

01188

PROJET REGIONAL-86 FNUD

ETUDE DE NAVIGABILITE ET DES PORTS DU FLEUVE SENEGAL

(1ère PHASE - ETUDES ET RECHERCHES)

APPRECIATION PRELIMINAIRE DES CONDITIONS DE NAVIGATION

ET DES FRAIS DE TRANSPORT DE MARCHANDISES

SUR LE FLEUVE SENEGAL APRES SON AMENAGEMENT

PAR

V.N. FOMERANTSEV
Ingénieur-Docteur
Expert en Economie
Et Exploitation du
Transport Fluvial

V. V. IVANOV
Ingénieur-Docteur
Expert Hydrologue

Saint-Louis, Sénégal
Février 1969

S C M A I R E

	PAGE
Généralités	2
1. Appréciation préliminaire des tirants d'eau navigables en transit	3
2. Appréciation préliminaire du coût de transport des marchandises	10
Bibliographie	22

GENERALITES

Pour faire suite à la décision du Comité de Coordination pour l'aménagement du Bassin du Fleuve Sénégal lors de sa réunion du 8 Octobre 1968 à New York, il a été procédé à l'appréciation préliminaire des profondeurs navigables ainsi que des frais de transport de marchandises sur le Fleuve Sénégal avec diverses variantes de régularisation du débit.

Des observations ont été faites dans le secteur compris entre Saint-Louis et Kayes dans l'hypothèse d'une régularisation assurant des débits constants de 200 à 600 m³/s à Bakel. Les conditions de la navigation aux autres débits n'ont pas été étudiées en raison de l'absence des éléments de base. Il est à noter que les études antérieures ont démontré que les débits à Bakel inférieurs à 200 m³/s ne peuvent pratiquement pas assurer les profondeurs nécessaires pour la navigation normale.

Etant donné qu'à la date de la préparation de cette note les études économiques n'ont pas été effectuées et que le trafic en perspective sur le fleuve n'a pas été déterminé, tous les calculs sont faits ici pour le transport d'une tonne de marchandises.

Toutefois à la fin de cette étude sont présentées les données préliminaires du prix de revient et des investissements pour la construction d'une flotte en vue du transport d'un volume conventionnel de marchandises. Pour apprécier l'efficacité du transport après la régularisation du débit, on a procédé au calcul des investissements et du prix de revient du transport sur le fleuve tel qu'il se présente dans son état actuel. Cette efficacité est apparue très considérable car la régularisation du débit non

seulement augmente les profondeurs mais aussi prolonge la période d'utilisation de la flotte.

Les résultats des calculs sont présentés en graphiques permettant de corriger les indices du transport de marchandises en fonction du changement des éléments de base, en particulier du changement du volume du trafic et des variantes de la régularisation du débit.

1. APPRECIATION PRELIMINAIRE DES TIRANTS

TABLEAU NAVIGABLES EN TRANCIT

Sur le secteur Saint-Louis (Sénégal) - Kayes (Mali), le Fleuve Sénégal à l'état actuel ne peut être utilisé pour la navigation que pendant des périodes limitées. Compte tenu des emplacements des escales et des conditions de la navigation, le Fleuve peut être divisé en 5 secteurs. La longueur des secteurs et le nombre des seuils limitant la navigation ainsi que les coudes du Fleuve sont donnés dans le tableau 1. La Fig. 1 donne les escales principales et les emplacements des seuils les plus difficiles.

Ces données montrent que le Fleuve, dans les limites à étudier, comprend 53 seuils dont 45 seuils sableux et 8 seuils rocheux ou rochers-sableux. Les seuils rocheux les plus difficiles limitant la navigation se situent en amont d'Ambidédi (Mali). Par contre tous les coudes du fleuve qui, à cause de leurs petits rayons, limitent la navigation, se trouvent sur la partie basse entre Saint-Louis et Kaédi.

Les tirants d'eau en transit en fonction des débits à Bakel pour les secteurs Saint-Louis - Ambidédi et Saint-Louis - Kayes sont donnés sur la Fig. 2. Ces fonctions ont été obtenues

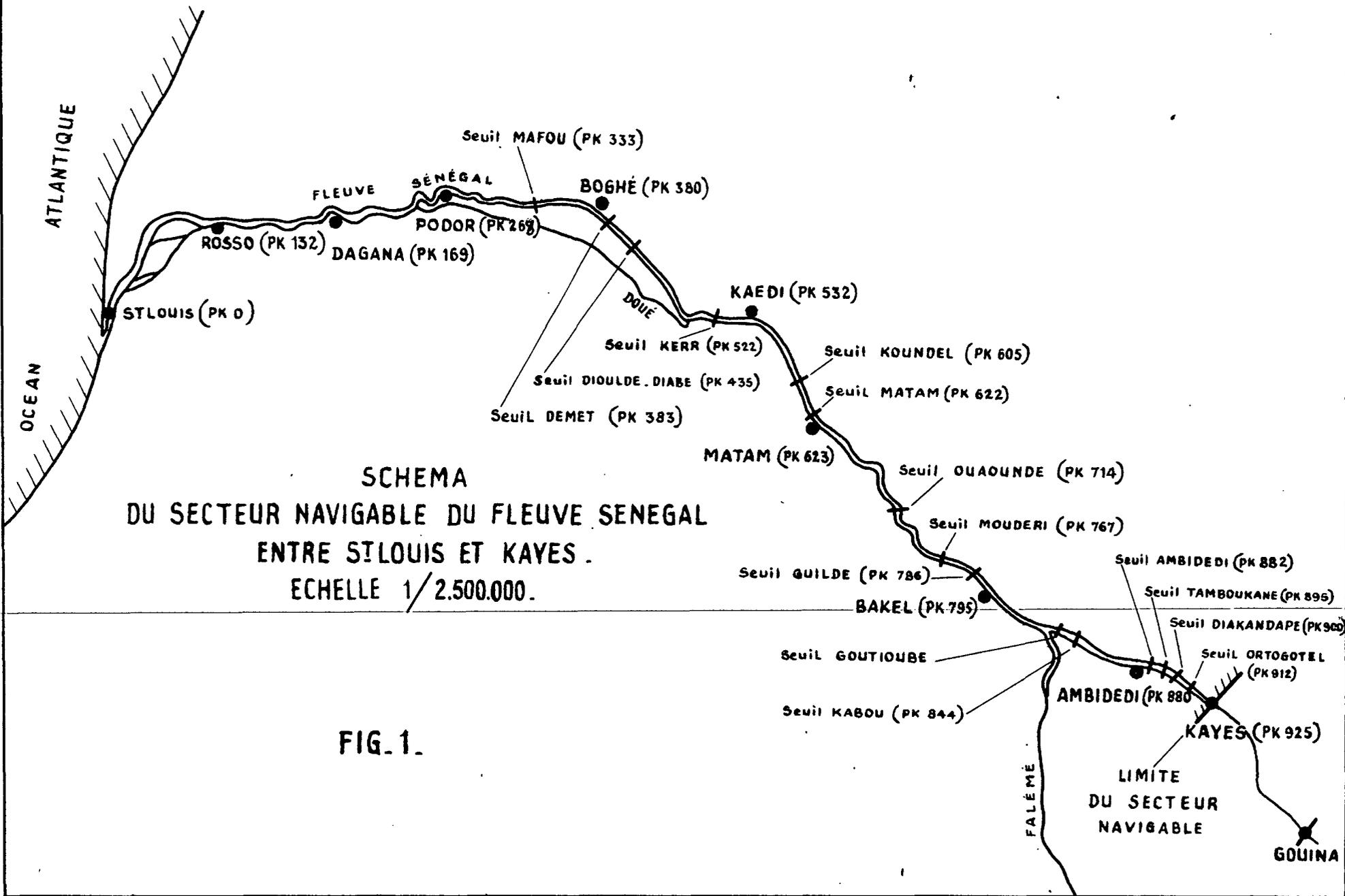


FIG. 1.

TABLEAU 1

NOMBRE DE SEUILS LIMITANTS
ET DE COUDES DU FLEUVE PAR SECTEUR

SECTEUR	Longueur (km)	Nombre de seuils			Nombre de coudes au rayon inférieur à 500 m			
		Total	y compris		Total	y compris		
			sable	roches et rochers		250-300 (m)	301-400 (m)	401-500 (m)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 Saint-Louis - Kaédi	532	17	15	2	19	10	7	2
2 Kaédi - Matam	91	8	7	1	1	-	-	1
3 Matam - Bakel	172	17	17	-	1	-	-	1
4 Bakel - Ambidédi	85	7	6	1	2	-	4	1
5 Ambidédi - Kayes	45	4	-	4	-	-	-	-
Saint-Louis - Ambidédi	880	49	45	4	23	10	8	5
Saint-Louis - Kayes	925	53	45	8	23	10	8	5

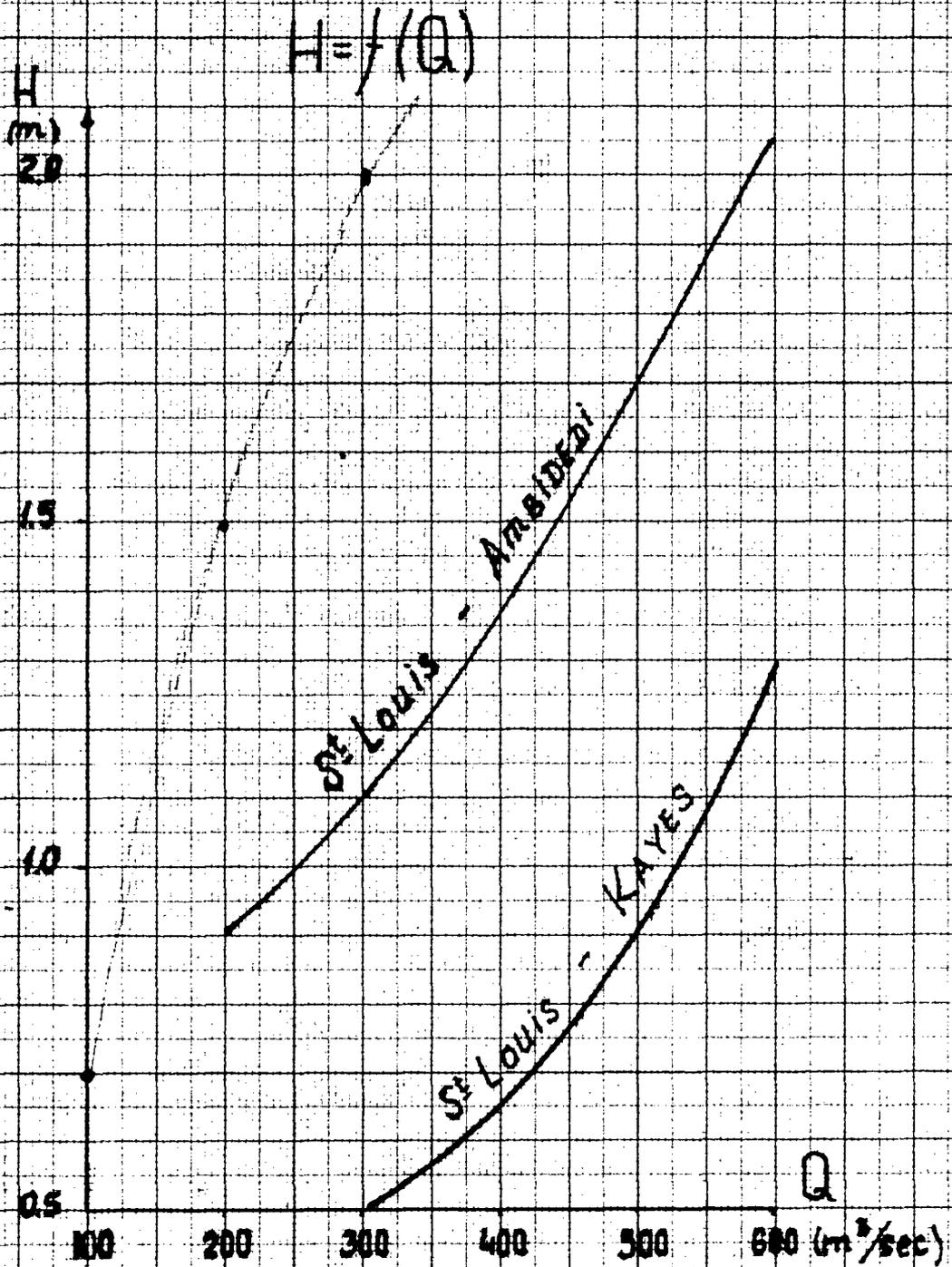


FIG. 2

grâce au dépouillement des levés de 26 seuils exécutés par le BCECM en 1966 /1/, du sondage sur les seuils faits par l'UNEA en 1951 /2/ et des observations effectuées par le Projet de Navigation sur 18 seuils à la crue de 1968 /3/. Pour les calculs, on a utilisé aussi les courbes de tarage pour les sections hydrométriques du Fleuve /4/.

Il faut noter que les données présentées sur la Fig. 2 ne représentent que l'appréciation préliminaire des tirants d'eau en transit du Fleuve et qu'elles seront précisées à la fin des observations en exécution sur les seuils et les stations hydrométriques.

La création de réserves d'eau sur le Fleuve Sénégal, avec le barrage dans la région de Gouina (Galougo) ^{ou} sur le Bafing ~~ou~~ avec le barrage dans la région de Manantali, changera le régime hydrologique et les conditions de la navigation sur le secteur considéré. Ces changements sont liés à la diminution de la durée et de la hauteur de la crue, à l'augmentation générale des débits moyens diurnes pendant l'étiage, et aux lâchers d'eau limpide (sans sédiments) provenant des réserves d'eau dans le bief aval. En même temps les débits diminueront tout le long du Fleuve à cause des prélèvements d'eau aux fins d'irrigation ainsi que des changements des conditions de filtration et d'évaporation.

D'après les données fournies par Lavrencic /5/, au débit régularisé de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ à Bakel " les crues supérieures à $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ sont en général diminuées dans leur durée de deux mois à un mois, et la pointe de crue pendant ce mois demeure presque inchangée par rapport à la crue naturelle, sauf pour l'année de probabilité de 97%. En cas de régularisation par le barrage de Manantali, la pointe serait diminuée de 20%, et en cas de régularisation par le barrage de Galougo, la pointe pour la même année serait diminuée

d'environ 10%." Dans ces conditions le débit de 300 m³/s sera garanti pendant toute l'année.

Après la régularisation du débit, le régime de la transformation du lit du fleuve change aussi, pourtant le caractère de l'évolution tout le long du lit du fleuve en aval de la réserve d'eau ne sera pas uniforme. Sans des études particulières, il est impossible de donner la prévision quantitative de transformation du lit après la régularisation du débit du Fleuve Sénégal. Toutefois, en se basant sur l'expérience de la régularisation du débit sur certains fleuves, on peut supposer que sur le secteur en aval immédiat du barrage, où le régime n'est pas fixe, et qui sort des limites du tronçon navigable à étudier, il se produira un creusement intensif du lit et un décapage des bosses. Plus en aval, dans la zone du régime fixe qui tombe dans le secteur de navigation, les seuils seront plus stables et le régime de leur changement différera peu du régime actuel.

C'est pourquoi on pourrait utiliser, pour la première estimation des tirants d'eau en transit sur le secteur Saint-Louis - Ambidédi après la régularisation du débit, la courbe de tarage des tirants d'eau en transit et des débits du fleuve, courbe obtenue par le dépouillement des données sur le terrain (Fig. 2). Il faut noter que les tirants d'eau obtenus par cette fonction seront inférieurs aux tirants réels car, dans l'hypothèse de la régularisation du Fleuve, on pourrait espérer une certaine amélioration des seuils. Pour le secteur Saint-Louis - Kayes, la courbe des tirants d'eau en transit en fonction des débits, ne changera pas puisque sur le secteur Ambidédi - Kayes les seuils limitant la navigation sont rocheux /3/.

Pour obtenir les tirants d'eau minima garantis en transit sur tout le fleuve d'après les fonctions mentionnées ci-dessus, il

faudrait tenir compte des prélèvements d'eau aux fins d'irrigation tout le long du Fleuve. Selon les renseignements fournis par J. Grolée /6/ , des prélèvements d'eau de petite importance sont envisagés en aval de Kaédi. Des prélèvements plus importants sont prévus seulement en aval de Mafou, dernier seuil limitant la navigation.

Sur le secteur entre Kaédi et le seuil Mafou, les pertes de débit en transit causées par le prélèvement d'eau, compte tenu de la filtration et de l'évaporation pendant l'étiage (Mai) seront de l'ordre de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ /6/. En conséquence, selon les études antérieures /3/, les tirants d'eau sur le secteur Kaédi - Mafou devront être diminués de 20 à 30 cm. Cependant cela n'influencera pas les tirants d'eau minima garantis en transit sur les secteurs Saint-Louis - Ambidédi et Saint-Louis - Kayes parce que les seuils limitant la navigation se situent en amont de Kaédi.

Pour déterminer les tirants d'eau minima garantis sur le secteur navigable de Saint-Louis jusqu'aux escales Ambidédi et Kayes, les fonctions données sur la figure 2 et l'hydrogramme du débit régularisé peuvent être utilisées pour la première approximation. Par exemple au débit garanti de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ à Bakel, le tirant d'eau minimum garanti sur le secteur Saint-Louis - Ambidédi sera de 1 m 10, et sur le secteur Saint-Louis - Kayes, de 0 m 50. Avec ces tirants d'eau la navigation peut se faire pendant toute l'année.

En utilisant les fonctions mentionnées ci-dessus et l'hydrogramme du débit régularisé, il est possible d'apprécier d'une façon approximative les tirants d'eau minima garantis pour les autres hypothèses de régularisation du débit.

Il est à noter que ces calculs ne tiennent pas compte de l'augmentation probable des tirants d'eau garantis en transit par

l'amélioration des seuils car cette augmentation des tirants d'eau peut avoir lieu dans n'importe quelle hypothèse de régularisation du débit. En se basant sur l'expérience des travaux de cette sorte sur d'autres fleuves, il est possible d'augmenter les tirants d'eau de 40 à 50 cm par des travaux d'aménagement effectués sur plusieurs années. Cependant en vue de déterminer d'une façon complète la méthode d'amélioration des seuils par les travaux d'aménagement, il est nécessaire d'effectuer des études particulières.

2. APPRECIATION PRELIMINAIRE DU COUT DE TRANSPORT

DES MARCHANDISES

Le coût du transport des marchandises est déterminé en fonction des facteurs suivants:

- type et charge utile des bateaux utilisés;
- prix des bateaux;
- frais d'exploitation des bateaux;
- volume et structure du trafic;
- durée de la période d'utilisation des bateaux;
- coût de manutention des marchandises dans les ports.

Voyons de près les conséquences de chacun des facteurs mentionnés ci-dessus sur le coût du transport des marchandises:

Compte tenu de l'expérience de la navigation sur le Fleuve Sénégal et de la nature du trafic comprenant en général des marchandises coûteuses qui doivent être livrées rapidement aux consommateurs, on a adopté pour les calculs des bateaux à propulsion.

En vue d'apprécier d'une façon préliminaire le coût du transport des marchandises en fonction des différentes variantes

de la régularisation du débit, il est considéré que la charge utile des bateaux dépend uniquement des tirants d'eau sur les seuils limitant la navigation, tirants d'eau conditionnés par la variante choisie de la régularisation du débit.

Cette hypothèse est choisie en partant du fait que toute l'appréciation de la conception des bateaux fluviaux se fait d'après les règlements déterminant le rapport des grandeurs principales qui assurent la charge utile maximum du bateau, la résistance minimale à la vitesse de déplacement et la stabilité nécessaire.

La figure 3 donne des tirants d'eau et charges utiles pour certains bateaux fluviaux ainsi que la charge utile en fonction du tirant d'eau du bateau; cette fonction est utilisée pour les calculs ultérieurs.

On voit sur le graphique (Fig. 3) que la loi du changement du frêt en fonction du tirant d'eau du bateau acceptée pour les calculs, contient une erreur admissible, de l'ordre de 10 à 15%, selon les calculs.

Cela signifie que le coût du transport des marchandises, en fonction des profondeurs (ou des variantes de la régularisation du débit) ne peut être défini qu'avec une erreur relative inférieure à 10 - 15%. Cette marge a été prise en considération dans les calculs qui suivent:

- La définition du coût de construction des bateaux adoptés pour le Fleuve Sénégal et l'établissement des rapports de ce coût avec le frêt et par voie de conséquence avec le tirant d'eau et la profondeur en transit, présentent certaines difficultés.

Le coût de construction des bateaux fluviaux en fonction de la charge utile peut être établi d'après la formule suivante qui a été utilisée dans de nombreuses études similaires:

$$K = A Q_c^{1-m}$$

Dans cette formule qui donne également le coût de construction des bateaux avec une erreur relative ne dépassant pas 10 à 15%, les valeurs "A" et "m" dépendent des coûts de construction existants.

Les calculs faits ont montré que ces valeurs pour les bateaux à propulsion adaptés au Fleuve Sénégal sont: $A = 0,955$ et $m = 0,48$ où le coût de construction est en million CFA.

Sur la base de ces données, il a été établi la courbe du coût de construction des bateaux en fonction de leurs frêts (Fig. 4).

Sur le même graphique (Fig. 4), on trouvera les charges utiles et les coûts correspondants des bateaux utilisés actuellement sur le Fleuve Sénégal. On verra que ces points se trouvent sur la courbe $K = f(Q_c)$ adoptée pour la définition ultérieure du coût de construction des bateaux.

- En se basant sur le coût de construction des bateaux, celui des amortissements, des réparations, des salaires et de l'effectif de l'équipage sur les bateaux, sur le prix du carburant et du lubrifiant et les frais généraux, on a déterminé le coût d'utilisation des bateaux. D'après ces calculs on a dessiné le graphique du coût d'utilisation en fonction de la charge utile de construction (Fig. 4).

2000 $Q_c (H)$

$$Q_c = f(T)$$

1000

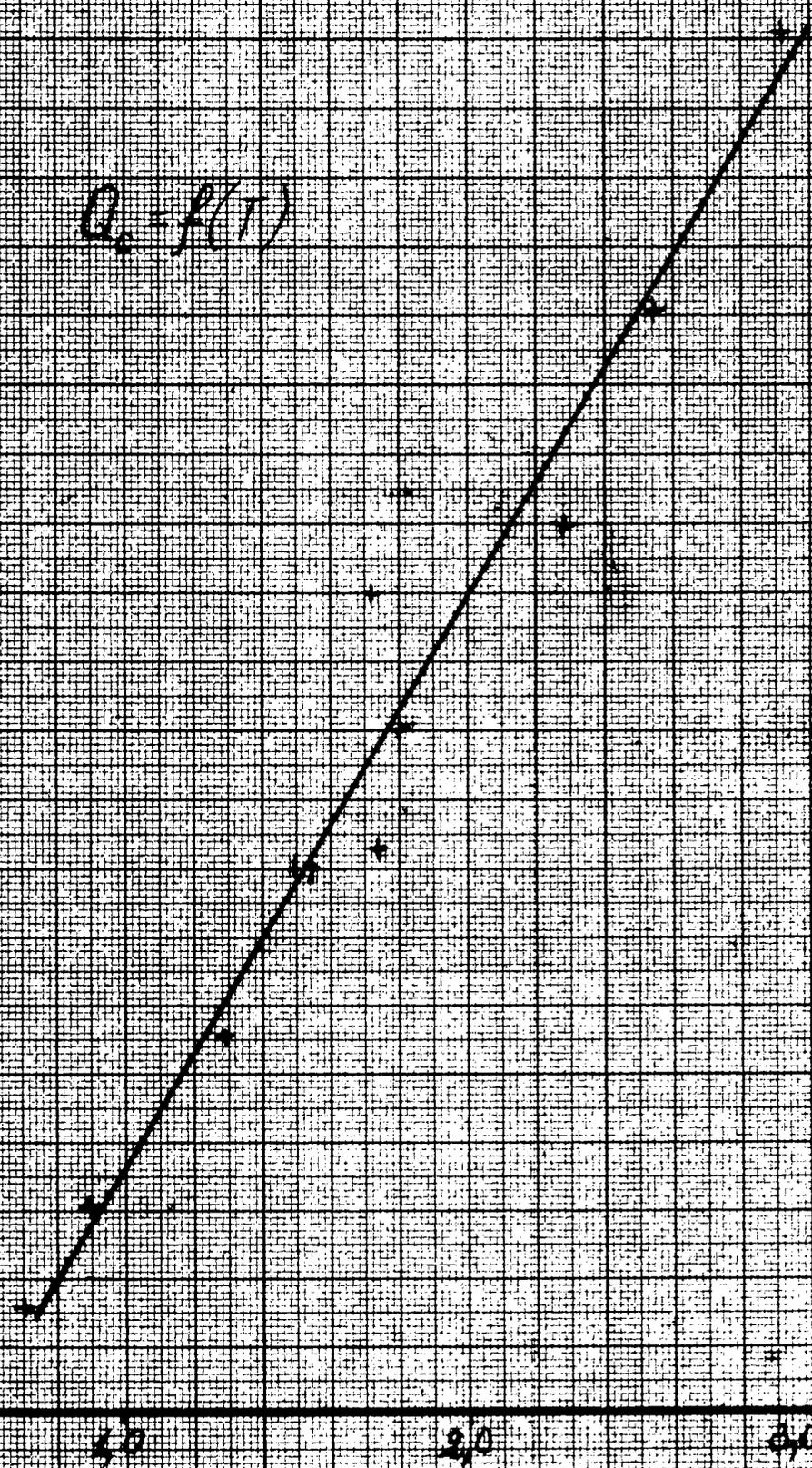
0

10

20

40 $T (m)$

FIG. 3



E, K m ln CFA

40

30

20

10

0

$K = 0.955 Q_c^{1-0.48} \text{ m ln CFA}$

$K = 5 (Q_c)$

$E = 5 (Q_c)$

100

200

300

400

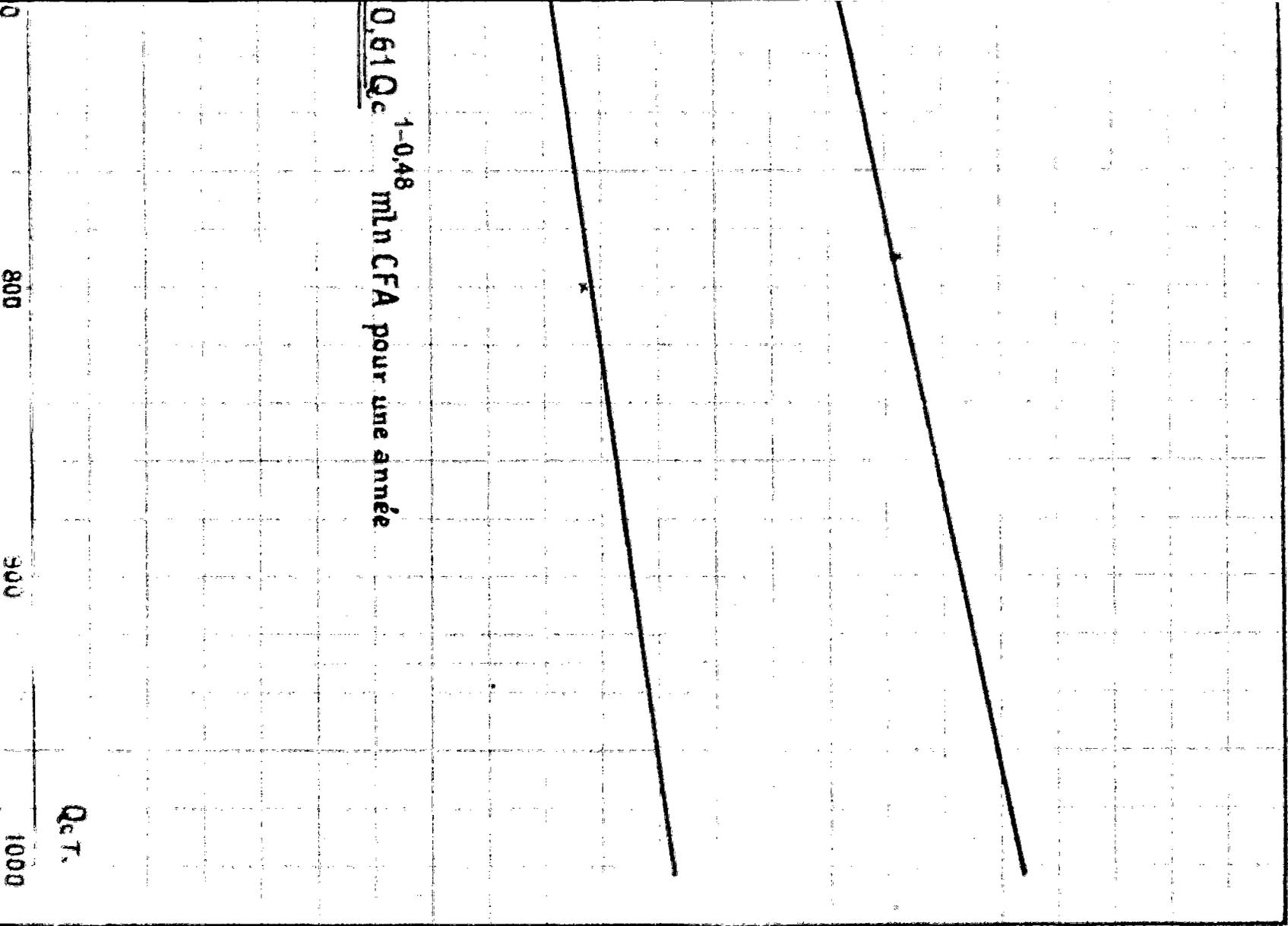
500

600

700

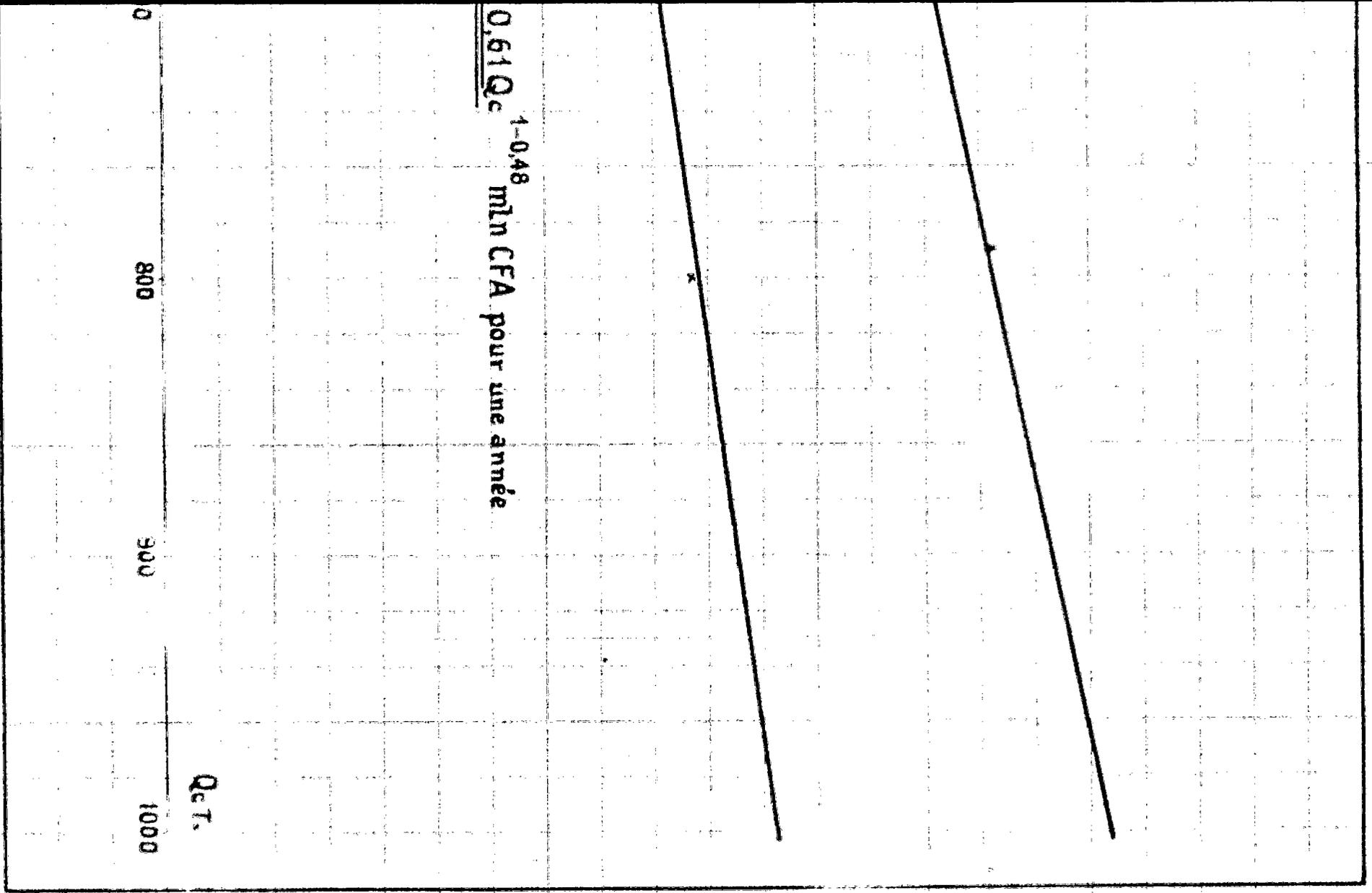
FIG. 4.

01188



Geoffrey Page MS

01488



E, K mlncFA

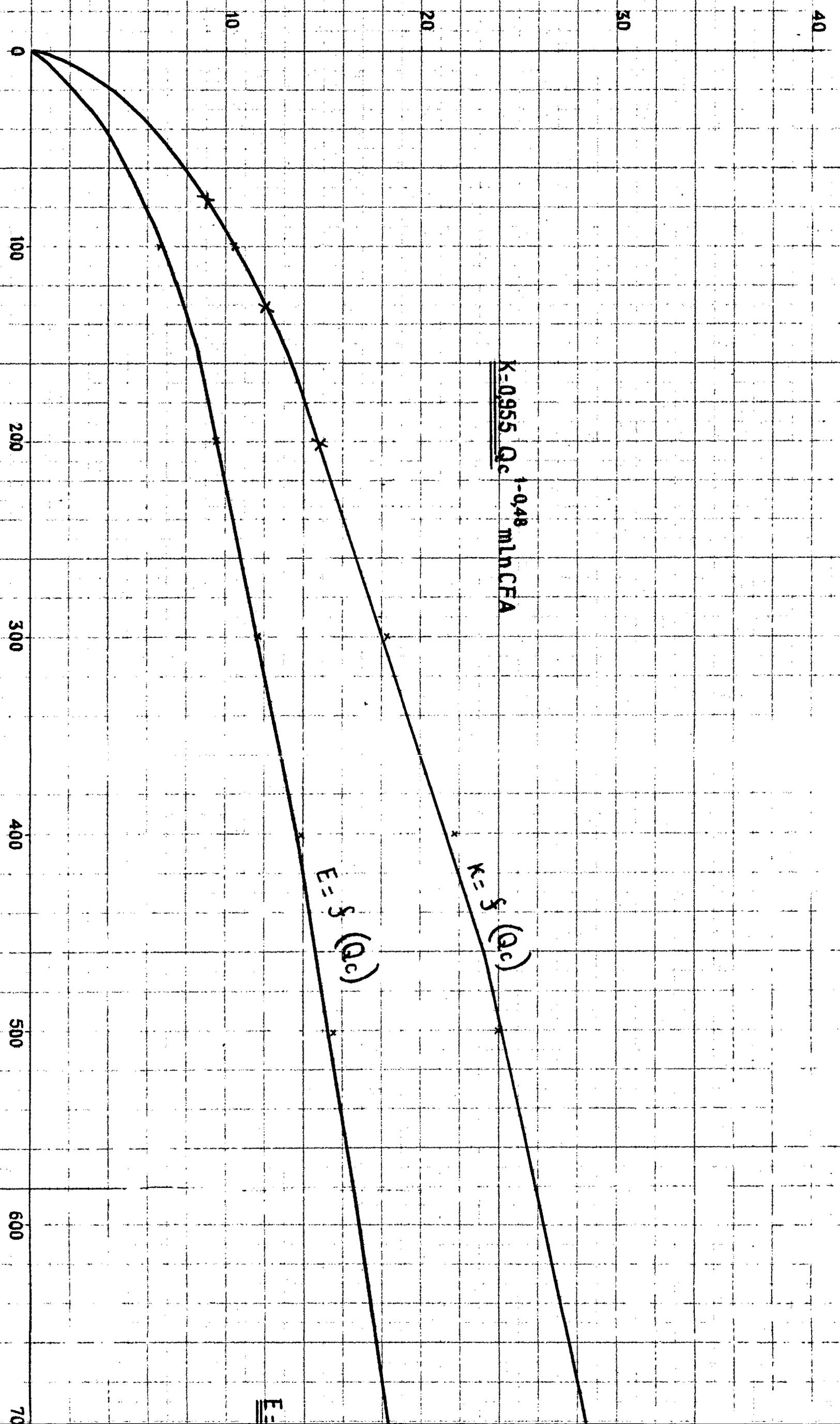


FIG. 4.

- Le coût du transport des marchandises est influencé sensiblement par la structure du trafic sur le Fleuve, en particulier, par la distance moyenne du transport des marchandises, le taux de remplissage de la flotte à la descente, le volume du trafic etc...

Actuellement, jusqu'à ce que des études économiques sérieuses soient faites, il est difficile de définir le trafic sur le Fleuve et sa structure après l'amélioration des conditions de la navigation et la régularisation du débit.

Cependant il est possible dès maintenant de faire certaines prévisions permettant de tirer des conclusions préliminaires sur l'utilité de l'aménagement du Fleuve.

Le trafic à envisager comprendra le transport en transit et local des marchandises. Par transport en transit, on entend des exportations et des importations de la République du Mali. Selon les études économiques préliminaires, le volume de ces transports après l'aménagement du Fleuve sera de l'ordre de 250.000 à 300.000 tonnes, dont 20% sont des exportations et près de 80% des importations. Ces transports se feront sur une distance de 880 km.

Quant au transport local des marchandises de la République du Sénégal et de la République Islamique de Mauritanie, il est impossible de déterminer actuellement son volume, même d'une façon approximative, sans des études économiques.

Cependant il est évident que ce transport consistera en petits volumes de marchandises semblables à ce qui existe maintenant.

La charge utile des bateaux pour les transports de cette catégorie n'est pas déterminée en fonction des profondeurs mais en fonction des volumes de marchandises. Donc on peut supposer que le transport local n'exigera pas une augmentation des profondeurs et va se faire avec les mêmes bateaux après l'aménagement éventuel du fleuve. Donc il n'est pas nécessaire de prendre en considération les frais de ce transport pour l'appréciation des variantes de régularisation du débit.

Pour pouvoir corriger à l'avenir les résultats des calculs préliminaires au cours de la définition du trafic à destination du Mali, on a calculé les frais de transport par tonne de marchandises (Fig. 5). Cependant, pour apprécier l'économie des frais de transport dus à l'augmentation des profondeurs, on donne sur la partie gauche du graphique les frais de transport de 250.000 tonnes de marchandises maliennes. Pour des raisons de commodité, on a mis sur ce graphique les courbes des profondeurs en transit en fonction des débits à Bakel.

- Après la régularisation du débit du Fleuve Sénégal, la navigation peut se faire pratiquement pendant toute l'année. Cependant compte tenu du temps nécessaire à la réparation de la flotte et de la nature saisonnière des transports des produits agricoles, la durée de la période d'utilisation acceptée pour les calculs est de 300 jours.

Sur la base de l'expérience antérieure de la flotte, la période d'utilisation du Fleuve à l'état naturel sur le secteur entre l'embouchure et Kayes a été estimée à 120 jours (Juillet, Août, Septembre, Octobre). Le reste du temps, la navigation jusqu'à Kayes est impossible en raison de l'absence de profondeurs.

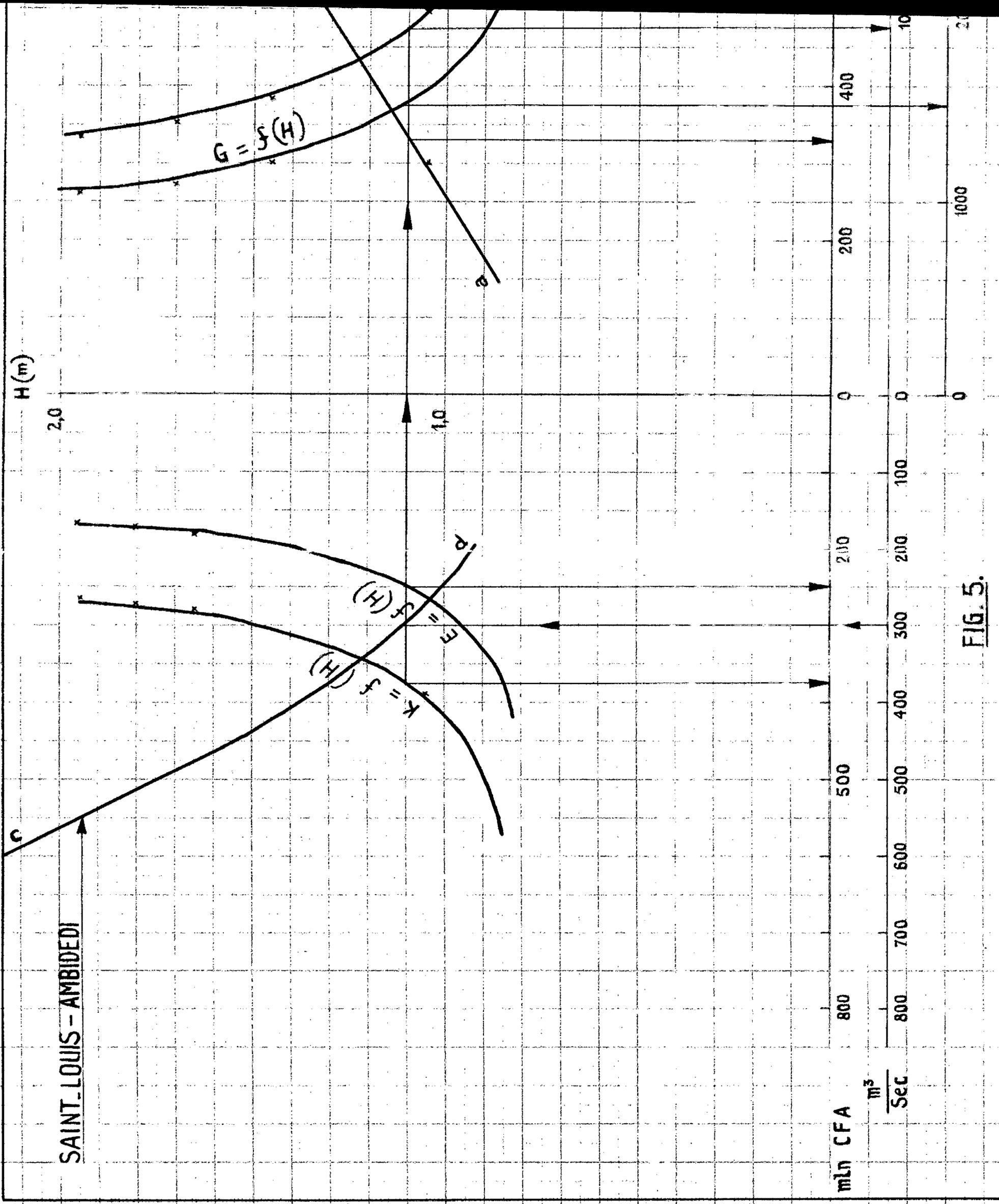
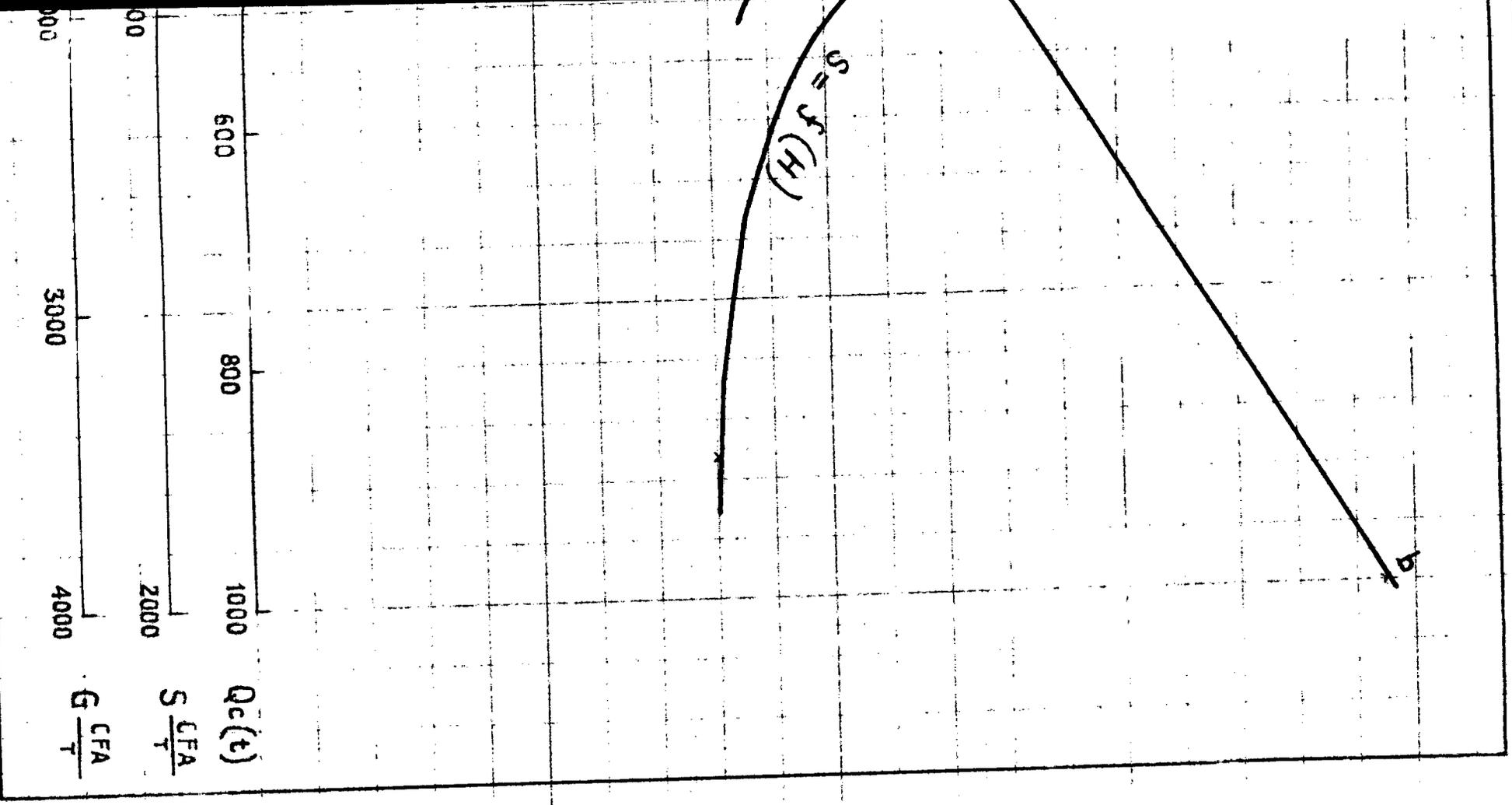


FIG. 5.

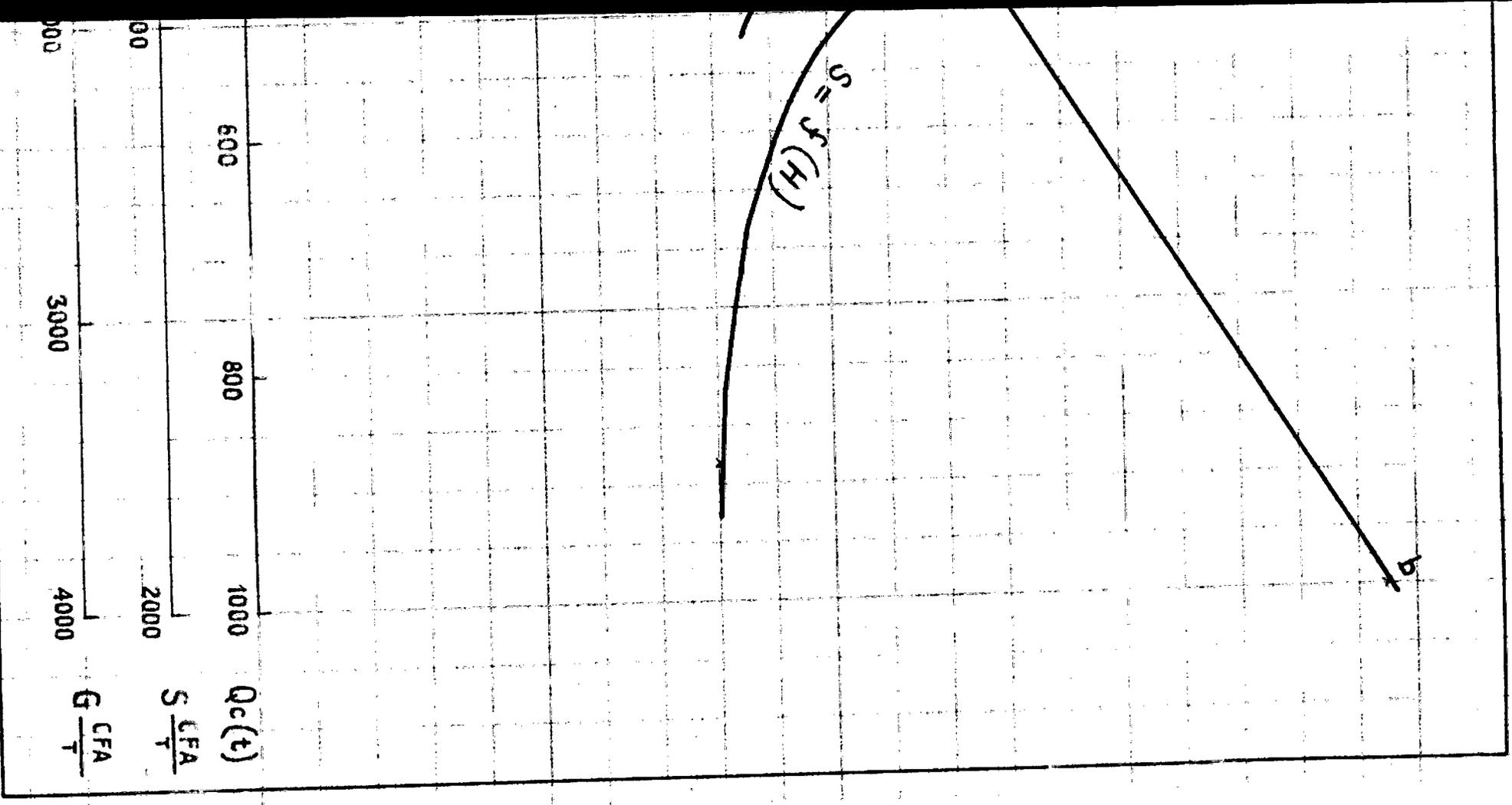
Book 5 Page 15

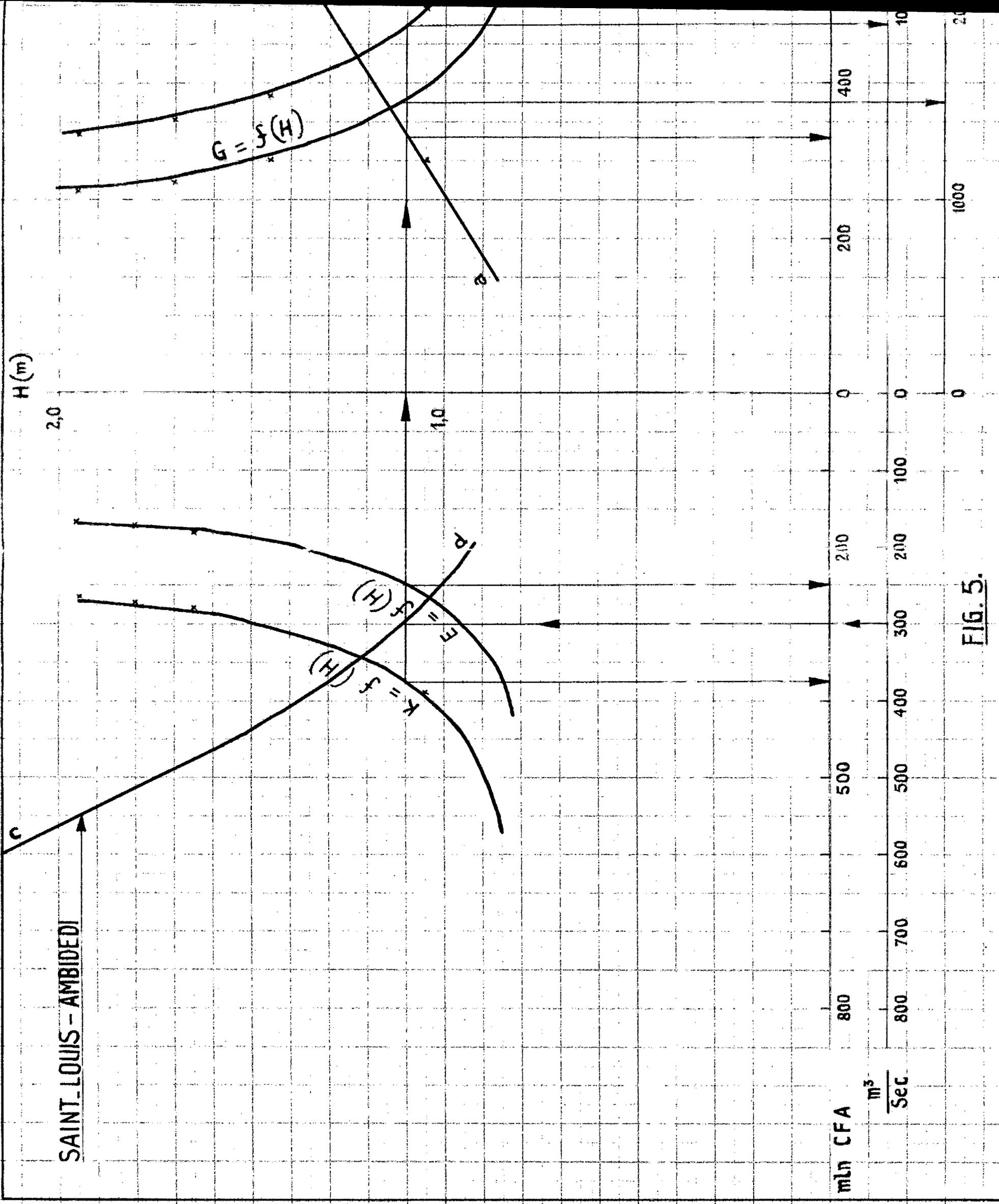
01188



Book 5 Page 15

04488





SAINT-LOUIS - AMBIDEDI

FIG. 5.

- Les frais de manutention des marchandises dans les ports n'ont pas été pris en considération car on peut supposer qu'ils seront les mêmes pour toutes les variantes de profondeurs puisque leur poids constant est de 250.000 tonnes.

Les graphiques sont dessinés selon les calculs (Fig.5)

Sur les graphiques (Fig.5) la courbe $S = f (H)$ représente le prix de revient du transport d'une tonne de marchandises en fonction des profondeurs en transit.

La courbe $G = f (H)$ représente des investissements par tonne pour l'achat de la flotte en fonction des profondeurs en transit.

La droite "ab" représente la charge utile en fonction des profondeurs en transit.

La courbe $E = f (H)$ représente les frais de transport de 250.000 tonnes de marchandises maliennes en fonction des profondeurs en transit.

La courbe $K = f (H)$ représente le volume des investissements pour l'achat de toute la flotte en fonction des profondeurs en transit pour le transport de 250.000 tonnes de marchandises maliennes.

La courbe "cd" représente la courbe de tarage des profondeurs sur le secteur Saint-Louis - Ambidédi en fonction des débits à Bakel.

Il est à noter qu'en déterminant les frais d'utilisation de la flotte on n'a pas pris en considération le paiement d'intérêts du crédit obtenu de la Banque pour l'achat de la flotte. On peut en tenir compte en ajoutant au prix de revient l'intérêt correspondant (1,25% ou 6%) des investissements (courbes $G = f(H)$ ou $K = f(H)$).

Pour comparer les frais de transport après la régularisation du Fleuve (durée d'utilisation de 300 jours et profondeurs améliorées garanties) avec ceux de la navigation sur le Fleuve à l'état naturel, on a pris comme base de départ les frais de transport de 250.000 tonnes de marchandises maliennes avec les profondeurs existantes et la durée d'utilisation de 120 jours.

Ces frais sont les suivants:

- frais d'utilisation de la flotte 620.000.000 CFA
- investissements pour la flotte 972.000.000 CFA

Au débit de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ à Bakel (échelle horizontale inférieure de gauche), on voit sur le graphique (Fig.5) que la profondeur en transit sur le secteur Saint-Louis - Ambidédi (échelle verticale) est de 1 m 10, la charge utile du bateau est de l'ordre de 330 t. (échelle horizontale supérieure de droite), les frais d'utilisation du transport de 250.000.t. de marchandises maliennes sont de 250.000.000 CFA (échelle horizontale supérieure de gauche) et les investissements pour la flotte sont de 375.000.000 CFA, par rapport à 620.000.000 CFA et 972.000.000 CFA respectivement si le Fleuve reste à l'état naturel.

On voit sur les graphiques (Fig.2) et (Fig.5) mentionnés ci-dessus que les investissements et les prix de revient

augmentent sensiblement dans le cas d'organisation du transport jusqu'à Kayes, en raison de la diminution brusque des profondeurs en transit. Au débit de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ à Bakel les frais d'utilisation du transport de 250.000 t. de marchandises maliennes jusqu'à Kayes représentent 1.000.000.000 CFA sans tenir compte des frais d'entretien du Fleuve sur le secteur entre Ambidédi et Kayes, contrairement aux chiffres de 250.000.000 CFA dans le cas du transport jusqu'à Ambidédi. Il est vrai que dans ce dernier cas il serait nécessaire de construire le port à Ambidédi. Pourtant il est évident que les dépenses de construction d'un port seront couvertes par l'économie indiquée des frais de transport.

Sur les courbes (Fig.5), on voit que les frais de transport de marchandises changent brusquement avec l'augmentation des profondeurs jusqu'à 1 m 40 - 1 m 50, sans les travaux d'amélioration sur les seuils. L'augmentation ultérieure des profondeurs ne diminue pas sensiblement les frais de transport. La profondeur de 1 m 40 - 1 m 50, comme on le voit sur le graphique (Fig.5) correspond au débit de $400 - 450 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce facteur doit être pris en considération lors du choix de la variante de la régularisation du Fleuve Sénégal.

Sur la base des résultats des calculs, le prix de revient et des investissements par tonne du trafic pour la flotte aux débits régularisés de 200, 300, 450, et $600 \text{ m}^3/\text{s}$ sur le secteur Saint Louis - Ambidédi seront:

Débit à Bakel m ³ /s	Profondeur en (m)	Charge utile du bateau (T)	Prix de revient CFA/T	Investissement par tonne du trafic pour la flotte CFA/T
200	0,9	170	1.250	1.900
300	1,1 - 1,2	330	950	1.500
450	1,5 - ,	650	750	1.100
600	2,1 - 2,2	1.100	650	1.000

A l'état naturel du Fleuve, le prix de revient du transport d'une tonne sur ce secteur est de 2.480 CFA/t, les investissements par tonne du trafic pour la flotte sont de 3.890 CFA/t.

Il a été déjà mentionné que pour toutes les variantes d'organisation du transport sur le Fleuve Sénégal, on n'a pas tenu compte de l'augmentation éventuelle des profondeurs par l'aménagement des seuils, car cette augmentation n'est pas liée à la régularisation du débit et peut être effectuée dans n'importe quelle hypothèse d'organisation du trafic sur le Fleuve.

On notera enfin que les frais de transport de marchandises par la voie fluviale sont inférieurs par rapport au transport par chemin de fer, sans tenir compte du mode d'organisation du trafic sur le Fleuve. Le tarif du transport d'une tonne par chemin de fer jusqu'à Kayes est de 6.468 CFA/t et jusqu'à Ambidédi, de 6.193 CFA/t.

BIBLIOGRAPHIE

- BCEOM : Etude hydrographique des seuils du Fleuve Sénégal, Septembre - Décembre 1966.
- U.H.E.A. : Mesure des seuils du Sénégal au débit de $500 \text{ m}^3/\text{s}$., Janvier 1951.
- V. IVANOV, V. KAMMERER : Données préliminaires sur la navigabilité du Fleuve Sénégal entre Saint-Louis et Kayes. Saint-Louis, Décembre 1968.
- C. ROCCHETTE : Monographie hydrologique du Fleuve Sénégal 3ème partie, analyse des éléments du régime hydrologique, CRSTOM, Juillet 1967.
- M. LAVRENCIC : Note d'étude sur la régularisation à $300 \text{ m}^3/\text{s}$ et ses conséquences, Décembre 1968.
- J. GROLEE : Premières propositions relatives à l'utilisation d'un débit régularisé minimal de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ à Bakel, Saint-Louis, Décembre 1968.

Saint-Louis, Sénégal
Février 1969

Traduit du Russe par V. VOSTRIKOV