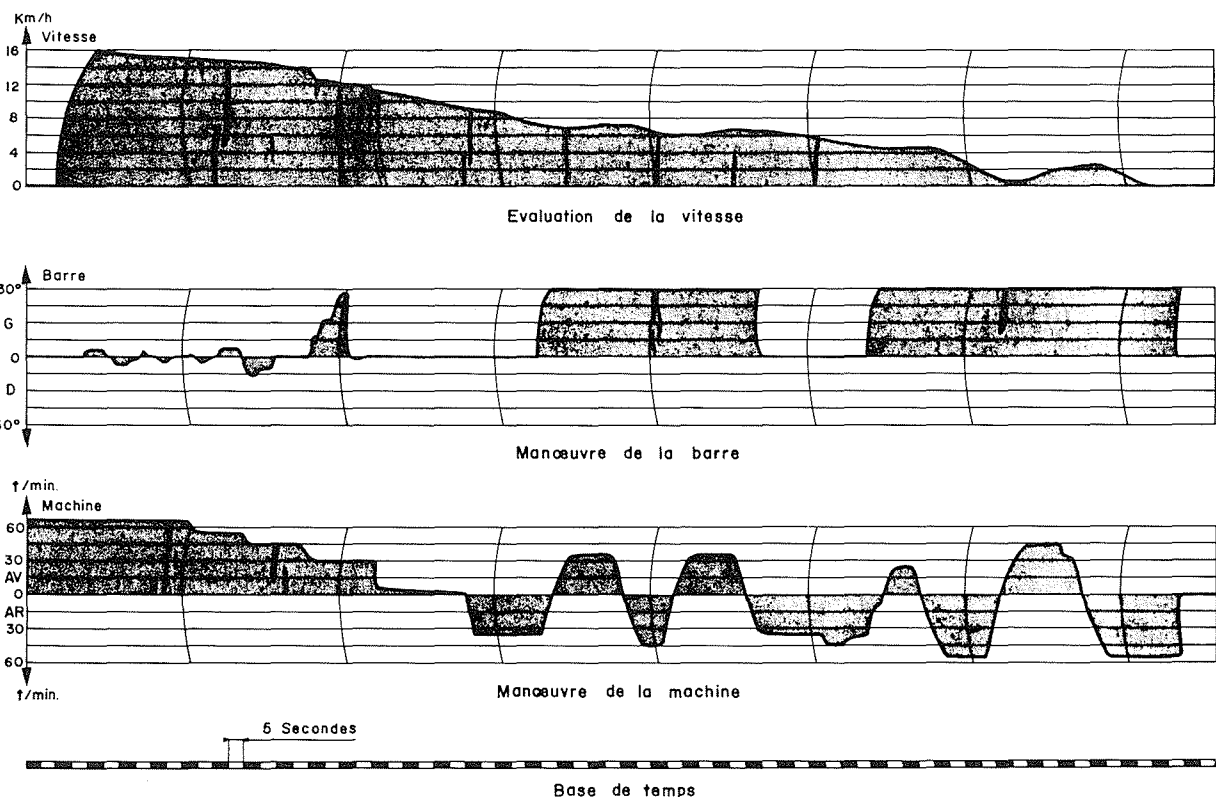


Figure 4 - Manœuvre type d'arrêt. Canal de Suez - Navire 260 000 t.

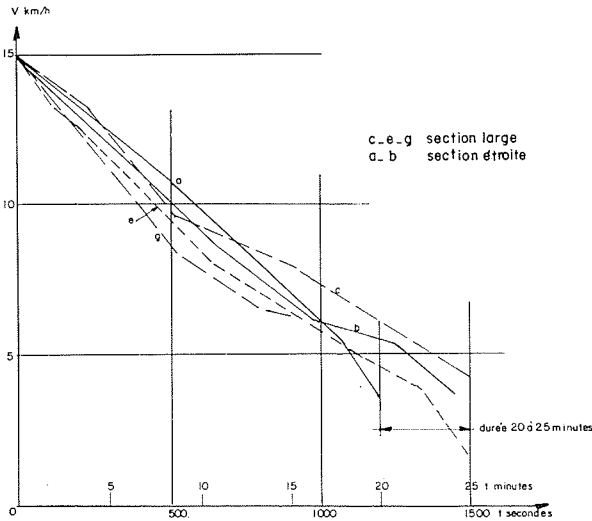


Figure 5 - Essais d'arrêt. Loi de décélération. Navire 160 000 t.

-- pour le 260 000 t :

$$\frac{\Delta V}{t} = - 0,50 \text{ km/h/min ou } - 0,0023 \text{ m/s}^2$$

Il semble que cette décroissance linéaire de la vitesse soit le plus propice à la tenue de route du navire.

Il en résulte des durées d'arrêt de 20 à 25 min. pour le premier navire, de 25 à 28 min. pour le second.

**Distances d'arrêt**

Tous les essais du programme ont ensuite été exécutés avec la procédure d'arrêt définie en-dessus.

Comme indiqué, chaque manœuvre a dû être décomposée en deux parcours successifs à cause de la longueur limitée du bassin. Cependant la procédure adoptée a permis de reproduire presque exactement les conditions existant à la fin d'un parcours comme conditions initiales de la phase suivante.

Les résultats ont été analysés de deux façons :

- soit en sélectionnant des transits types paraissant les plus représentatifs,
- soit en déterminant les diminutions de vitesse moyennes dans chaque phase de transit, c'est-à-dire ici sur 1500 m, pour les vitesses initiales de 9, 11, 13 et 15 km/h. Ces valeurs moyennes étaient établies à partir de l'ensemble des essais.

Les résultats de la 2<sup>e</sup> méthode sont graphiqués figure 7 (distances *D* en fonction de la vitesse de transit initiale *V*<sub>0</sub>).

On remarque sur ce graphique que la loi *D* - *V*<sub>0</sub> a une allure sensiblement linéaire dans la majorité des cas, entre 11 et 15 km/h tout au moins. Ceci justifie en passant le choix d'un pas de temps *T* pour définir les intervalles entre navires, *T* variant beaucoup moins que la distance en fonction de la vitesse.

En groupant certaines de ces courbes, on peut mettre en évidence l'effet des principaux facteurs, notamment :

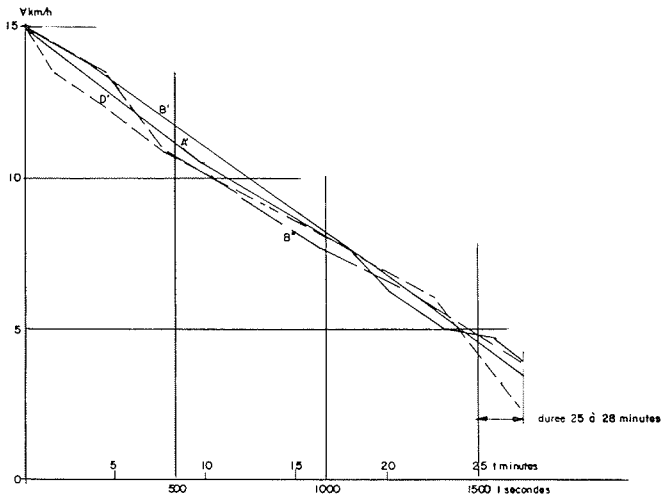


Figure 6 - Essais d'arrêt. Loi de décélération. Navire 260 000 t.

- le déplacement du navire,
- la largeur relative concrétisée par le coefficient d'aisance *r*.

On obtient ainsi les quatre courbes moyennes de la figure 8 correspondant aux cas suivants :

- 1 -- navire de 160 000 t avec profils du canal dits "étroits" c'est-à-dire  $2,4 < r < 2,8$  ( $r_m = 2,6$ )
- 2 -- navire de 160 000 t avec profils "larges" c'est-à-dire  $2,9 < r < 3,5$  ( $r_m = 3,1$ )
- 3 -- navire de 260 000 t avec profils "étroits" c'est-à-dire  $2,36 < r < 2,84$
- 4 -- navire de 260 000 t avec profils "larges" c'est-à-dire  $r = 3,03$  (1 seul cas)

L'examen de ce graphique appelle les observations suivantes :

a) Les distances d'arrêt sont plus élevées avec les sections les plus étroites : ce résultat paradoxal à première vue, s'explique par le fait que dans le canal étroit la tenue de route est plus difficile, donc la descente en allure doit être plus progressive.

On obtient pour le 160 000 t :

$D_{\text{canal large}}/D_{\text{canal étroit}} \approx 0,80 \text{ à } 0,84$  aux vitesses de 13 et 14 km/h (il se trouve aussi que  $r_m \text{ canal étroit}/r_m \text{ canal large} = 0,84$ ).

Pour le 260 000 t, on manque d'éléments pour les sections larges.

b) Entre le 260 000 t et le 160 000 t, à largeurs de section équivalentes et vitesses égales, les distances d'arrêt sont plus élevées pour le premier, dans la proportion :

$$D_{260000t}/D_{160000t} = 1,13 \text{ à } 1,15$$

très voisine du rapport des dimensions linéaires

$$E(\Delta) = (295\,600 \text{ t}/186\,200 \text{ t})^{1/3} = 1,17$$

*Valeurs des distances d'arrêt D<sub>0</sub>*

Le tableau ci-après présente les valeurs de *D* et de l'intervalle *t* correspondant à partir du graphique syn-

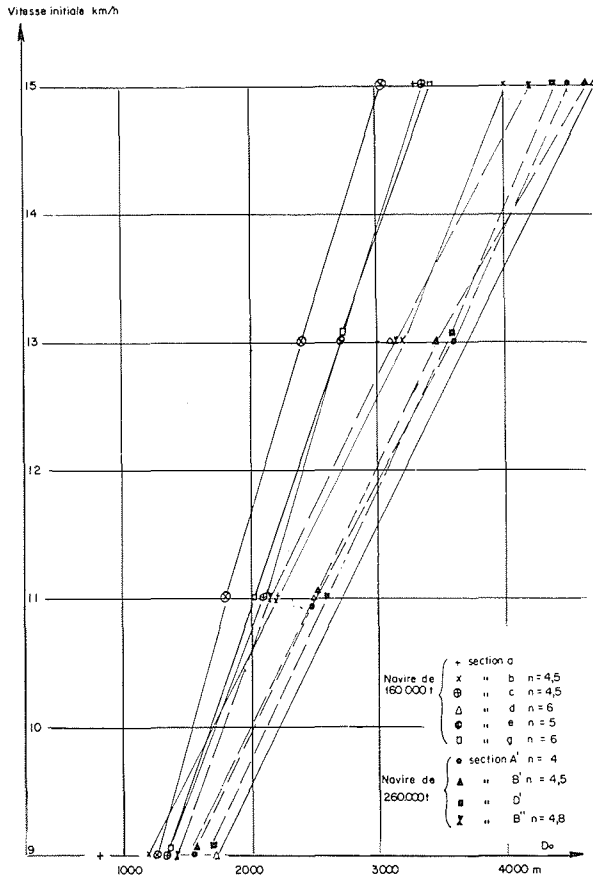


Figure 7 - Distances d'arrêt de la vitesse initiale à 4 km/h.

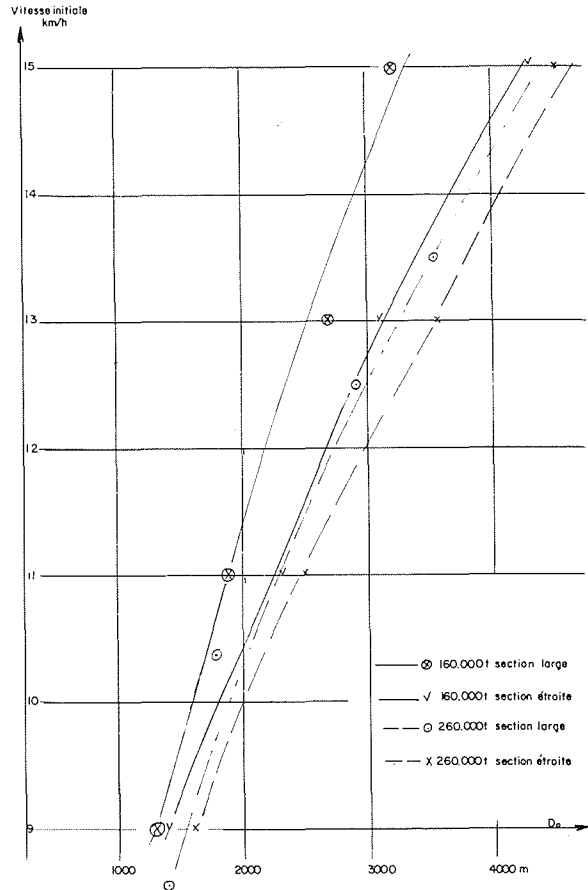


Figure 8 - Distances d'arrêt de la vitesse initiale à 4 km/h. Synthèse.

thétique de la fig. 5, pour trois vitesses, et dans l'hypothèse du canal dit "large" solution qui sera vraisemblablement retenue.

| Navire | 160 000 t |       | 260 000 t |       |
|--------|-----------|-------|-----------|-------|
|        | Do m      | t min | Do m      | t min |
| 12     | 2250      | 11,2  | 2750      | 13,7  |
| 14     | 2950      | 12,6  | 3800      | 16,2  |
| 15     | 3300      | 13,2  | 4350      | 17,4  |

Ces valeurs peuvent être considérées comme fiables

à ± 10 % près pour tenir compte de la dispersion réelle due aux facteurs aléatoires de la manœuvre (humains+hydrodynamiques).

On peut mettre en regard les distances d'arrêt mesurées sur le Magdala de 220 000 t en mer libre et grande profondeur, qui se situent entre 1600 et 1850 m pour des vitesses de 14 à 15 km/h.

*Critère de difficulté de manœuvre*

Un autre critère de comparaison des manœuvres, bien que très subjectif, réside dans leur qualification en difficulté, établie par le pilote.

Partant d'une notation en "faciles" et "difficiles", on a obtenu pour le 160 000 t la classification suivante :

| n =                            | Sections étroites |     |    |       | Sections larges |    |    |       |
|--------------------------------|-------------------|-----|----|-------|-----------------|----|----|-------|
|                                | 4                 | 4,5 | 5  | Total | 4,5             | 5  | 6  | Total |
| Nombre de manœuvres faciles    | 6                 | 6   | 3  | 15    | 9               | 9  | 10 | 28    |
| Nombre de manœuvres difficiles | 8                 | 14  | 11 | 33    | 6               | 11 | 4  | 21    |

Le passage des sections dites "étroites" aux sections "larges" fait passer la proportion de manœuvres faciles de 30 % à 56 %.

En particulier pour les sections de même rapport  $n$  (4 et 4,5), ne différant que par leur largeur relative, on passe de 35 % à 50 %.

Ceci illustre le gain de sécurité procuré par l'accroissement de l'aisance latérale avec les sections larges, c'est-à-dire :

$$r = \frac{1}{B} \# 3,1 \text{ au lieu de } r = 2,6$$

## Application aux études de trafic du canal de Suez

### Définition des intervalles de consigne

Il faut évidemment distinguer les distances d'arrêt  $D_0$  ainsi définies des intervalles types ou de consigne  $T$  qui constitueront pour les navires les normes de navigation dans le canal.

Pour passer des premières aux secondes, il y a lieu de majorer  $D_0$  :

- d'une distance  $\Delta D_0$  correspondant aux fluctuations aléatoires de  $D_0$ , estimées à  $\pm 10\%$ ,
- d'une correction  $d_1$  correspondant au temps mort de perception par le pilote de l'avarie du navire qui précède, temps estimé à 2 min.,
- d'une distance d'arrêt résiduelle  $d_2$ , à partir de  $V = 4$  km/h, estimée à une longueur de navire.

D'où le créneau minimum théorique :

$$D_1 = D_0 + \Delta D_0 + d_1 + d_2$$

auquel correspond, à la vitesse considérée un temps de parcours  $t_1$ .

On obtient ainsi à partir du tableau 3 :

| Navire | 160 000 t |             | 260 000 t |             |
|--------|-----------|-------------|-----------|-------------|
|        | $D_1$ (m) | $t_1$ (min) | $D_1$ (m) | $t_1$ (min) |
| 12     | 3200      | 16          | 3800      | 19          |
| 14     | 4000      | 17,2        | 5000      | 21,2        |
| 15     | 4400      | 17,7        | 5600      | 22,4        |

Pour fixer un intervalle type unique par classe de tonnage, on adoptera l'intervalle de temps qui correspond à la vitesse la plus élevée, soit en arrondissant :

- pour le navire de 160 000 t :

$$D_0 = 4400 \text{ m} \quad T = 18 \text{ min.}$$

- pour le navire de 260 000 t :

$$D_0 = 5600 \text{ m} \quad T = 23 \text{ min.}$$

Enfin l'intervalle de consigne devra tenir compte d'une marge d'incertitude sur l'estimation de la distance au matelot d'avant, estimation faite actuellement à la vue par le pilote avec l'aide des bouées kilométriques.

En l'absence de tout autre procédé de repérage, il faut admettre une incertitude d'environ  $\pm 30\%$  sur cette estimation, soit 5 à 7 min. supplémentaires pour  $T$ .

Cette marge peut être diminuée par l'installation de stations de contrôle échelonnées sur le canal, tous les 5 km ou tous les 2,5 km par exemple ; on montre que les fluctuations des créneaux peuvent alors être réduits à 3 min. ou 1,5 min.

### Effet des courants

Cette étude a été effectuée en l'absence de courants. Il existe dans la partie Sud du canal des courants de marée pouvant atteindre 2 à 3 nds ; l'arrêt avec un tel courant venant de l'arrière est pratiquement impossible pour le navire livré à lui-même, et ne peut être envisagé qu'avec l'assistance d'un remorqueur à l'arrière travaillant en freinage.

### Amélioration des distances d'arrêt

La conclusion la plus marquante de ces essais réside dans la longueur considérable nécessaire pour arrêter un grand navire de 150 à 250 000 t dans un canal maritime normalement dimensionné.

Cette distance d'arrêt constitue une barrière à toute augmentation du trafic du canal, qu'il n'est possible d'abaisser que par un système de contrôle de la navigation et/ou par tout dispositif permettant un freinage plus énergique du navire.

Il y a là un domaine de recherches dont l'intérêt économique est illustré par le fait qu'un gain de 10 % sur les intervalles permettrait vers les années 1990 le passage supplémentaire de l'un de ces navires par jour, soit un gain de redevances quotidien de 150 à 200 000 \$.

### Conclusions

1) La définition des distances d'arrêt intéresse tout canal ou chenal maritime, où le trafic est susceptible d'atteindre la saturation.

2) Les essais effectués montrent que ces distances atteignent en canal 3000 à 4500 m pour des navires de 160 000 à 200 000 t, valeurs beaucoup plus élevées qu'en mer libre, du fait des difficultés de tenue de route dans l'axe.

Les dimensions du canal ont une incidence sur ces distances, en particulier le coefficient d'aisance qui doit atteindre des valeurs de l'ordre de 3. Les rapports de section de 4,5 à 5 sont à cet égard satisfaisants.

Des essais de navigabilité en ligne droite effectués à la suite de l'étude ci-référée ont confirmé ces conclusions relatives aux dimensions du canal.

3) La notion de distance d'arrêt est également primor-

diale pour les manœuvres d'approche portuaires des grands navires : l'exemple du canal montre qu'elle ne peut être définie qu'en fonction du champ dont dispose le navire de part et d'autre de son axe de route. Il faut en fait définir non une distance mais une zone d'arrêt, caractérisée par une longueur, une largeur et même une certaine forme, tenant compte de toutes les contraintes imposées par la disposition du port.

## Discussion

Président : M. S. BINDEL

M. le Président remercie vivement M. SOMMET pour son exposé à la fois très clair et très complet. Il devrait susciter de nombreuses questions, dit-il, en ouvrant la discussion.

Au cours des manœuvres dans et aux abords des ports, les pilotes doivent tenir compte des effets du vent sur leur navire ; or, observe M. BAILLY (D.R.M.E., Paris), vous n'en avez pas parlé dans votre exposé. Un fort vent de travers n'a-t-il pas une influence défavorable sur le centrage du navire dans le canal notamment, pendant la phase d'arrêt durant laquelle il est peu manœuvrant ?

Par chance, répond M. SOMMET, dans le canal de Suez, les vents sont très modérés ; les vents forts ne dépassent pas 20 nœuds. En outre, ils sont très rarement traversiers et généralement plutôt dans l'axe du canal. Mais évidemment, un fort vent soufflant de l'arrière peut augmenter les distances d'arrêt.

M. VISCONTI (Alsthom Atlantique, Grenoble) s'interroge sur l'avantage que pourraient apporter, ici, les propulseurs d'étrave ? En augmentant la manœuvrabilité du navire, ils devraient permettre de mieux contrôler son cap et de faciliter la manœuvre d'arrêt.

Malheureusement, dit M. SOMMET, les grands pétroliers ne sont pas munis de propulseurs d'étrave ; mais, il semble évident que leur emploi aurait une incidence favorable sur les distances d'arrêt. En particulier si ces engins pouvaient être efficacement utilisés au-dessous de 8-9 km/h, ils permettraient d'éviter de donner les "à coups de machine" dont nous avons parlé et souligné qu'ils retardent l'arrêt du navire. Mais l'autorité du Canal ne peut imposer aux armateurs l'emploi des propulseurs d'étrave . . .

A-t-on cherché à tirer de l'étude des distances d'arrêt, une information sur la vitesse optimale des navires dans le canal qui maximiserait le tonnage transitant (le flux) sans ce dernier ? demande M. CAZENAVE (C.N.R.).

Ce problème d'optimisation, précise M. SOMMET, a donné lieu à différentes études ; mais, le nombre de paramètres à prendre en compte est assez grand. Si l'on diminue les intervalles, on augmente le nombre de navires qui passent dans un temps donné, mais par contre, le transit se fait plus lentement ; ces deux facteurs se compensent plus ou moins.

La recherche d'un optimum conduit néanmoins à des vitesses relativement grandes, c'est-à-dire de 14 ou 15 km/heure. Mais, on se heurte à d'autres limitations qui sont notamment les limitations de puissance. Les grands navires sont relativement peu puissants. Or, pour des raisons hydrodynamiques évidentes, les puissances demandées dans le canal sont très supérieures aux puissances au large pour une vitesse donnée. En fait, on poussera ces grands navires presque au maximum de leur puissance, en leur demandant d'aller à 13 ou 14 km/heure à pleine charge.

En fait, remarque M. le Président, tous les bateaux passent sensiblement à la même vitesse. Or, si la vitesse optimum pour

les navires de 260 000 tonnes est, par exemple, de 12 km/heure, il se peut, que pour des tonnages de 30 000 ou 50 000 tonnes, il y ait intérêt à réduire la distance entre deux navires consécutifs tout en adoptant des vitesses plus grandes.

C'est exact, dit M. SOMMET, mais peut-être faut-il nuancer votre conclusion. La distance entre Port-Saïd et Suez est de 200 km environ. Actuellement, la régulation du trafic se fait à partir de graphiques analogues à ceux utilisés pour les chemins de fer. Le trafic se fait par convois, chaque convoi part à des intervalles de temps prévus. Le canal étant à sens unique, les croisements ne sont pas autorisés. Toutefois, dans les "Lacs Amers", un convoi peut être arrêté pendant le temps où l'autre passe.

La circulation en convois impose une vitesse uniforme pour les gros et les petits navires. Pour lever cette limitation, il faudrait s'orienter vers un doublement du canal, solution qui permettrait la circulation dans les deux sens en s'affranchissant du système des convois.

M. DODU pose les deux questions suivantes :

1 - Vos essais révèlent-ils une interférence possible entre deux navires circulant l'un derrière l'autre dans le canal ? Quelle est l'influence du champ de vague créé par le navire qui précède celui que vous étudiez ?

2 - Peut-on fonder un espoir sur l'automatisation du pilotage malgré la valeur élevée des constantes de temps qui caractérisent ce pilotage ?

M. SOMMET ne pense pas qu'il puisse y avoir une interférence quelconque entre un navire et celui qui le suit dans le canal car l'intervalle entr'eux est de l'ordre de 3 à 4 kilomètres. Or, à une distance de l'ordre de 2 à 3 "longueurs", l'eau du canal est redevenu pratiquement calme après le passage d'un navire. A la deuxième question de M. DODU, il répond :

Quel que soit le port, le canal ou l'endroit où se trouve le navire, son commandant est responsable des manœuvres : en fait, c'est le pilote qui dirige la manœuvre, mais la responsabilité de celle-ci appartient au commandant. Je le vois difficilement abandonner cette manœuvre à un automate.

En pleine mer, le pilotage automatique est admis ; mais, la navigation en canal est extrêmement délicate ; elle demande des réactions permanentes du pilote car les effets de berge, même avec les sections de canal que nous avons indiquées, imposent une contrainte incessante. Dès que le navire est dévié de quelques mètres par rapport à l'axe, les effets de berge se font sentir du fait de la dissymétrie des écoulements entre tribord et babord.

M. COUPRIE (Soletanche) évoque le problème de la circulation dans les quelques courbes que comporte le canal de Suez et demande :

- Comment apprécie-t-on dans les courbes la distance séparant



les navires, compte tenu d'une certaine difficulté de visibilité ?

— La manœuvre d'arrêt n'est-elle pas plus difficile en courbe qu'en ligne droite ?

Ce sont là des questions épineuses, admet M. SOMMET. En général, les rives du canal sont assez dégagées ; mais, surtout depuis la "Guerre des six jours", la visibilité en certains points n'est pas très bonne.

En pratique, les pilotes sont en relation constante par radio-phonie avec un Centre de régulation du trafic ; c'est par cette voie, qu'ils seront prévenus en cas d'incident survenant au navire qui précède quand les distances de visibilité deviennent très grandes (de l'ordre de 4 000 m). Ces moyens vont d'ailleurs être considérablement améliorés en raison de l'extension du canal et de l'augmentation du trafic.

M. COUPRIE a évoqué le problème de l'arrêt dans les courbes ; nous ne l'avons pas étudié sur notre modèle mais plusieurs pilotes qui sont dans la salle pourraient nous donner leur opinion sur ce point.

Pour M. TOUSSAINT, pilote au port d'Antifer, le pilotage en ligne droite est au moins aussi difficile qu'en courbe, mais dans une courbe, il est plus difficile de matérialiser l'axe du canal.

M. SOMMET précise que, dans le Canal de Suez, il n'y a pas d'alignement au sens classique du terme, mais des bouées disposées latéralement qui jalonnent la profondeur de 8 m. ; tant en ligne droite qu'en courbe, le navire se situe par rapport aux bouées.

Il y a une quinzaine d'années, rappelle M. le Président, le Bassin des Carènes a fait des essais comparatifs de passage — en ligne droite et en courbe — des pétroliers dans le Canal de Suez. On a constaté, dit-il, que le nombre de passages difficiles dans les courbes était inférieur au nombre de passages difficiles en ligne droite.

M. MASSON, pilote à la station de Brest, résume son opinion comme suit :

1 — Je pense que, pour les super-pétroliers sur ballasts,

transitant par le Canal de Suez, le problème n'est pas tant un arrêt longitudinal qu'une dérive importante et incontrôlable vers la berge durant les dernières phases de manœuvre de décélération. Son fardage arrière étant prédominant, lorsque sa vitesse aura diminué et en présence de vent, le pétrolier sera très peu manœuvrant. Ainsi même à petite vitesse, il pourra se produire des avaries graves au navire si ce dernier ne s'accote pas à la berge sur toute sa longueur, c'est-à-dire en position parallèle à la berge. Il risque d'en résulter une réaction en chaîne sur les navires qui suivent. En manœuvre portuaire sur ces pétroliers à fort plan de voilure, on peut considérer que la manœuvre *avec remorqueurs* est sûre jusqu'à des forces de vent de l'ordre de 20 nœuds. Au-delà, cela peut être l'aventure...

2 — Les vitesses des différents navires naviguant en convois ne sont jamais parfaitement les mêmes. Un navire a toujours à se placer entre celui qui le précède et celui qui le suit. Actuellement, c'est au moyen de sémaphores placés le long du Canal de Suez qui se règlent les distances à respecter. Ainsi, un pétrolier en charge peut être amené à augmenter sa vitesse pour respecter l'écart prévu entre le navire qui le précède et celui qui le suit. Ainsi, si le navire de l'avant s'immobilise soudainement alors que le navire qui le suit est en accélération de "recalage", il peut être utile d'augmenter initialement — entre les navires — les distances d'arrêt de sécurité.

Il y a effectivement des "coups d'accordéon" dans chaque convoi, dit M. SOMMET ; mais, la marge de 30 % admise tient suffisamment compte de cet aléa, car — si la visibilité est suffisante — les pilotes peuvent rectifier la position de leur navire à partir des bouées kilométriques et des sémaphores qui jalonnent le canal. La situation sera prochainement améliorée par l'installation de détecteurs de passage des navires, installés tous les 5 kilomètres.

En raison des exigences de l'horaire, M. le Président clôt la discussion, non sans remercier tous ceux qui l'ont suscitée et tout particulièrement MM. SOMMET, PARTHIOT et PARISET, co-auteurs du mémoire, qui en fait l'objet. Il donne ensuite la parole successivement à M. MACHABERT et à M. LAMBERTI pour l'exposé de la Communication qu'ils ont établie en collaboration avec M. BALQUET.

## Abstract

### Stopping distances for large ships in a canal

The stopping distances of large ships in a canal are a major factor in determining the volume of traffic it can convey. This is the case in particular for the Suez Canal. In carrying out the design studies for the enlargement of this canal, which will make it navigable by 150 to 250 000 dwt tankers, it was necessary to determine the intervals to be left between ships in the convoy.

The straightforward extrapolation of present values was considered to be hazardous, and the Suez Canal Authority consequently resorted to model tests, effected in part at SOGREAH's Laboratory, using a ship model operated by a pilot on board. The model represented 160 000 dwt and 260 000 dwt tankers, at scales of 1/39 and 1/44 (Figs. 1 and 2).

Essentially, the aim of the tests was to define a stopping procedure which would allow steerage-way to be maintained throughout the manoeuvre. This requires the very progressive reduction, by steps, of the speed of rotation of the propeller, with especial care being taken at the helm to ensure that the ship returns to the centre-line of the canal after each partial deceleration. It is possible, in this way, to reduce speed to 8 km/h. Below this speed it is necessary to use, in fairly rapid alternation, engine bursts forward and astern, with wide rudder angles, allowing the ship's speed to be reduced to 4 km/h without her touching the banks. Once this speed has been reached, the way can be checked by all possible means : engine full astern, anchors dropped and running along the bank. The deceleration procedure is represented in diagrammatic form in Figure 4.

Apart from the actual procedure, the main parameters which determine the stopping distances are the displacement of the ship, the speed of transit and the cross-section of the canal. Tests were run to determine the influence of these factors for

the 160 000 and 260 000 dwt ships, fully laden, with various canal cross-sections defined by the cross-section ratio  $n = S/s$  and by the width coefficient  $r = \text{canal width at keel/ship's beam}$ , and with speeds ranging from 9 to 15 km/h (Fig. 3).

The main results are as follows :

- the stopping distances, as shown in table 2, reach 3 300 m for the 160 000 dwt ship and 4 300 m for the 260 000 dwt ship, at 15 km/h,
- they are more or less proportional to the linear dimensions of the ships,
- they increase with the square of the transit speed (figs. 7 and 8).
- they are shorter with "wide" cross-sections ( $r = 3$ ) than with cross-sections that are deeper and narrower,
- cross-section ratios of  $n = 4.5$  to 5 are satisfactory.

In determining the regulation intervals to be respected by ships in a convoy, account has to be taken of the distance covered before the pilot realises that the way of the preceding ship has been checked, of the margin of uncertainty in assessing ship speeds, distances, etc., with the result that intervals of 25 and 30 minutes respectively were recommended for the two ships considered.

With a current from the stern, the stopping manoeuvre can only be effected with tug assistance.

The stated intervals could be reduced, with control stations every 2 or 5 km.

In general terms, the study highlighted the correlation which exists between the stopping distances required by large ships and the width available on either side of the route to be followed by the ship.