

MINISTERE DE L'EQUIPEMENT ET DU LOGEMENT

Direction des Ports Maritimes
et des Voies Navigables

Service des Affaires Economiques
et Internationales

VOIES NAVIGABLES

ETUDE DU FRANCHISSEMENT DES ECLUSES

CHIFFRE D'AFFAIRES
DE L'INDUSTRIE ET
DU COMMERCE

CDAT
1616

B C E O M

15, Square Max-Hymans, Paris 15ème

JUIN 1967

PLAN DU RAPPORT

Introduction

Chapitre I

- I.1. Considérations générales
- I.2. Etude analytique
- I.3. Etude expérimentale

Chapitre II Exploitation des relevés établis par les centres régulateurs du Canal Saint-Denis et de la Haute-Seine

- II.1. Canal Saint-Denis
 - II.1.1. Situation et description des tableaux de marche
 - II.1.2. Dépouillement et définition des variables
- II.2. Haute-Seine
 - II.2.1. Situation et description des tableaux de marche
 - II.2.2. Dépouillement et définition des variables
- II.3. Résultats - Etude des corrélations
 - II.3.1. Généralités
 - II.3.2. Résultats des corrélations Haute-Seine
 - II.3.3. Résultats des corrélations Canal Saint-Denis

Chapitre III Enquête sur la navigation de la Basse-Seine

- III.1. Situation et déroulement de l'enquête
- III.2. Description des données
 - III.2.1. Identification des bateaux
 - III.2.2. Temps de passage
- III.3. Dépouillement et résultats
 - III.3.1. Répartition des bateaux par type
 - III.3.2. Lois d'arrivée
 - III.3.3. Temps de mise en place
 - III.3.4. Temps d'inversion
 - III.3.5. Temps de parcours
 - III.3.6. Résultats annexes

Chapitre IV Modèle de simulation : cas d'un groupe d'écluses

IV.1. Modèle étudié

IV.1.1. Voie navigable

IV.1.2. Types de bateaux

IV.1.3. Lois aléatoires de départ des bateaux

IV.2. Organisation de la simulation

IV.2.1. Indépendance des traitements de chaque groupe d'écluses

IV.2.2. Trafic relatif à un groupe d'écluses

IV.2.3. Organisation du traitement des files d'attente

IV.3. Description de l'organigramme

Chapitre V Modèle de simulation : cas général

V.1. Affectation des bateaux aux écluses

V.2. Destinations

V.3. Composition des bassinées

V.3.1. Principes généraux

V.3.2. Etude par type d'écluse

V.3.3. Organisation du traitement

V.4. Ordre du traitement de chaque groupe d'écluses

Chapitre VI Modèle de simulation : applications

VI.1. Programmes

VI.2. Exploitation du modèle

VI.3. Applications pratiques

VI.4. Conclusions

INTRODUCTION

L'étude du franchissement des écluses présentée dans ce rapport a plusieurs origines.

D'une part, les recherches effectuées pour l'élaboration de la politique commune des transports dans le cadre de la Communauté Economique Européenne ont souligné la nécessité d'étudier la notion d'équivalence pour l'occupation de la capacité des infrastructures.

Une telle notion est couramment utilisée pour le trafic routier : Un trafic mixte est traité comme un trafic homogène de voitures particulières obtenu en additionnant au nombre de véhicules légers proprement dit un nombre fictif supplémentaire égal au produit du nombre de véhicules lourds par un coefficient appelé coefficient d'équivalence.

Comme il n'existait pas de méthode semblable pour les voies navigables des travaux ont été entrepris dans le cadre de la Commission de la C.E.E. dont certains se poursuivent à l'heure actuelle, et qui définissent les fondements des diverses méthodes envisagées (1) pour la tarification des infrastructures :

- Méthode des coûts économiques complets
- " " coûts marginaux sociaux
- " " péages économiques
- " " l'équilibre budgétaire.

Il est apparu que la plupart de ces méthodes faisaient appel, sinon directement à la notion de coefficient d'équivalence, du moins à l'utilisation des relations entre temps de parcours et trafics des diverses catégories de bateaux empruntant une voie navigable.

(1) Réf : Documents c/50/66
c/22/67

On a d'autre part constaté que quelle que soit la méthode de tarification envisagée, le calcul des coûts peut être abordé en deux phases en distinguant successivement les biefs et les écluses.

Dans de nombreux cas même il est possible de négliger le problème du parcours en bief, les gênes entre bateaux y étant très faibles.

C'est donc principalement au niveau des écluses qu'il convient d'étudier les phénomènes d'attente et leur relation avec l'importance et la composition des trafics. C'est l'objet du présent rapport dans lequel diverses méthodes sont proposées.

L'une d'entre elles a conduit à l'élaboration d'un modèle de simulation sur ordinateur électronique permettant de multiples applications, qui à ce titre a été présenté de façon détaillée.

Chapitre I

I.1. Considérations générales

Ainsi qu'on a pu le voir à la lecture de l'introduction, les relations entre temps de parcours et trafic des diverses catégories de bateaux empruntant une voie navigable sont des données fondamentales pour la plupart des méthodes de calcul des coûts et de tarification des infrastructures.

Dans certains cas extrêmes, ces relations peuvent être déterminées a priori :

- soit qu'il s'agisse d'un fleuve non canalisé dont la largeur est telle, comme sur le Rhin en aval de Strasbourg, que le trématage peut s'effectuer sans difficulté. Les temps de parcours des divers types de bateaux ne dépendent plus alors des trafics mais seulement de leurs propres caractéristiques (chargement, puissance utilisée) ou de conditions extérieures (vitesse du courant, cote des eaux, réglementation ...),
- soit au contraire que l'on considère une section d'un canal étroit dont les écluses successives sont suffisamment rapprochées pour que leur fonctionnement ne puisse être organisé de façon indépendante. Dans ce cas, et dès que le trafic approche du débit de saturation de l'écluse la plus lente, on peut montrer que la meilleure exploitation de la voie est obtenue par une régulation de la navigation (1). La marche des bateaux est alors fixée par un "graphique de régulation", et leur temps de parcours a une valeur constante qui ne dépend que des caractéristiques de la voie : longueur des biefs et durée du cycle d'éclusement de l'écluse la plus lente (cf. Graphiques n° 1 et 2 en fin de chapitre).

(1) L'organisation scientifique du trafic sur une voie navigable à grande circulation - La Régulation de Navigation - par Louis Alvin - Consortium pour l'Aménagement et la Modernisation de la Seine et des Voies Adjacentes (1958).

Dans la plupart des autres cas l'étude des relations entre temps de parcours et trafics reste très complexe. En effet, même si l'on peut se limiter comme on l'a vu plus haut aux écluses proprement dites, laissant de côté les parcours en bief, les temps de franchissement dépendent de nombreux facteurs dont certains sont des données exogènes pratiquement invariables (temps d'ouverture et de fermeture des portes, temps d'inversion, dimensions des écluses et des bateaux) et d'autres ne sont déterminés qu'en fonction de la situation à un instant donné donc de façon endogène (temps d'attente, répartition des bateaux entre les écluses d'un même groupe, composition des bassinées, temps de mise en place dans l'écluse).

I.2. Etude analytique

Considérons le cas simple d'une écluse unique séparant deux biefs d'une voie navigable empruntée par un seul type de bateau. On peut en rencontrer de nombreux exemples en France sur les canaux de type Freyssinet où circulent des automoteurs ou des péniches de 38,25 m x 5 m.

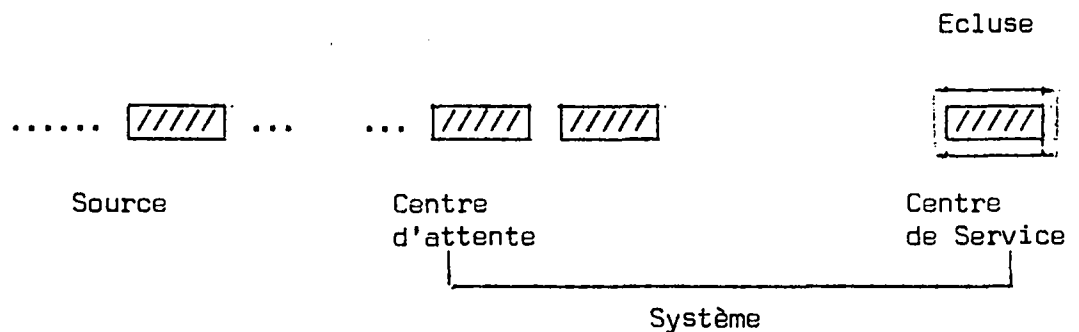
Suivant la terminologie classique de la théorie des phénomènes d'attente (1), il est possible de distinguer :

- Des arrivées d'unités (les bateaux) à des intervalles de temps irréguliers ou réguliers, dans un système. L'origine de ces unités, extérieure au système, sera appelée "source" (il s'agit ici de l'écluse ou du bief précédents).
- Un système comprenant un "centre d'attente" (le garage ou simplement l'extrémité du bief avoisinant l'écluse), et un "centre de service". Ce dernier est constitué dans le cas présent par une "station" unique, l'écluse.

Le service d'une unité comprend l'ensemble des opérations nécessaires au passage de cette unité dans l'écluse (remplissage éventuel du sas et

(1) A. Kaufmann et R. Cruon - Les phénomènes d'attente - Théorie et applications - Dunod - Paris (1961).

ouverture des portes, mise en place du bateau, fermeture des portes, inversion du sas, ouverture des portes et manoeuvres de sortie) : la durée du service est aléatoire de sorte que les unités peuvent avoir à attendre avant que la station soit disponible. Elles séjournent alors dans le centre d'attente en constituant une "file d'attente". Compte tenu de la définition du service donnée ci-dessus, nous considérerons que le passage du centre d'attente au centre de service est instantané.



En fait le phénomène est plus complexe puisque des bateaux circulent dans les deux sens. Il faut donc considérer indépendamment deux sources et deux centres d'attente (Amont et Aval) alimentant un centre de service unique.

Dans ces conditions, la loi de distribution de la durée du service ne peut plus être déterminée a priori. Cette durée dépend en effet de la situation de l'écluse à l'instant où commence le service de l'unité considérée : suivant qu'à cet instant l'écluse est prête du côté opposé ou du côté même où se présente le bateau, il faut inclure ou non dans le temps de service le temps nécessaire à la réalisation d'une fausse bassinée.

Les durées de service ne sont donc pas mutuellement indépendantes ni même, du fait de l'existence de deux sources, indépendantes des lois d'arrivées. En raison de ces restrictions, une approche analytique du problème ne semble possible que dans des cas très particuliers, par exemple trafic nul dans l'un des deux sens, ou à condition de faire des hypothèses simplificatrices dont l'ampleur modifierait la nature même du phénomène que l'on veut représenter.

Il apparaît donc nécessaire de se tourner vers d'autres méthodes, de type expérimental, pour une étude plus approfondie du franchissement des écluses.

I.3. Etude expérimentale

I.3.1. Mesures directes

Suivant une première orientation, inspirée de méthodes utilisées pour l'étude des courbes vitesse - débit en matière de circulation routière, on peut partir d'observations directes : On mesure au cours d'une série d'enquêtes, et sur le plus grand nombre de situations possibles

des temps : - temps d'attente
- temps de franchissement des écluses
- temps de parcours des biefs

et les débits correspondants :

- nombre de bateaux de chaque catégorie qui se sont présentés à l'écluse
- nombre de bateaux de chaque catégorie ayant franchi l'écluse.

Une telle méthode a pu être appliquée sur la Haute-Seine et sur le Canal Saint-Denis, sans qu'il ait été nécessaire cependant d'effectuer des enquêtes particulières sur le terrain. En effet il existe sur chacune de ces voies un centre régulateur qui établit des relevés systématiques retraçant la marche de l'ensemble des bateaux. L'exploitation de ces tableaux a fourni les données nécessaires à une première analyse présentée au chapitre II.

L'utilisation de données correspondant à des situations réelles offre certes de nombreux avantages. Elle est cependant limitée en raison du coût élevé et de la lourdeur des enquêtes à réaliser, et de la dépendance où se trouve l'observateur de certains facteurs qu'il cherche précisément à analyser : par exemple les trafics

effectivement observés pendant l'enquête peuvent être assez différents des trafics moyens sur la voie considérée, et leurs variations insuffisantes pour permettre une analyse détaillée de leurs effets, même si l'époque et la durée de l'enquête ont été choisies avec soin.

Aussi est-il souhaitable de compléter les études par mesure directe au moyen d'analyses plus systématiques. Les méthodes de simulation offrent à ce sujet des possibilités très intéressantes.

I.3.2. Méthodes de simulation

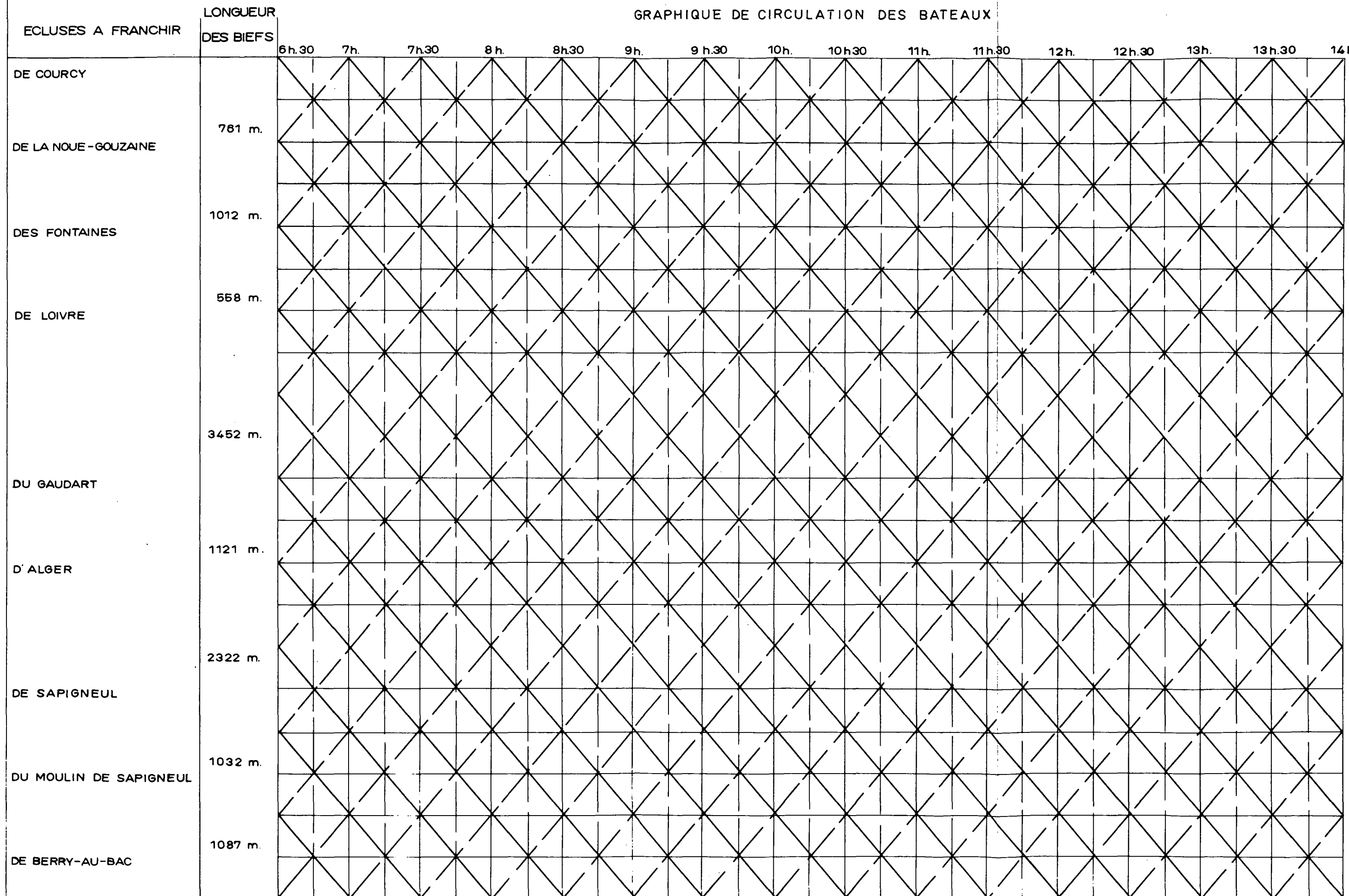
Le principe de ces méthodes repose sur la construction d'un modèle du phénomène étudié, ici le franchissement d'un groupe d'écluses.

Dérivés des premiers modèles physiques (reproductions à échelle réduite utilisés en hydraulique par exemple) les modèles mathématiques sur ordinateur électronique consistent en un ensemble de relations définies entre des variables caractéristiques de l'état d'un système. Dans le cas présent d'un modèle de voie navigable, ces variables sont par exemple les dimensions des bateaux et des écluses, données intangibles, et les variables définissant l'état de chacune des écluses : écluse ouverte du côté aval ou amont, ou en cours d'inversion.

Ce modèle a été établi en collaboration avec la S.E.R.T.I. (1) (Monsieur Glandier) et en liaison étroite avec les Services de la Navigation de la Seine. Sa présentation aux chapitres IV et V est précédée (Chapitre III) d'une description de l'enquête réalisée sur la Navigation de la Basse-Seine pour recenser un certain nombre de données, et suivie (Chapitre VI) d'un examen des exploitations en cours et des applications possibles.

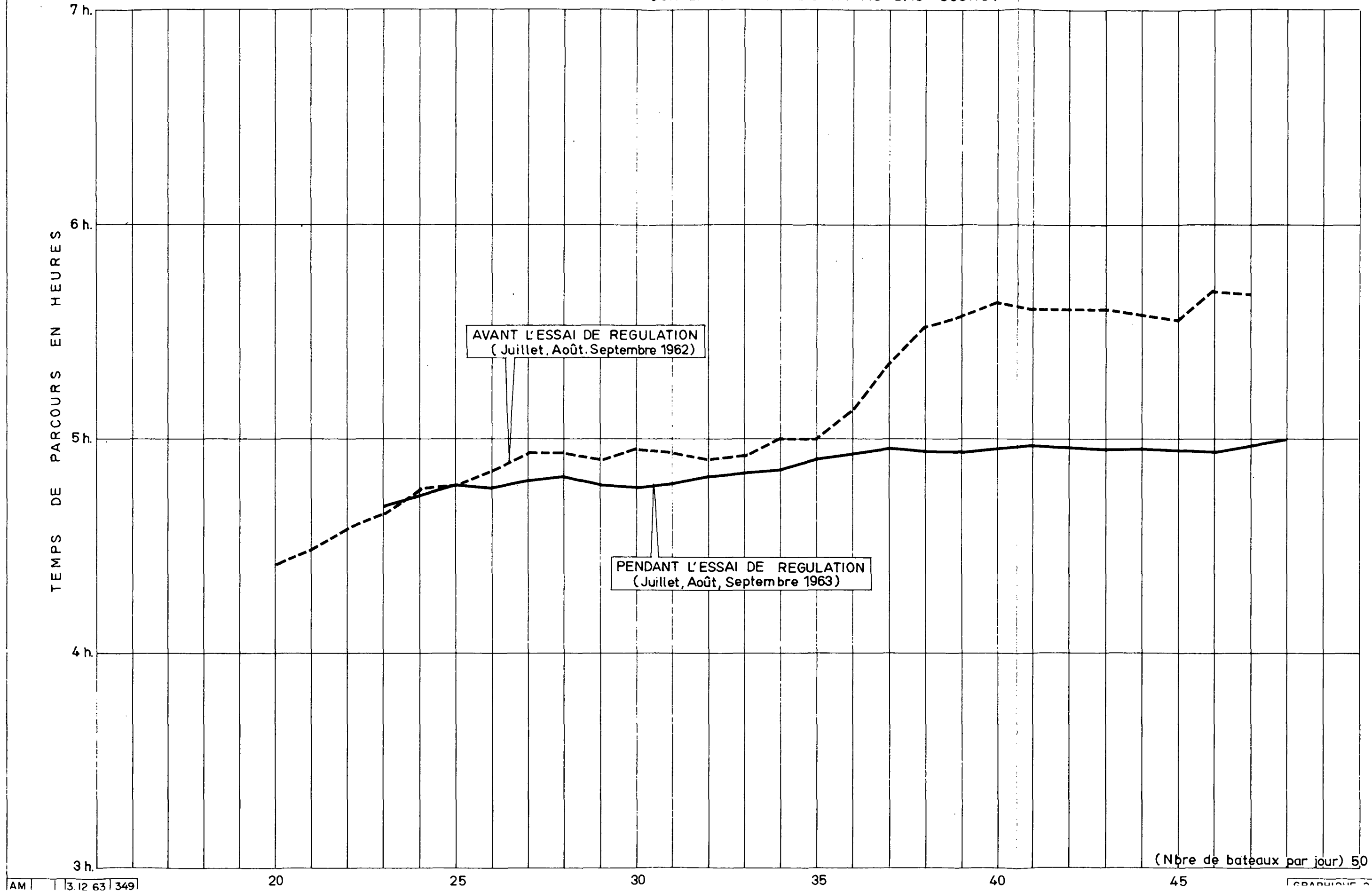
(1) Société d'Etudes et Recherches pour le Traitement de l'Information.

GRAPHIQUE DE CIRCULATION DES BATEAUX



BATEAUX MONTANTS ET AVALANTS

DUREES DE PARCOURS SUR LA SECTION BERRY AU BAC-COURCY



Chapitre II

Exploitation des relevés établis par les centres régulateurs du canal Saint-Denis et de la Haute-Seine

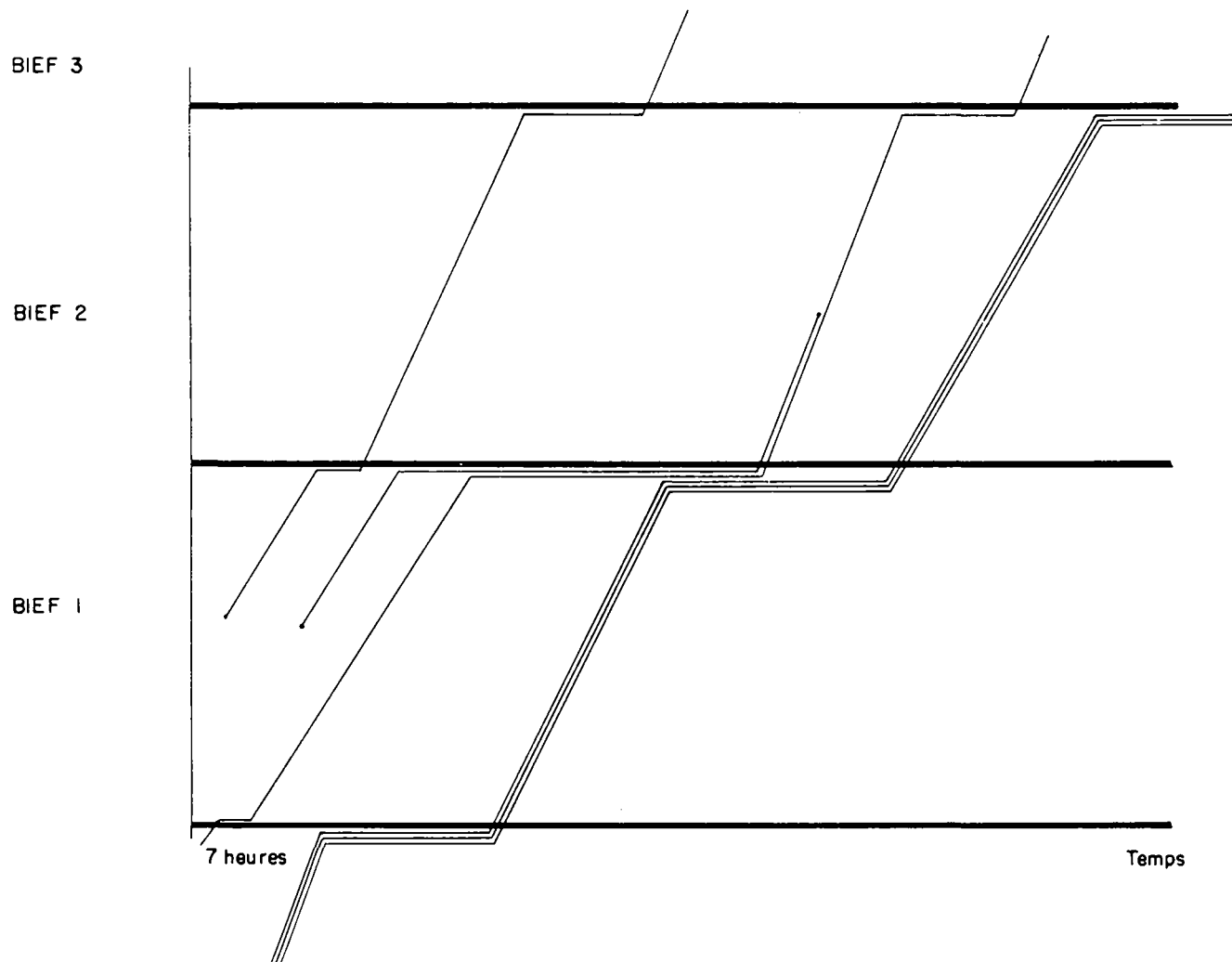
Le but de l'étude qui a été faite sur le canal Saint-Denis et la Haute-Seine était de relier les temps de parcours des bateaux (temps d'attente et temps de franchissement des écluses compris) à l'encombrement des biefs correspondants. On a donc cherché à exprimer ces temps de parcours en fonction du nombre de bateaux présents dans chaque bief, en distinguant, dans la mesure du possible, les différentes catégories de bateaux. Cette étude a été exécutée au moyen d'un certain nombre d'analyses de corrélation multiple, à partir des renseignements fournis par les centres régulateurs.

II.1. Canal Saint-Denis

II.1.1. Situation et Description des Tableaux de marche

Le centre régulateur de Saint-Denis fournit pour les six biefs de ce canal (voir carte) des tableaux de marche journaliers qui donnent une description complète du trafic. Ces tableaux sont présentés sous la forme de graphiques où le temps est porté en abscisse et la distance en ordonnée ; chaque bief correspond donc à une tranche horizontale des tableaux, les écluses étant représentées par des traits parallèles à l'axe des abscisses.

Chaque bateau est représenté par une succession de segments de droite, obliques lorsque le bateau progresse en bief, horizontaux et confondus avec le trait représentant l'écluse lorsque le bateau est en attente.



RELEVES DES CENTRES REGULATEURS

CANAL SAINT DENIS

Sur le graphique de la page précédente, chaque trait correspond à un bateau. Il est en général facile de suivre le parcours de chaque bateau, grâce à la règle du tour (le premier bateau arrivé est le premier à franchir l'écluse). Cette règle permet, en effet, en comptant le nombre de bateaux qui ont franchi l'écluse, de déterminer quels sont les bateaux qui restent, donc de mesurer tous les temps d'attente et les temps totaux de franchissement.

Les tableaux du centre régulateur permettent de distinguer deux catégories de bateaux. Chaque bief étant terminé par une petite et une grande écluse, on a noté de façon différente les bateaux pouvant passer dans la petite écluse (type 1) et les bateaux ne pouvant passer que dans la grande écluse (type 2). La distinction est faite simplement par l'emploi de couleurs différentes sur les tableaux de marche, ce qui permet de suivre sans difficulté la progression des différentes catégories.

Chaque tableau propose donc, pour une journée, une description complète des trafics montant et avalant de chacun des biefs du canal.

II.1.2. Dépouillement et Définition des variables

Le dépouillement des tableaux de marche a porté sur les biefs 3,4,5,6 du canal Saint-Denis et sur chacun des sens de parcours. Chaque journée a été divisée en 6 périodes de deux heures chacune, entre 7 h. et 19 h. Pour chacune de ces périodes, on a cherché à mesurer l'encombrement du bief au moyen de cinq variables pour chacune des deux catégories.

Ces cinq variables se définissent de la façon suivante :

- a) Nombre de présents : Il est égal au nombre de bateaux du type considéré présents dans le bief au début de la période,

bateaux qui peuvent, soit se diriger vers l'écluse qui ferme le bief, soit être déjà en attente à cette écluse. Cette variable est notée N P.

b) Nombre d'entrées : il est égal au nombre de bateaux sortis de l'écluse initiale du bief pendant la période. Cette variable est notée N E.

c) Nombre d'arrivées au bief : c'est le nombre de bateaux qui ont franchi l'écluse initiale pendant la période, mais qui n'ont pas poursuivi leur progression jusqu'à l'écluse finale. Cette variable est notée N A.

$$N A \leq N E$$

d) Nombre de départs en bief : c'est le nombre de bateaux arrivés à l'écluse finale pendant la période, sans être passés à l'écluse initiale. Cette variable est notée N D.

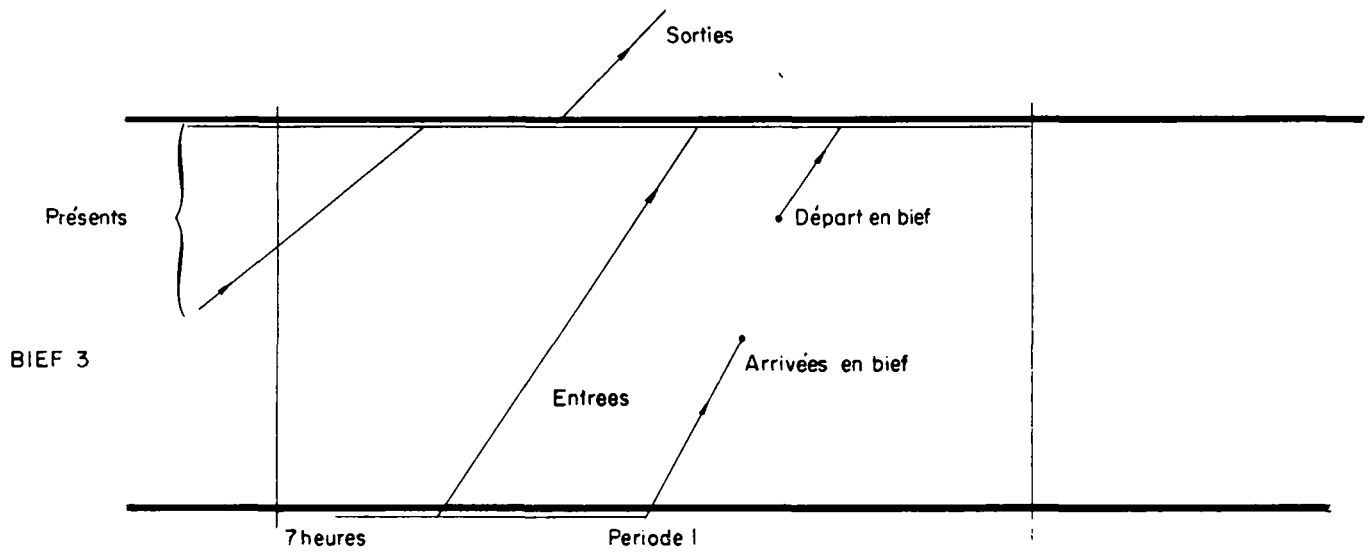
e) Nombre de sorties : c'est le nombre de bateaux qui ont franchi l'écluse finale pendant la période. Cette variable est notée N S. On peut remarquer que N S représente également le nombre d'entrées dans le bief suivant pendant la même période.

Le dépouillement des tableaux de marche a consisté à noter pour chaque jour, chaque période, chaque sens et chaque catégorie de bateaux, les valeurs de ces variables.

On a également mesuré les temps de franchissement de bief, en distinguant les bateaux entrés (bateaux arrivés en bief exceptés) et les bateaux présents. Par temps de franchissement, on entend la somme des trois éléments suivants : temps de parcours du bief (durée de la navigation), temps d'attente à l'écluse finale, temps de franchissement de l'écluse finale (ou temps d'éclusage). Ces trois éléments ne peuvent être distingués sur les graphiques.

RELEVES DES CENTRES REGULATEURS

DEFINITION DES VARIABLES



Ces résultats ont été notés sur des feuilles dont le modèle est donné plus loin, destinées à être transcrites directement sous forme de cartes perforées. On a considéré comme constituant une observation l'ensemble des variables correspondant à un bief, un sens, un jour et une période. Chaque observation est donc constituée par douze nombres :

- les cinq variables décrivant l'encombrement du bief en bateaux de type 1 (N P, N E, N A, N S, N D),
- les cinq variables correspondant aux bateaux de type 2,
- la durée moyenne de franchissement du bief par les bateaux de type 1,
- la durée moyenne de franchissement du bief par les bateaux de type 2.

L'enquête a porté sur le mois d'octobre 1965 et sur 15 jours du mois de mai 1966, soit au total 46 jours. Ces jours ont été choisis pour leur fort encombrement.

On a donc disposé pour chaque bief, chaque sens et chaque période, de 46 observations.

II.2. Haute-Seine

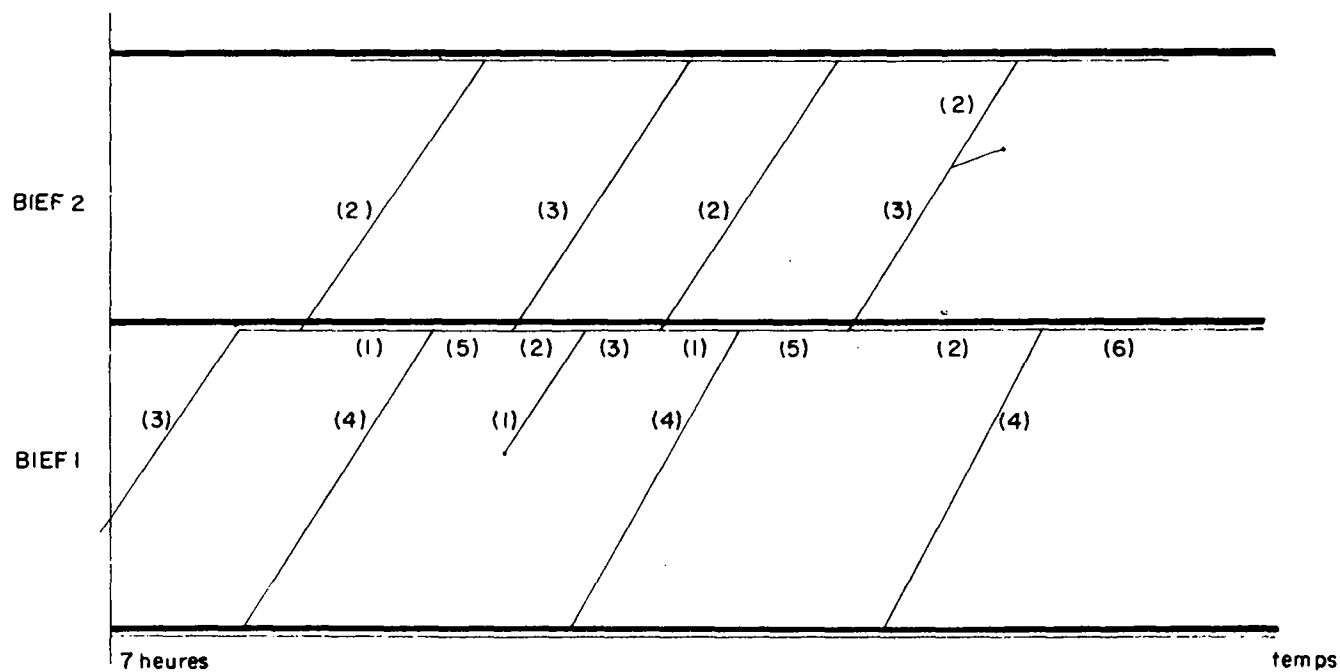
II.2.1. Situation et Description des tableaux de marche

Le centre régulateur d'Evry fournit, pour les six biefs de la Haute-Seine situés entre Evry et Varenne, des tableaux de marche analogues à ceux du canal Saint-Denis.

Ces tableaux présentent toutefois un certain nombre de différences avec les précédents. Chaque trait ne correspond pas en effet, à un bateau, mais à un groupe de bateaux ou de barges.

RELEVES DES CENTRES REGULATEURS

HAUTE SEINE



Les chiffres inscrits entre parenthèses à côté des traits donnent le nombre de bateaux arrivés, en attente, ou sortant de l'écluse. En appliquant la règle du tour, on peut encore arriver à suivre la progression des bateaux étant bien entendu que les groupes de bateaux peuvent éclater lorsque l'attente est forte à certaines écluses.

Les tableaux du centre régulateur d'Evry ne permettent malheureusement pas de distinguer les types de bateaux. Les convois poussés ne sont, en effet, repérés que par le nombre de leurs barges, nombre qui s'ajoute au nombre d'automoteurs représentés dans le même groupe. Il est donc impossible de suivre ces convois dans leur progression journalière. L'étude, par suite, a été faite en supposant qu'un convoi poussé de n barges était équivalent à un même nombre d'automoteurs.

II.2.2. Dépouillement et définition des variables

Le dépouillement des tableaux de marche a porté sur les deux biefs les plus encombrés :

- le bief noté 1, situé entre Coudray et Vives-Eaux,
- le bief noté 2, situé entre Vives-Eaux et La Cave.

La journée a été divisée en deux périodes de six heures chacune : 1ère période de 7 heures à 13 heures, 2ème période de 13 heures à 19 heures. Pour chacune de ces deux périodes, l'encombrement du bief a été mesuré au moyen de cinq variables déjà définies pour le canal Saint-Denis : nombre de présents, nombre d'entrées, nombre d'arrivées en bief, nombre de départs en bief et nombre de sorties de bief.

On a, en outre, mesuré pour chaque jour enquêté, chaque bief, chaque période et chaque sens, le temps moyen de franchissement des bateaux qui comprend comme précédemment : parcours du bief, attente et franchissement de l'écluse finale. L'ensemble des variables correspondant à un bief, un sens,

un jour et une période, a été considéré comme constituant une observation.

Les résultats du dépouillement ont été notés sur des feuilles de données (voir modèle ci-joint) destinées à être transcrites directement sous forme de cartes perforées.

Le dépouillement a porté sur 36 jours choisis parmi les plus encombrés des mois de mai et octobre 1965. On a donc disposé, pour les régressions multiples, de 36 observations par bief, sens et période.

II.3. Résultats - Etude des corrélations

II.3.1. Généralités

La plupart des régressions multiples effectuées sur les temps moyens de franchissement ont été faites en utilisant comme variables indépendantes les cinq variables définies plus haut mesurant l'encombrement d'un bief pour chaque catégorie de bateaux. Ces variables sont, rappelons-le :

- le nombre de présents : N P
- le nombre d'entrés : N E
- le nombre d'arrivés en bief : N A
- le nombre de départs en bief : N D
- le nombre de sortis de bief : N S

Le temps moyen de franchissement d'un bief se compose par définition d'un temps de parcours (temps de navigation), d'un temps d'attente à l'écluse finale, et d'un temps de franchissement de l'écluse. De ces trois éléments, seul le temps d'attente doit varier avec l'encombrement du bief, car le temps de navigation et le temps de franchissement de l'écluse (temps de mise en place et temps d'inversion du sas) peuvent pratiquement être considérés comme des constantes physiques.

Le problème consiste donc à trouver une relation vraisemblable entre le temps d'attente et l'encombrement du bief. Or, il est plausible de penser que le temps d'attente est directement en rapport avec la longueur de la file d'attente à l'écluse. Nous pouvons donc chercher à estimer, a priori, cette longueur au moyen des cinq variables d'encombrement que nous avons définies :

1. N P - le nombre de bateaux présents au début de la période mesure, à un facteur près, la longueur de la file d'attente au début de cette même période. Nous avons vu, en effet, que les bateaux présents se divisaient en deux catégories : les bateaux en attente à l'écluse au début de la période et les bateaux sortis de l'écluse précédente pendant la période précédente, mais n'étant pas encore arrivés à l'écluse finale au début de la période enquêtée. Nous pouvons donc dire que la longueur de la file d'attente au début de la période peut être mesurée par le nombre : $\alpha \times N P$, α étant un nombre compris entre 0 et 1, variant en fonction inverse de la durée du parcours en bief.

2. (N E - N A) - la différence entre le nombre d'entrées et le nombre d'arrivées en bief est égale au nombre de bateaux sortis de l'écluse initiale pendant la période et devant s'insérer dans la file d'attente de l'écluse finale. Une partie seulement de ces bateaux arrive à l'écluse finale avant la fin de la période, soit : $\beta (N E - N A)$ $0 < \beta \leq 1$ β doit croître lorsque le rapport du temps de parcours (navigation seulement) du bief à la durée de la période augmente pour tendre vers 1 lorsque le temps de parcours est très faible par rapport à la durée de la période.

3. N D - le nombre de départs en bief mesure un nombre de bateaux supplémentaires arrivant à l'écluse avant la fin de la période (par définition, les bateaux partis en bief sont notés dans la période au cours de laquelle ils arrivent à l'écluse finale).

4. Le total $N P + \beta (N E - N A) + N D$ mesure donc le
nombre total de bateaux qui se sont présentés à l'écluse
finale entre le début et la fin de la période enquêtée. On
peut admettre, en effet, que parmi les bateaux présents, tous
ceux qui n'étaient pas en attente au début de la période sont
arrivés à l'écluse finale avant la fin de la période.

5. $N S$ - nombre de bateaux ayant franchi l'écluse
finale du bief entre le début et la fin de la période.

Finalement, la différence : $(N P + \beta (N E - N A) + N D)$
- $N S$ mesure le nombre de bateaux restant en attente à
l'écluse finale, à la fin de la période.

La longueur de la file d'attente au début de la période
étant mesurée par la quantité : $(\alpha \times N P)$, nous pouvons
écrire que la longueur moyenne de la file d'attente à l'écluse
finale pendant la période peut être mesurée par la quantité :

$$L = \frac{1}{2} (N P (1 + \alpha) + \beta (N E - N A) + N D - N S)$$

α et β étant deux nombres compris entre 0 et 1, dépendant de
la longueur du bief et de la vitesse de navigation.

II.3.2. Résultats des corrélations Haute-Seine

Les calculs reposent sur l'hypothèse qu'un convoi poussé
ou tracté de n barges est équivalent à n automoteurs
indépendants. Cette hypothèse, a priori discutable, restreint
le champ des déductions possibles.

On s'est donc volontairement limité à l'exécution d'une
régression par bief enquêté et par sens de trafic, sans distinc-
tion de période, ce qui a permis en même temps, de disposer,
dans chaque cas, de 72 observations (36 jours x 2 périodes).

Les résultats sont présentés dans les tableaux II-A et II-B. Le coefficient de régression C est défini comme étant l'augmentation du temps de parcours moyen, entraînée par l'augmentation d'une unité de la variable correspondante. L'erreur ΔC ayant été calculée pour chaque coefficient, la précision de la mesure est d'autant plus grande que le rapport $\frac{C}{\Delta C}$ est grand. Les valeurs de C n'ont pas été indiquées lorsque la valeur $\frac{C}{\Delta C}$ était trop faible, c'est-à-dire en général, chaque fois que la variable correspondante avait une moyenne trop faible.

TABLEAU II-A

BIEF de COUDRAY - VIVES-EAUX

Trafic montant

Variable	Moyenne	Coefficient de régression C ($\frac{1}{100}$ d'heure)	$\frac{C}{\Delta C}$
Présents	23,80	+ 0,22	13,5
Entrés	20,82	+ 0,11	3,8
Arrivés en bief	0,56	-	1,2
Sortis de bief	23,06	- 0,16	4,4
Départs en bief	1,97	-	0,02

Temps moyen de franchissement : 7,70 heures

Coefficient de corrélation multiple : 0,876

Trafic avalant

Variable	Moyenne	Coefficient de régression C ($\frac{1}{100}$ d'heure)	$\frac{C}{\Delta C}$
Présents	12,96	+ 0,23	11,1
Entrés	22,32	+ 0,06	2,15
Arrivés en bief	0,04	-	0,64
Sortis de bief	21,96	- 0,13	3,80
Départs en bief	0,11	-	0,46

Temps moyen de franchissement : 4,74 heures

Coefficient de corrélation multiple : 0,815

TABLEAU II-B

BIEF de VIVES-EAUX - LA CAVE

Trafic montant

Variable	Moyenne	Coefficient de régression C ($\frac{1}{100}$ d'heure)	$\frac{C}{\Delta C}$
Présents	15,93	+ 0,15	7,6
Entrés	23,68	+ 0,06	3,2
Arrivés en bief	2,22	- 0,08	1,5
Sortis de bief	23,77	- 0,09	3,1
Départs en bief	1,50	+ 0,08	1,5

Temps moyen de franchissement : 5,17 heures

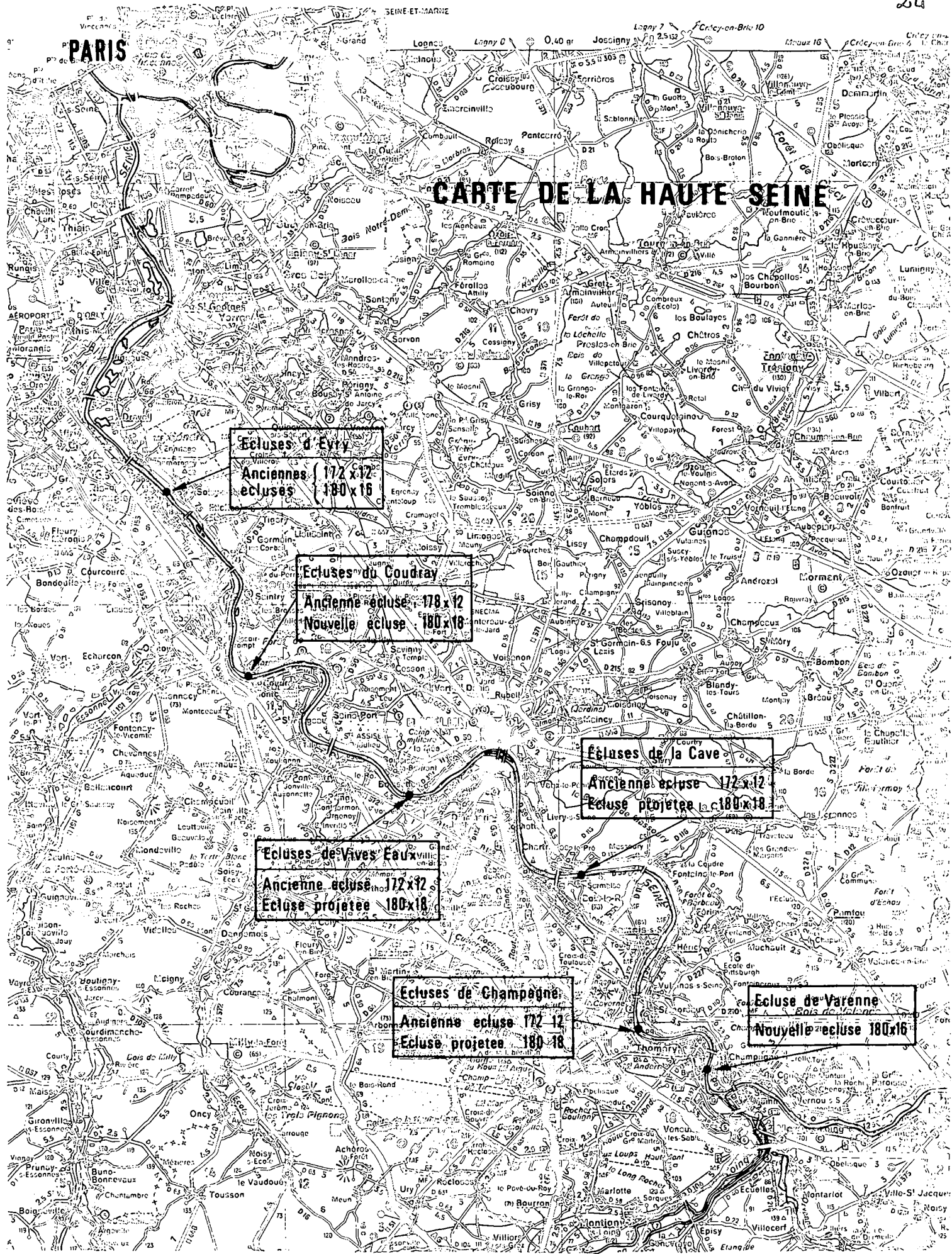
Coefficient de corrélation multiple : 0,765

Trafic avalant

Variable	Moyenne	Coefficient de régression C ($\frac{1}{100}$ d'heure)	$\frac{C}{\Delta C}$
Présents	7,36	+ 0,16	7,2
Entrés	24,01	+ 0,05	2,9
Arrivés en bief	0,06	-	1,4
Sortis de bief	24,02	- 0,05	2,5
Départs en bief	0,03	-	0,4

Temps moyen de franchissements : 2,49 heures

Coefficient de corrélation multiple : 0,713



Ces résultats indiquent que la précision des résultats atteint exceptionnellement 10% et ne dépasse guère, en général, 25%.

On peut remarquer, de plus, que la valeur d'ensemble des résultats est meilleure pour le bief situé entre les écluses de Coudray et Vives-Eaux, où les coefficients de corrélation multiple dépassent 0,80, alors qu'ils sont inférieurs pour le bief situé entre les écluses de Vives-Eaux et La Cave.

Néanmoins, ces résultats permettent de justifier l'hypothèse faite sur la variation des temps de franchissement, car ils permettent de retrouver assez nettement la variable :

$$L = \frac{1}{2} ((1 + \alpha) N P + \beta (N E - N A) + N D - N S)$$

Tableau résumé

COEFFICIENTS DE REGRESSION

		N P présents	N E entrés	N S sortis
Coudray - Vives-Eaux	MONTANT	0,22	0,11	- 0,16
	AVALANT	0,23	0,06	- 0,13
Vives-Eaux - La Cave	MONTANT	0,15	0,06	- 0,09
	AVALANT	0,16	0,05	- 0,06

Ces résultats font apparaître que les coefficients α et β augmentent lorsque le temps de navigation nécessaire aux bateaux pour joindre l'écluse initiale à l'écluse finale diminue. Ceci s'explique par le fait que, lorsque le temps de navigation est faible, la majorité des bateaux entrés en bief

pendant une période, arrivent à l'écluse finale du bief pendant la même période. De même, parmi les bateaux présents en bief au début d'une période, la proportion de bateaux en attente à l'écluse est d'autant plus élevée que le temps de navigation est court.

Le temps moyen de franchissement du bief semble donc bien dépendre de la longueur moyenne de la file d'attente. L'influence de l'arrivée d'un bateau supplémentaire est mesurée par le coefficient de régression de l'une des variables : nombre de sortis de bief ou nombre de départs en bief, puisque ces coefficients sont théoriquement égaux, au signe près. Choisisant donc la variable pour laquelle la mesure a été effectuée avec le plus de précision, c'est-à-dire, en général, le nombre de sortis de bief, nous pouvons écrire que l'introduction d'un bateau supplémentaire a pour conséquence une augmentation du temps moyen de franchissement du bief ΔT donnée dans le tableau suivant :

		ΔT (1/100 heure)	ΔT (minute)
BIEF de COUDRAY - VIVES-EAUX	Trafic montant	+ 0,16	10
	Trafic avalant	+ 0,13	8
BIEF de VIVES-EAUX - LA CAVE	Trafic montant	+ 0,09	6
	Trafic avalant	+ 0,06	4

II.3.3. Résultats des corrélations : Canal Saint-Denis

Grâce à la plus grande précision du dépouillement des tableaux de marche, on a pu effectuer sur le canal Saint-Denis un nombre de régressions multiples plus important que sur la Haute-Seine.

Ces régressions ont porté sur un nombre double de variables indépendantes, puisqu'il a été possible de distinguer les deux catégories de bateaux en présence.

Les régressions ont été effectuées tout d'abord sur chaque bief, sans distinction de périodes, ce qui a permis de disposer de 276 observations, (46 jours x 6 périodes). On a ensuite distingué les périodes les unes des autres, ne conservant ainsi que 46 observations par régression, pour tenter d'isoler des ensembles d'observations aussi homogènes que possible.

Dans chaque cas, deux régressions multiples par série d'observations ont été réalisées, la variable liée représentant le temps de franchissement du bief successivement pour chacun des deux types de bateaux.

La situation particulière du canal Saint-Denis appelle quelques observations préliminaires :

- 1) - Chaque groupe d'écluses ne comporte que deux écluses, une grande et une petite. Chaque écluse, quelle que soit sa taille, ne peut contenir qu'un seul bateau.
- 2) - Les biefs sont extrêmement courts. Leur longueur est, en général, de l'ordre du kilomètre, c'est-à-dire que le temps de navigation pour les franchir est très petit par rapport à la durée de la période.

La plupart des bateaux entrés en bief, arrivent donc à l'écluse finale du bief au cours de la même période.

- 3) - Le nombre de bateaux, partis ou arrivés en bief, est en général extrêmement faible.

Les coefficients de régression partant sur les variables correspondantes ne peuvent donc raisonnablement être obtenus avec une précision admissible.

Les résultats des régressions sont notés dans les tableaux III-A et III-B. Dans ces tableaux, $R P i$, $R E i$, $R S i$ indiquent les valeurs des coefficients de régression attachés aux variables $N P i$ (nombre de présents), $N E i$ (nombre d'entrés), $N S i$ (nombre de sortis), i variant de 1 à 2 et donnant le type de bateau auquel sont attachées les variables. On a porté en outre, pour chaque régression, la valeur des variables $N S 1$ et $N S 2$ dont la somme peut être utilisée pour mesurer l'encombrement approximatif du bief, puisqu'elle mesure le nombre total de bateaux passés à l'écluse. On a également noté le coefficient de corrélation multiple C.M. attaché à chaque régression, C.M. mesurant la valeur des résultats de la régression.

La précision des résultats n'étant pas toujours suffisante, on n'a porté dans les tableaux que les coefficients de régression dont l'erreur relative ne dépassait pas 40%.

Dans la dernière colonne des tableaux enfin, sous le nom de coefficient d'équivalence, on a porté la moyenne des rapports :

$$\frac{R P 2}{R P 1}, \frac{R E 2}{R E 1}, \frac{R S 2}{R S 1}$$

Ces résultats permettent de retrouver les formules du § III-1. Compte tenu de la précision des résultats, en effet,

on constate bien que le temps de franchissement d'un bief par un bateau semble varier comme l'expression ;

$$L = \frac{1}{2} ((1 + \alpha) \times N P + \beta \times N E - N S)$$

α et β étant deux coefficients compris entre 0 et 1, L représentant la longueur de la file d'attente d'un type de bateau à l'écluse finale du bief. On peut en déduire que :

- 1) - L'introduction d'un bateau de type 1 supplémentaire dans un bief a pour conséquence une perte de temps moyenne égale à :

0,201 heure, soit : 12 minutes pour les bateaux de type 1,

0,185 heure, soit : 11 minutes pour les bateaux de type 2.

- 2) - L'introduction d'un bateau de type 2 supplémentaire dans un bief a pour conséquence une perte de temps moyenne égale à :

0,400 heure, soit : 24 minutes pour les bateaux de type 1,

0,418 heure, soit : 25 minutes pour les bateaux de type 2.

Mais ces valeurs ne sont que des valeurs moyennes, calculées sur l'ensemble des quatre biefs et des six périodes enquêtées. Il ne peut être question d'en déduire des coefficients d'équivalence entre les deux types de bateaux, car ceux-ci seraient sans signification. L'encombrement des biefs est, en effet, très variable, selon les régressions effectuées.

Il est par contre intéressant de rechercher quelle est la variation, avec l'encombrement des biefs, de l'influence d'un bateau supplémentaire sur les temps de franchissement des biefs.

On a choisi, pour mesurer l'encombrement du bief, la variable : $N S = N S 1 + N S 2$ qui est égale au nombre total de bateaux ayant franchi l'écluse au cours d'une période. Cette variable mesure, en effet, le degré d'utilisation de l'écluse, puisqu'elle est égale au nombre moyen de bassinées effectuées au cours des périodes enquêtées.

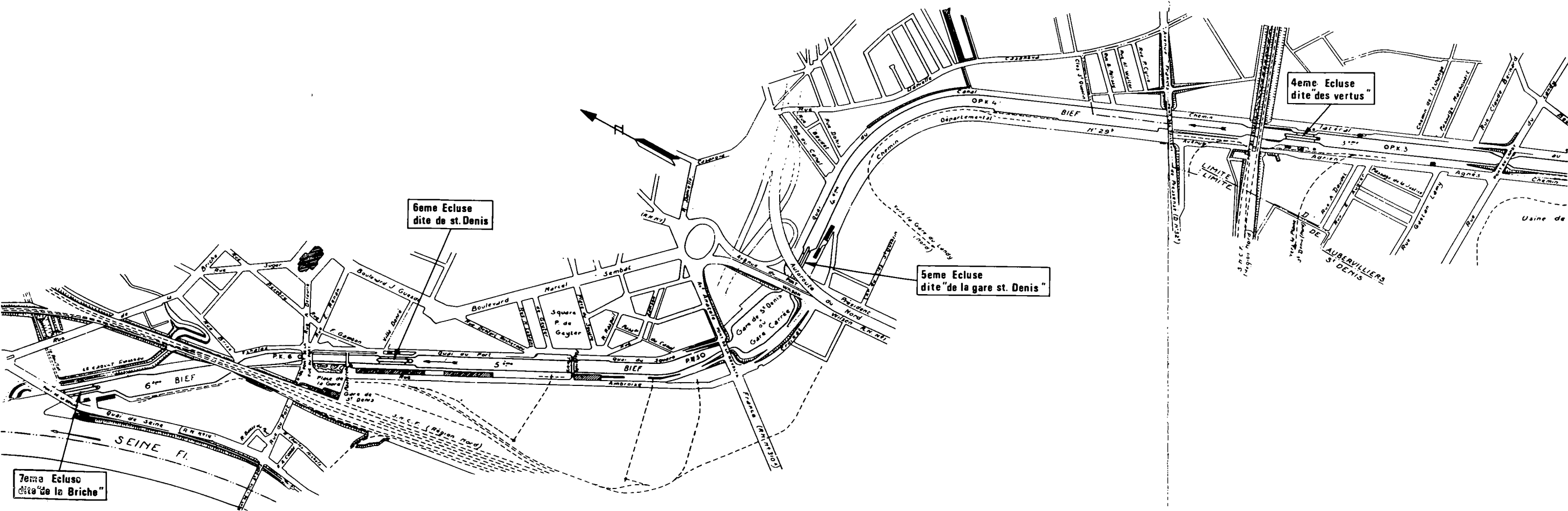
On a représenté sur le graphique III-C la variation de ces coefficients en fonction de l'encombrement.

Ces résultats permettent les remarques suivantes :

1) - Le coefficient d'équivalence relatif aux bateaux de type 2 (grands bateaux) est toujours supérieur au coefficient d'équivalence relatif aux bateaux de type 1 (petits bateaux).

En d'autres termes, les grands bateaux sont beaucoup plus gênés par les bateaux de leur type que par les petits bateaux. Au contraire, les bateaux de type 1 et 2 influencent de façon sensiblement plus équilibrée les temps de franchissement des petits bateaux. Cela peut s'expliquer par le fait que les grands bateaux ne peuvent passer que par les grandes écluses et perdent donc beaucoup de temps lorsqu'ils sont précédés par un bateau du même type, tandis que les petits bateaux passent dans n'importe quelle écluse et ne sont donc pas beaucoup plus gênés par un grand bateau que par un petit bateau.

2) - Les coefficients d'équivalence décroissent rapidement, pour les deux types de bateau, lorsque l'encombrement du bief augmente. Pour un fort encombrement, le coefficient d'équivalence relatif aux petits bateaux peut même descendre en dessous de l'unité, puisqu'un grand bateau, qui doit attendre l'ouverture de la grande écluse, est susceptible de laisser sa place à un petit bateau qui le suit, si la petite écluse s'ouvre la première.



Canal Saint-Denis - Trafic Montant - Résultats des régressions

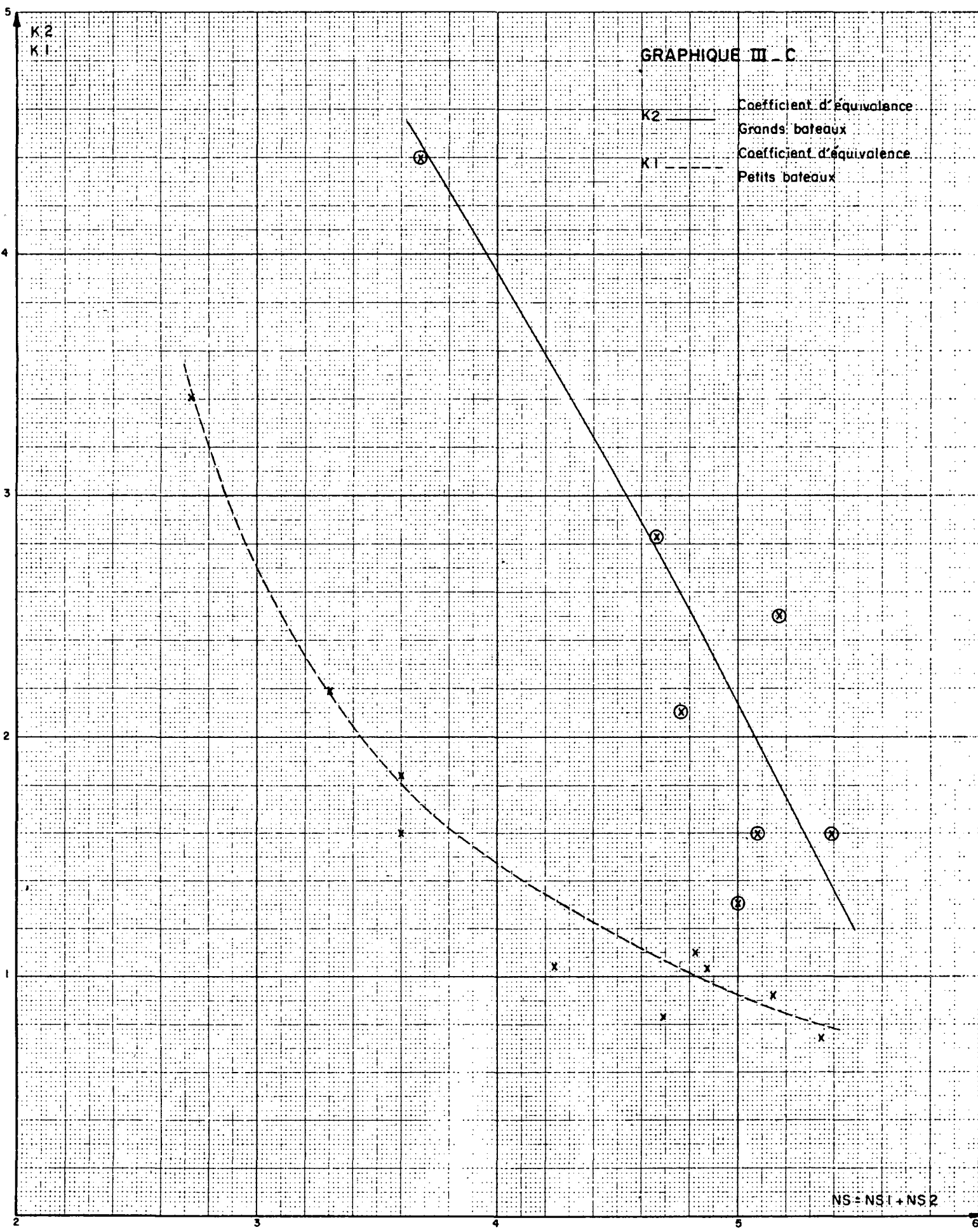
Analyse du temps de franchissement des petits bateaux

Bief	Période	Type	R P 1	R E 1	R S 1	R P 2	R E 2	R S 2	N S 1	N S 2	N S 1 + N S 2	C.M.	Coefficient d'équivalence
3	-	1	0,37	0,14	0,23	-	-	-	2,76	0,55	3,31	0,663	-
5	-	1	0,29	0,12	0,16	0,22	0,11	- 0,15	3,85	0,82	4,67	0,902	0,85
6	-	1	0,34	-	0,24	0,35	0,13	- 0,26	4,00	0,86	4,86	0,929	1,05
3	1	1	0,38	0,19	0,25	1,27	0,69	- 0,82	2,29	0,44	2,73	0,872	3,40
3	3	1	0,29	0,13	0,22	0,62	0,21	- 0,40	2,97	0,60	3,57	0,935	1,85
3	4	1	0,39	-	0,21	0,59	0,19	- 0,36	2,85	0,74	3,59	0,891	1,60
3	5	1	0,25	0,09	0,12	0,55	-	-	2,68	0,62	3,30	0,867	2,20
6	1	1	0,33	-	0,15	0,25	-	-	4,41	0,93	5,34	0,954	0,75
6	2	1	0,33	-	0,13	-	-	-	4,18	1,25	5,43	0,964	-
6	3	1	0,36	0,13	0,22	0,33	-	- 0,21	3,99	1,15	5,14	0,977	0,92
6	4	1	0,39	-	0,18	-	-	-	3,75	1,11	4,86	0,957	-
6	5	1	0,35	-	0,30	0,40	-	- 0,31	3,93	0,89	4,82	0,886	1,10
6	6	1	0,26	-	-	0,80	0,44	- 0,68	3,68	1,06	4,74	0,944	3,10
Moyenne			0,333	0,133	0,201	0,538	0,295	- 0,399	-	-	-	-	1,68

Canal Saint-Denis - Trafic montant - Résultat des régressions

Analyse du temps de franchissement des grands bateaux

Bief	Période	Type	R P 1	R E 1	R S 1	R P 2	R E 2	R S 2	N S 1	N S 2	N S 1 + N S 2	C.M.	Coefficient d'équivalence
3	-	2	0,28	-	- 0,17	-	-	-	2,65	1,00	3,65	0,545	-
5	-	2	0,27	0,08	- 0,10	0,49	0,19	- 0,21	3,56	1,20	4,76	0,797	2,10
6	-	2	0,33	0,07	- 0,22	0,52	-	- 0,36	3,84	1,24	5,08	0,899	1,60
3	3	2	0,21	0,08	- 0,16	0,94	0,43	- 0,53	2,74	0,93	3,67	0,936	4,40
6	1	2	0,31	-	-	-	-	-	4,36	1,08	5,44	0,869	-
6	2	2	0,28	-	- 0,17	0,40	-	- 0,30	4,07	1,32	5,39	0,910	1,60
6	3	2	0,30	-	- 0,20	0,70	-	- 0,53	3,79	1,38	5,17	0,930	2,50
6	4	2	0,39	-	- 0,16	-	-	-	3,58	1,25	4,83	0,943	-
6	5	2	0,40	-	- 0,30	0,51	-	- 0,38	3,90	1,10	5,00	0,900	1,30
6	6	2	0,28	-	-	0,80	0,39	- 0,62	3,36	1,30	4,66	0,934	2,85
Moyenne			0,305	-	- 0,185	0,745	0,333	- 0,418	-	-	-	-	2,33



- 36 -

- 36 -

- 36 -

Chapitre III

Enquête sur la navigation de la Basse-Seine

III.1. Situation et Déroulement de l'enquête

L'enquête effectuée sur la Basse-Seine a eu pour but de déterminer en premier lieu un certain nombre de coefficients numériques nécessaires au fonctionnement du modèle de simulation décrit aux chapitres IV et V du présent rapport et ensuite d'obtenir une description aussi fidèle que possible de l'état de la navigation sur la Basse-Seine, ceci en vue de tester les résultats fournis par le modèle.

La Basse-Seine comporte cinq groupes d'écluses de Paris à Rouen : Bougival - Chatou, Andresy - Carrières-sous-Poissy, Méricourt, Notre-Dame-de-la-Garenne, Amfreville, dont les positions et les dimensions sont données sur la carte jointe.

L'enquête s'est déroulée du 28 novembre au 14 décembre 1966 aux écluses de Bougival, Andresy, Carrières-sous-Poissy et Méricourt. A chaque groupe d'écluses, un enquêteur notait, pour chaque bateau posé et pour chaque sens, un certain nombre de renseignements destinés à l'identifier et à déterminer exactement ses différents temps de passage à l'écluse. 14 jours pleins ont pu être enquêtés pour l'ensemble des groupes d'écluses, chaque jour entre 8 heures et 16 heures. L'enquête a dû être interrompue le 15 décembre, par suite des crues de la Seine.

III.2. Description des données

Les enquêteurs ont disposé pendant l'enquête de feuilles de relevés dont le modèle est donné ci-joint.

CARTE DE LA BASSE SEINE

Ecluses d'Amfreville

M.E 140 x 12
G.E 220 x 17

Ecluses de N.D. de la Garenne

P.E 40 x 8
M.E 140 x 12
+ 80 x 5
G.E 160 x 12

Ecluses de Mericourt

M.E 160 x 12
G.E 160 x 17

Ecluses de Carrières

P.E 40 x 8
M.E 140 x 12
+ 80 x 5

Ecluse d'Andresy

160 x 12

Ecluses de Bougival

P.E 40 x 8
M.E 120 x 12
G.E 220 x 12
+ 120 x 5

PARIS

[illegible]

Ces feuilles ont été préparées de façon à ce que les résultats puissent être transcrits directement sous forme de cartes perforées en vue d'un traitement par ordinateur.

Chaque bateau correspond à une ligne, les bateaux d'une même bassinée étant inscrits sur des lignes successives. A chaque changement de bassinée ou d'écluse, un trait horizontal sépare les bateaux.

Les renseignements notés étaient de deux types :

III.2.1. Identification des bateaux

Chaque bateau a été repéré par son numéro matricule, son nom, le nom de sa compagnie, sa destination, son chargement et enfin son type (automoteurs de canal ou de Seine, pousseurs et nombre de barges, caboteurs, remorqueurs et nombre de tractionnés, engins de chantiers, etc ...).

III.2.2. Temps de passage

Cinq temps de passage pour chaque bateau ont été notés par les enquêteurs :

- Heure d'arrivée au garage, c'est-à-dire heure à laquelle le bateau s'est introduit dans le file d'attente.
- Heure d'entrée dans l'écluse, c'est-à-dire heure à laquelle l'avant du bateau a franchi les portes de l'écluse en entrant.
- Heure de fermeture des portes de l'écluse.
- Heure d'ouverture des portes de l'écluse.
- Heure de sortie de l'écluse, c'est-à-dire heure à laquelle l'avant du bateau a franchi les portes de l'écluse en sortant.

Dans la mesure du possible, les enquêteurs notaient également l'heure prévue d'arrivée à l'écluse suivante, lorsque le bateau concerné devait parcourir le bief entier.

Enfin, chaque bassinée était repérée par le numéro de l'écluse correspondante.

III.3. Dépouillement des résultats

Le dépouillement a été exécuté sur ordinateur IBM 1130 à l'aide d'un programme permettant de retrouver un même bateau aux différentes écluses qu'il rencontrait par comparaison des noms, matricules et types de tous les bateaux enquêtés. Dans les cas douteux, une intervention de l'opérateur était prévue, destinée à corriger les erreurs éventuelles des enquêteurs.

Le dépouillement a porté successivement sur chaque jour et chaque sens de parcours, les résultats journaliers étant stockés pour une récapitulation générale en fin d'exploitation.

Deux types de résultats ont été obtenus : des résultats nécessaires à l'exploitation du modèle de simulation et des résultats annexes destinés à fournir une image du trafic existant sur la Basse-Seine.

III.3.1. Répartition des bateaux par type

Les tableaux A-1 et A-2 donnent pour chaque sens de navigation, pour chaque écluse et pour chacun des types de bateaux, le nombre de bateaux enregistrés durant les 14 jours enquêtés. Ces résultats permettent de déterminer le nombre moyen journalier d'arrivées à un groupe d'écluses pour chaque type de bateau.

III.3.2. Lois d'arrivée

a) Généralités

Ces lois sont nécessaires pour le fonctionnement du modèle de simulation puisqu'elles régissent l'introduction des bateaux dans le modèle.

Les calculs ont été menés à partir de l'heure d'arrivée au garage notée pour chaque bateau sur les feuilles d'enquête.

La période enquêtée, c'est-à-dire la journée ou la demi-journée, selon les cas, a été divisée en un certain nombre d'intervalles unitaires de durée θ . Pour chaque période d'enquête, le nombre d'intervalles au cours duquel on avait noté 0, 1, 2, ... n arrivées de bateaux présentant des caractéristiques données a été compté. A la fin de l'enquête, on a donc obtenu des résultats donnant la probabilité pour que l'on ait n arrivées de bateaux d'une catégorie donnée dans un intervalle de temps de durée θ , soit $P_{\theta}(n)$.

Pour ces calculs, les bateaux ont été divisés en quatre catégories : automoteurs de canal, automoteurs de Seine, pousseurs, autres. De plus, on a distingué les arrivées de bateaux partis en bief, c'est-à-dire non reconnus à une écluse précédente, de l'ensemble des arrivées (sans distinction d'origine du bateau).

La période enquêtée s'est établie à la journée entière avec un intervalle unitaire de 10 minutes ou deux heures lorsque l'on a enquêté tous les bateaux sans distinction d'origine.

On a, par contre, distingué le matin et l'après-midi pour les bateaux partis en bief, l'intervalle unitaire étant de 10 minutes pour le trafic avalant et de 30 minutes pour le trafic montant.

Les résultats sont présentés dans les tableaux B-1 et B-2. Ces résultats montrent que la loi observée s'écarte sensiblement d'une loi de Poisson de même moyenne, et qu'en particulier les bateaux semblent se déplacer en groupes.

b) Forme des lois d'arrivée

Soit e la variable aléatoire constituée par l'écart entre deux arrivées et $\pi(x)$ la fonction de répartition de e .

$$\pi(x) = \text{Probabilité } (e > x)$$

La simulation de l'arrivée des bateaux à une écluse ne peut s'effectuer que si l'on connaît cette fonction $\pi(x)$ qu'il faut donc déduire des données de l'enquête : $P_{\theta}(n)$.

Pour une loi de Poisson parfaite, correspondant à un nombre moyen d'arrivées λ sur l'intervalle de temps unité, on peut écrire :

$\pi(x) = e^{-\lambda x}$, soit la probabilité pour qu'aucun bateau n'arrive dans l'intervalle de temps de durée x .

La fonction $\pi(x)$ correspondant à la loi observée doit être légèrement différente et présente en particulier un point d'inflexion, puisque la probabilité d'avoir des écarts plus petits entre bateaux, pour une même moyenne, est plus forte dans ce cas réel. (cf. Graphique B-3).

Les aires délimitées par les deux courbes, doivent être égales puisqu'elles sont égales à l'écart moyen entre deux arrivées.

Il s'agit donc de déterminer $\pi(x)$ à l'aide d'une fonction algébrique approchée qui vérifie, outre la condition de moyenne ci-dessus :

$$\left. \begin{aligned} P_{\theta}(0) &= \pi(\theta) \\ P_{\theta}(1) &= \int_0^{\theta} p(x) \pi(\theta - x) dx \\ P_{\theta}(2) &= \int_0^{\theta} p(x) \times \int_x^{\theta} p(y) \times \pi(\theta - y) dy dx \\ \text{etc ...} \end{aligned} \right\} \text{ Avec : } p(x) = -\frac{d\pi}{dx}$$

On a cherché pour $\pi(x)$ une approximation par une cubique.

$$\pi(x) = 1 - A x^3 - B x^2 - C x$$

Avec les conditions :

$$P_{\theta}(0) = 1 - A\theta^3 - B\theta^2 - C\theta$$

$$P_{\theta}(1) = (A + B + C) - \left(\frac{A^2}{20} + \frac{B^2}{6} + \frac{C^2}{2} + \frac{AB}{5} + \frac{AC}{2} + \frac{2BC}{3} \right) \text{ pour } \theta=1$$

équation issue de la définition de $P_{\theta}(1)$

La fonction $\pi(x)$ a été ajustée sur le cas suivant :

- Arrivées à Carrières entre 8 heures et 12 heures (trafic avalant)
- Intervalle de temps = 10'
- Bateaux de type automoteurs de canal partis en bief.

L'enquête avait donné : $P(0) = 0,463$

$P(1) = 0,338$

$P(2) = 0,133$

avec une moyenne : $\lambda = 0,822$ sur 10' d'intervalle.

En prenant comme unité de temps l'intervalle de 10 les coefficients A, B, C, ont pu être calculés :

$$A = 0,130 \quad B = - 0,59 \quad C = 1,00$$

$\pi(x)$ s'annule pour $x = 2,8$ (soit 28')

L'aire délimitée par la courbe étant égale à 1,20, la moyenne du nombre d'arrivées est $\lambda = \frac{1}{1,20} = 0,83$, alors que la moyenne réelle est : 0,822.

Cette formule de $\pi(x)$ permet d'autre part de retrouver :

$$\begin{array}{ll} P'_{\theta}(0) = 0,460 & P_{\theta}(0) = 0,463 \\ & \text{contre des valeurs réelles :} \\ P'_{\theta}(1) = 0,330 & P_{\theta}(1) = 0,338 \end{array}$$

Alors que les valeurs que l'on obtiendrait si la loi était une loi de Poisson sont :

$$\begin{array}{l} P_{\theta}(0) = 0,440 \\ P_{\theta}(1) = 0,362 \end{array}$$

Pour étendre cette loi à d'autres cas, on fait les hypothèses suivantes, sous réserve de vérifications a posteriori :

- A moyenne égale, les lois $\pi(x)$ sont **indépendantes** de l'écluse enquêtée (Bougival, Carrières, Andrésy, Méricourt).
- Les lois d'arrivée correspondant à deux moyennes différentes λ_1 et λ_2 se déduisent l'une de l'autre par une affinité de rapport λ_2/λ_1 (ce qui revient à supposer que les lois ont la même forme, mais qu'il faut faire une correction pour que l'écart moyen corresponde à la moyenne).

Dans ces conditions, on peut écrire :

$$\pi(x) = 1 - A \times \lambda^3 \times x^3 - B \times \lambda^2 \times x^2 - C \times \lambda \times x$$

si x est exprimé en minutes et λ en moyenne d'arrivées par heure :

$$A = 1,043 \times 10^{-6} \quad B = 2,364 \times 10^{-4} \quad C = 2,002 \times 10^{-2}$$

Ces formules peuvent être vérifiées sur un certain nombre de cas représentatifs de plusieurs écluses et de plusieurs catégories de bateaux. La comparaison fait apparaître les chiffres suivants pour plusieurs valeurs de la moyenne λ .

RESULTATS

λ	P (0) calculé	P (0) mesuré	P (1) calculé	P (1) mesuré
4,932	0,458	0,463	0,320	0,338
0,792	0,858	0,883	0,133	0,100
0,288	0,944	0,961	0,054	0,038
2,616	0,620	0,666	0,290	0,252
0,480	0,909	0,911	0,086	0,080
5,094	0,457	0,455	0,322	0,327

Compte tenu de la précision des mesures, la comparaison peut être considérée comme satisfaisante, et on peut estimer que les hypothèses faites plus haut sur la forme de la fonction $\pi(x)$ lorsque l'on change d'écluse ou lorsque la moyenne du nombre d'arrivée varie, sont justifiées.

c) Utilisation des lois d'arrivée dans le modèle

La fonction $\pi(x)$ trouvée se présentant sous la forme d'un polynôme du 3^e degré, le calcul exact de l'écart aléatoire x entre deux arrivées en fonction d'un nombre π tiré au hasard s'avère assez lourd pour le fonctionnement du modèle.

On a donc représenté la fonction $\pi(x)$ calculée plus haut par une série de 4 segments de droites. Grâce à cette simplification, le calcul de l'écart entre deux arrivées, à partir d'un nombre tiré au hasard, se fait beaucoup plus facilement, à l'aide de formules linéaires, (graphique B-3, donnant $\pi(x)$ pour $\lambda = 1$).

λ étant toujours la moyenne horaire du nombre d'arrivées, x étant l'intervalle exprimé en minutes entre deux arrivées, on peut définir les segments suivants :

$\lambda \times x$	0	30	70	110	145
π	1,000	0,565	0,400	0,275	0,000

III.3.3. Temps de mise en place

a) Définitions

Le temps de mise en place d'une bassinée à l'entrée, ou temps d'introduction est défini comme le temps qui s'écoule entre le moment où le premier bateau qui entre franchit les portes de l'écluse et le moment où les portes de l'écluse se ferment.

Le temps de mise en place d'une bassinée à la sortie, ou temps d'évacuation est défini comme le temps qui s'écoule entre le moment où les portes de l'écluse s'ouvrent et le moment où le dernier bateau de la bassinée franchit les portes de l'écluse en sortant.

Les temps mesurés sont donc des temps globaux de mise en place pour l'ensemble des bateaux d'une bassinée.

b) Résultats

Pour appréhender la part de chaque bateau dans les temps globaux de mise en place, il a été effectué un certain nombre de régressions linéaires sur ces temps, les variables indépendantes étant les suivantes :

N1 = nombre d'automoteurs de canal de la bassinée,
 N2 = nombre d'automoteurs de Seine de la bassinée,
 N3 = nombre de convois poussés de la bassinée.

A chaque bassinée, on a fait correspondre une observation. On a pu ainsi aboutir aux formules suivantes, dont la précision peut être estimée, dans chaque cas, par le coefficient de corrélation multiple attaché à chaque régression.

Les temps sont exprimés en minutes.

	Coefficient de corrélation multiple
<u>Grande écluse de Méricourt</u>	
Entrée : $T = 1 + 2 \times N1 + 2,5 \times N2 + 3 \times N3$	0,72
Sortie : $T = N1 + N2 + N3$	0,82
<u>Moyenne écluse de Méricourt</u>	
Entrée : $T = 3 (N1 + N2 + N3)$	0,80
Sortie : $T = N1 + N2 + N3$	0,78
<u>Grande écluse de Carrières</u>	
Entrée : $T = 3 \times N1 + 4 \times N2 + 6 \times N3 - 1$	0,89
Sortie : $T = N1 + 2 \times N2 + 2 \times N3$	0,71
<u>Petite écluse de Carrières</u>	
Entrée : $T = N1 + N2$	1,00
Sortie : $T = N1 + N2$	1,00

L'exploitation de ces résultats n'a pu être faite à Bougival. Quant à Andrésy, les coefficients de corrélation multiple sont trop faibles pour autoriser une conclusion valable.

Ces résultats montrent bien que le temps d'introduction est nettement supérieur au temps d'évacuation, ce qui s'explique facilement. Pour la petite écluse de Carrières, où l'on ne peut faire passer qu'un seul bateau à la fois, les temps d'introduction et d'évacuation ont presque toujours été trouvés égaux à une minute.

III.3.4. Temps d'inversion

Le temps d'inversion est défini comme le temps qui s'écoule entre la fermeture des portes de l'écluse et l'ouverture de ces portes après que le sas a été rempli ou vidé.

Les résultats sont présentés sous forme d'histogrammes pour chaque écluse et pour chaque sens, sauf pour Bougival. Les graphiques D-2 à D-6 donnent les histogrammes complets pour toutes les bassinées enregistrées pendant les 14 jours d'enquête. Le tableau D-1 donne le nombre de bassinées enregistrées pour chaque écluse et dans chaque sens, ainsi que la moyenne du temps d'inversion. Les fausses bassinées ne sont pas comprises.

III.3.5. Temps de parcours

Chaque fois que le dépouillement a permis de retrouver un bateau à deux écluses successives, le temps de parcours de ce bateau a été mesuré. Les résultats de l'ensemble de l'enquête ont été cumulés sous forme d'histogrammes de temps de parcours en bief, à raison d'un histogramme par sens et par itinéraire. Les quatre itinéraires enquêtés étant : Bougival - Andrésy, Bougival - Carrières, Carrières - Méricourt, Andrésy - Méricourt.

L'intervalle unitaire a été pris égal à 20 minutes pour le trafic montant et à 10 minutes pour le trafic avalant.

Les résultats ont été regroupés sous forme d'histogrammes de vitesses en bief, à raison d'un histogramme par sens de parcours et par catégorie de bateaux, (graphique E-3 à E-5).

Les résultats sont assez dispersés. Néanmoins, une étude détaillée sur chaque jour de l'enquête a permis de montrer que les catégories utilisées pour le calcul sur l'ensemble des 14 jours regroupaient, en fait, un certain nombre de sous-catégories dont on peut distinguer les vitesses.

En fonction de ces premiers résultats, une enquête complémentaire effectuée à Bougival du 15 au 24 février 1966 a permis d'attribuer, à chaque catégorie de dimension distinguée dans le modèle de simulation, une ou deux vitesses, avec, pour le cas de deux vitesses, une certaine probabilité pour chacune d'entre elles, (tableau E-1).

Les résultats montrent que si les vitesses sont relativement variables pour le trafic avalant, elles le sont beaucoup moins pour le trafic montant. On a d'ailleurs cherché à relier les vitesses journalières à la vitesse du courant. Les résultats ne peuvent que qualitatifs, faute de mesures précises sur la vitesse du courant pendant la durée de l'enquête. Néanmoins, ils font apparaître une augmentation sensible de la vitesse pour le trafic avalant (graphique E-2) entre le début et la fin de l'enquête, alors que la vitesse du trafic montant n'accuse pas de nette modification, les bateaux semblant compenser l'effet du courant par une augmentation de la puissance utilisée de leurs moteurs.

III.3.6. Résultats annexes

L'enquête sur la Basse-Seine a permis d'obtenir, en sus des paramètres indispensables pour le modèle de simulation, un certain nombre de résultats permettant de décrire, jour par jour, l'état de la navigation, le but de ces résultats étant de permettre d'ajuster le modèle de simulation sur la réalité.

a) Histogrammes de temps d'attente

Le temps d'attente de chaque bateau a été mesuré comme la différence entre l'heure d'arrivée au garage et l'heure d'entrée dans l'écluse. Le programme de dépouillement a permis d'obtenir sur l'ensemble de l'enquête, pour chaque type de bateau, pour chaque écluse et pour chaque sens, des histogrammes de temps d'attente gradués de 3 en 3 minutes. Les résultats sont résumés dans les tableaux F-1 et F-2 qui donnent, dans chaque cas, le nombre de bateaux dont le temps d'attente a été mesuré, la moyenne et la médiane du temps d'attente.

b) Description des bassinées

Le programme de dépouillement a permis d'obtenir, pour chaque jour enquêté et pour chaque sens, le nombre de bateaux passés, le nombre de fausses bassinées et la description de toutes les bassinées à chaque écluse, c'est-à-dire la liste des bateaux passés à chaque mouvement de chaque écluse. Ces résultats sont destinés à permettre de contrôler les résultats du modèle, quant à l'affectation des bateaux aux différentes écluses.