

50376  
1979  
186

50376  
1979  
186

N° d'ordre : 232

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

en vue de l'obtention du titre de

**DOCTEUR - INGÉNIEUR**

par

Pierre ANSEL

**Ingénieur E.U.D.I.L.**



**ADAPTATION D'UNE MÉTHODE DE SIMULATION  
A L'ÉTUDE D'UN TERMINAL A CONTENEURS.  
APPLICATION AU PORT RAPIDE DE DUNKERQUE**

Soutenue le 21 juin 1979 devant la Commission d'Examen

Membres du Jury :MM.

P. VIDAL

Président

L. POVY

Rapporteur

E. DEFOSSEZ

Invité

J. CELESTIN

Invité

C. LION

Invité

## A V A N T - P R O P O S

oo0oo

*Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Centre d'Automatique de l'Université des Sciences et Techniques de Lille 1, en collaboration étroite avec le Port Autonome de Dunkerque.*

*Nous tenons à adresser notre plus grande reconnaissance à Monsieur le Professeur P. VIDAL pour l'enseignement qu'il nous a d'abord dispensé et pour son accueil au sein du laboratoire d'automatique. Nous sommes particulièrement sensible à l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider notre Jury.*

*Nous adressons nos très vifs remerciements à Monsieur L. POVY, Maître de Conférence à l'Ecole Universitaire d'Ingénieurs de Lille, qui nous a suivi avec intérêt et sympathie durant toute cette étude.*

*Nous sommes très reconnaissant envers Monsieur E. DEFOSSEZ, Chef de Division du Développement du Port Rapide de Dunkerque, qui s'est intéressé à nos travaux et qui nous fait l'honneur de participer à la commission d'examen.*

*Nous tenons également à remercier Monsieur J. CELESTIN, Chef du Service Informatique et Statistique au Port Autonome de Dunkerque, qui nous a conseillé et guidé dans l'édification de ce travail.*

*Que soit remercié Monsieur C. LION, Responsable du Bureau Informatique à la Direction des Ports Maritimes et des Voies Navigables, pour avoir accepté de participer à notre Jury.*

*Nous ne saurions terminer cet avant-propos sans exprimer notre reconnaissance au personnel du Service Informatique du Port Autonome de Dunkerque pour son dynamisme et l'accueil amical qu'il nous a réservé et plus particulièrement à Madame L. DEWORME qui nous a aidé dans la réalisation matérielle de ce mémoire.*

# I N T R O D U C T I O N

## I : APPROCHE ANALYTIQUE DE L'ETUDE

### I - 1. INTRODUCTION

### I - 2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

- modélisation d'un terminal à conteneurs
- répartition des tâches entre les ports
- participation de l'E. P. I.

### I - 3. PRESENTATION D'UN TERMINAL A CONTENEURS

- les portiques de quai
- les engins de parc
- le quai
- les zones de stockage
- les conteneurs

### I - 4. ANALYSE DE FONCTIONNEMENT D'UN TERMINAL A CONTENEURS

#### *1 - 4.1 - Description de la partie maritime* -----

- les navires
- la mise à quai

#### *1 - 4.2 - Description de la partie terrestre* -----

- affectation des engins de manutention
- trajet cale  $\leftarrow\rightarrow$  parc  $\leftarrow\rightarrow$  sortie route ou voie ferrée

#### *1 - 4.3 - Trajet effectué par un conteneur de type import* -----

I - 4.4. - Trajet effectué par un conteneur de type export

I - 4.5. - Trajet effectué par un conteneur de type shifting

I - 4.6. - Moyens humains et horaires de travail

I - 5. CONCLUSION

II : OUTIL DE MODELISATION

II - 1. INTRODUCTION

II - 2. METHODOLOGIE D'UNE ETUDE DE SIMULATION NUMERIQUE

II - 2.1. - Raisons du choix de la simulation numérique

II - 2.2. - Plan d'une étude de simulation numérique

- stratégique
- technique
- opérationnel

II - 3. LES LANGAGES DE SIMULATION

II - 3.1. - G.P.S.S. (General Purpose Simulation System)

- caractéristiques générales
- fonctionnement d'un modèle écrit en GPSS

II - 3.2. - SIMSCRIPT

II - 3.3. - SIMULA

II - 3.4. - Autres langages de simulation

II - 4. CONCLUSION

III - LE MODELE DE SIMULATION

III - 1. INTRODUCTION

III - 2. LES DONNEES DU PROBLEME

III - 2.1. - Caractérisation des individus du système réel

III - 2.2. - Définition des infrastructures d'un terminal

III - 2.3. - Activité d'un terminal

III - 3. LE PROGRAMME DE SIMULATION

III - 3.1. - Généralités

III - 3.2. - La vie des navires au terminal

III - 3.3. - Les conteneurs de type import et shifting

III - 3.4. - Les conteneurs de type export et shifting

III - 3.5. - Le moniteur

- distribution de place à quai

- arrivée à quai

- mise en service des portiques et des engins de parc
- désaffectation des portiques et des engins de parc
- lancement de chargement
- module annexe

III - 3.6. - L'horloge d'activation

III - 3.7. - L'impulsion panne

III - 3.8. - L'horloge de simulation

III - 4. CONCLUSION

IV - EXPLOITATION DU MODELE

IV - 1. INTRODUCTION

IV - 2. PRESENTATION DES GRANDEURS D'ENTREE MODIFIABLES

IV - 3. RESULTATS FOURNIS PAR LE MODELE

- files d'attente, stations multiples, stations simples, tables, résultats matriciels.

IV - 4. PRESENTATION DE QUELQUES ESSAIS EFFECTUES

IV - 4.1. - Performances selon le nombre de portiques disponibles

IV - 4.2. - Performances selon la politique de manutention choisie

IV - 4.3. - Différentes politiques de mise en service des portiques

IV - 4.4. - Influence des performances des portiques de quai

IV - 4.5. - Influence des performances des engins de parc

IV - 5. UTILISATION DU MODELE POUR LE PORT RAPIDE DE DUNKERQUE-OUEST

IV - 5.1. - *Caractéristiques du port rapide*  
-----

IV - 5.2. - *Représentation du port rapide par le modèle*  
-----

(Quelques aspects de l'exploitation du modèle)

IV - 6. CONCLUSION

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

# I N T R O D U C T I O N

00000

De tout temps, le propre de l'homme a été de chercher à améliorer au maximum, selon les moyens à sa disposition, les performances des systèmes conçus par lui-même. Dans le monde actuel, certains de ces systèmes ont atteint un degré de complexité tel qu'il est parfois difficile de les appréhender globalement.

Il a donc été nécessaire de développer des outils de travail capables d'aider l'homme à comprendre le fonctionnement de ces ensembles complexes.

Depuis ces dernières années, les outils existants se sont avérés insuffisants ou tout ou moins incomplets pour analyser un certain nombre de grands systèmes que l'on rencontre principalement dans le domaine économique / AGA, CHU, KAU-1, KAU-2, MOR/.

Suite à la nécessité de plus en plus grande de dominer leur comportement, et grâce aux progrès constants réalisés dans le domaine des calculateurs modernes, on a vu apparaître progressivement la modélisation par simulation numérique. Les premières modélisations ont été effectuées, soit en langage de base, soit en langage évolué du type FORTRAN, ALGOL ...

Depuis environ une quinzaine d'années, les langages spécialisés ont subi un essor important qui a permis de représenter de façon relativement aisée les systèmes les plus complexes / GEN, IEE, SIM, KIV, UNI/.

Dans la présente étude, nous avons essayé d'adapter cette méthode de simulation à la compréhension du fonctionnement d'un terminal à conteneurs et à l'amélioration de ses performances.

Cette étude qui a été réalisée, en ce qui nous concerne, au Port Autonome de Dunkerque, coïncide dans le temps avec la mise en service d'un nouvel équipement qui pourra bénéficier si les résultats sont concluants, des avantages qu'apporte une telle modélisation.

Afin de garder un champ d'application le plus large possible au modèle que nous avons construit, nous ne nous sommes pas attachés, dans un premier temps, au cas particulier du Port de Dunkerque, mais avons élaboré un modèle général adaptable à la majorité des terminaux à conteneurs.

C'est seulement en dernière phase d'exploitation que nous abordons quelques cas de la configuration du terminal de Dunkerque et ses extensions possibles.

CHAPITRE I

---

APPROCHE ANALYTIQUE DE L'ETUDE

000

## I - 1. INTRODUCTION

Avec quelques années de retard sur les Etats-Unis d'Amérique, l'Europe tend à augmenter de plus en plus sa proportion de marchandises conteneurisées pour le transport par mer. Ces conteneurs présentent l'avantage de ne nécessiter qu'un seul type d'équipement, quel que soit leur contenu, alors que le trafic de marchandise dit : en vrac, impose un plus grand nombre d'équipements spécialisés.

Dans ce chapitre, nous allons essayer de comprendre le fonctionnement d'un terminal à conteneurs; ceci ayant pour but de le modéliser, afin de trouver les éléments modifiables susceptibles d'en améliorer les performances. Pour les Ports Français, il est important que leurs terminaux à conteneurs restent compétitifs vis-à-vis des autres ports européens.

## I - 2. OBJECTIF DE L'ETUDE

Le trafic de marchandises conteneurisées prenant une place de plus en plus grande dans le domaine des transports, il faut envisager une extension des terminaux déjà existants.

L'objet de cette étude est de réaliser un modèle de simulation d'un terminal à conteneurs. L'optique dans laquelle nous avons vu ce projet, nous permet d'envisager deux utilisations possibles.

La première consiste à améliorer l'organisation d'un terminal à partir des infrastructures déjà existantes dans le but de pouvoir accueillir un trafic plus important.

La deuxième utilisation pourrait intéresser un organisme ayant pour objectif l'installation d'un nouveau terminal. Dans ce cas, le modèle a pour but de définir, à partir du trafic envisagé, tant au point de vue quantitatif que qualitatif (ces deux grandeurs étant liées entre-elles), le matériel nécessaire à la manutention ainsi que la superficie de l'aire de stockage.

Cette étude a été décidée d'un commun accord entre le Ministère de l'Équipement (Direction des Ports Maritimes et des Voies Navigables) et les trois principaux ports de commerce français, à savoir : DUNKERQUE, MARSEILLE et LE HAVRE.

Dès la conception du projet, le Ministère de l'Équipement et les représentants des ports intéressés ont décidé de scinder cette étude en plusieurs parties.

Le Port Autonome de Marseille a eu pour objectif de réaliser le modèle de simulation d'un terminal en s'attachant plus particulièrement à la partie maritime.

Le Port Autonome du Havre n'ayant pas de moyens de calcul suffisants à sa disposition, a eu un rôle d'information et de documentation pour l'élaboration de l'étude envisagée.

En ce qui nous concerne, nous avons collaboré avec le Port Autonome de Dunkerque pour la construction d'un modèle représentant de façon superficielle la partie maritime et s'intéressant plus précisément à la gestion du parc de stockage avec ses différentes infrastructures possibles.

Nous signalons la participation de la société de service Engineering Pilote Informatique ( E P I ) qui a réalisé, sur la demande de la Direction des Ports Maritimes et des Voies Navigables, une étude économique de terminal à conteneurs.

### I - 3. PRESENTATION D'UN TERMINAL A CONTENEURS

A l'heure actuelle, le trafic des conteneurs n'est pas normalisé, en ce sens qu'il existe trois types de conteneurs. Ils se distinguent en fait par la longueur selon la compagnie qui les utilise. Les trois longueurs couramment utilisées sont : 20, 36 ou 40 pieds. On tend de plus en plus à n'utiliser que des conteneurs de 20 pieds (soit environ 6 mètres). Ces conteneurs ont tous les mêmes largeurs, soit 8 pieds (environ 2,40 mètres) en raison de leur transport par camion ou par chemin de fer.

Pour des raisons pratiques, certaines compagnies (SEALAND par exemple) préfèrent stocker leurs conteneurs en les laissant sur les remorques, afin d'éviter un certain nombre de manutentions. Ce système présente l'inconvénient d'amener des problèmes d'organisation, ainsi qu'un encombrement de l'aire de stockage beaucoup plus important.

Pour nous résumer, le trafic actuel n'est pas homogène et chaque compagnie ou presque est un cas particulier pour le terminal qui la reçoit. Ces inconvé-

nients tendent à disparaître car, certains terminaux ayant déjà des problèmes de surface de stockage, on envisage de normaliser progressivement les conteneurs, ainsi que leur mode de transport (conteneurs de 20 x 8 pieds, suppression de stockage sur remorque). Il est évident que le fait de n'avoir qu'un seul type de conteneurs, permet de supprimer des pertes de temps lors de la manutention. Pertes de temps dues principalement au changement de fourche de préhension (spreader).

Les engins de manutention utilisés sont de type assez diversifié. Pour la manutention du chargement du navire vers le quai, il existe des grues et des portiques qui diffèrent essentiellement par leur performance technique et par la zone de parc qu'ils couvrent. Pour ne prendre que deux cas extrêmes, certains portiques n'effectuent que la translation navire-quai avec éventuellement quelques places en arrière-bec, alors que d'autres (portainers) couvrent également une partie de l'aire de stockage, ce qui minimise l'utilisation des engins de parc. A notre connaissance, aucun port français n'utilise ses portainers qui représentent un investissement important; investissement qui n'est envisageable que pour un gros trafic de conteneurs. Ce type de manutention est utilisé dans des ports étrangers comme Rotterdam.

Signalons pour mémoire que quelques gros navires porte-conteneurs sont équipés de leurs propres grues qui permettent d'effectuer la manutention navire-quai et inversement.

Le nombre d'engins de manutention sur parc existant à l'heure actuelle est encore beaucoup plus grand. Nous n'en citerons que quelques uns : straddle carrier (préhension du conteneur par le côté), petit ou grand portique sur pneu (capable d'enjamber un plus ou moins grand nombre de conteneurs), ensemble tracteur-chassis, etc ... Ces engins diffèrent également par leurs performances techniques et influent en particulier sur la configuration du parc à adopter.

Sur la majorité des terminaux existants, chaque compagnie, desservant de façon régulière le port, dispose d'une certaine zone de stockage qui lui est réservée. Ces aires de stockage peuvent être organisées de plusieurs façons. Nous ne nous occuperons pas du cas particulier que nous avons déjà signalé (à savoir le stockage sur remorque).

Selon le type d'engins en service sur le terminal, on peut :

- stocker les conteneurs par rangées simples en se réservant des allées de passage. C'est souvent cette configuration qui est adoptée lorsque l'on utilise des petits portiques sur pneus.

- former des blocs de conteneurs compacts si on dispose de grands portiques.

Dans le cas des rangées simples (éventuellement doubles pour straddle-carrier), on a encore le choix entre deux dispositions possibles : soit bout à bout, soit en épi. Là le choix sera fait selon les engins dont on dispose.

Selon le type de stockage retenu, on se réserve les allées nécessaires aux manoeuvres et à la circulation des engins.

Le lecteur pourra trouver une illustration de ces différents types de stockage à la fin du présent chapitre.

En ce qui concerne le quai, on le considère souvent comme faisant une certaine longueur dont on dispose pour l'accostage des navires; ces navires étant mis l'un à la suite de l'autre avec toutefois une certaine marge de manoeuvre. La deuxième possibilité est de "fractionner" la longueur de quai utilisable en "postes à quai". Ce type d'utilisation est fréquent quand les navires susceptibles d'accoster ont tous une longueur à peu près identique. Ceci est rarement le cas pour les terminaux à conteneurs, puisque les plus petits navires (feeders) ont une longueur d'environ 80 mètres et les porte-conteneurs de troisième génération ont une longueur pouvant atteindre 280 mètres. Si la solution "postes à quai" est retenue, un navire arrivant au terminal, occupera un ou plusieurs postes à quai, selon sa longueur. Le but de ce fractionnement est de faciliter la gestion du quai, mais le taux de remplissage est nettement inférieur, en comparaison avec le premier mode de mise à quai. Le fractionnement est utilisé dans les ports qui disposent d'une longueur de quai importante par rapport au nombre de navires qu'ils accueillent.

Revenons quelques instants au stockage des conteneurs sur le parc.

Nous avons vu que, dans la majorité des cas, chaque compagnie dispose d'une certaine zone de stockage. Dans la mesure du possible, on essaiera de faire accoster le navire le plus possible en face de cette zone, de manière à minimiser le

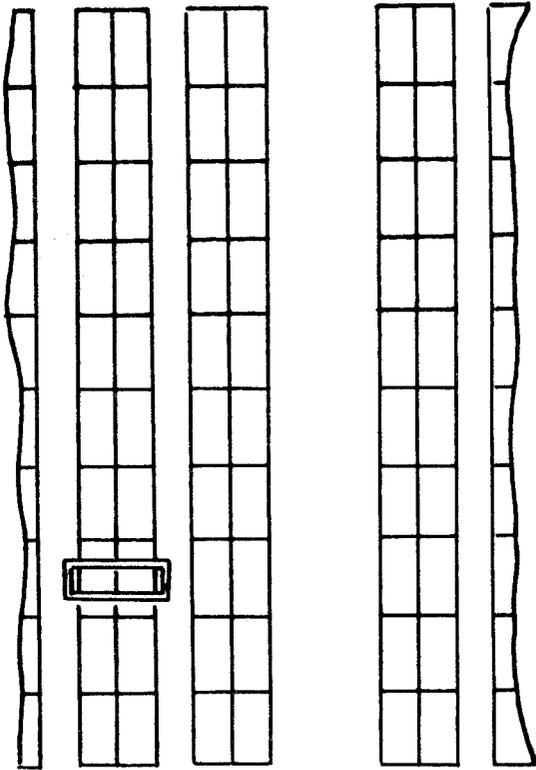
trajet que les conteneurs auront à effectuer. Le trajet de ces conteneurs va varier selon ce qu'ils contiennent.

En effet, il paraît intéressant de diviser chaque zone de stockage. On voit immédiatement que l'on a intérêt à mettre les conteneurs de type shifting (déchargés et rechargés sur le même navire pour permettre la manutention d'autres conteneurs) le plus près possible du quai et éventuellement même en arrière-bec du portique de quai, afin de ne pas nécessiter d'engins de parc.

D'autre part on réserve une zone spécifique aux conteneurs vides, car ils peuvent être gerbés (superposés) sur une hauteur plus grande que les conteneurs pleins et ils doivent être liés entre eux à cause de leur prise au vent. Ce sont les deux grands types de conteneurs que l'on peut distinguer dès à présent.

Dans les cas particuliers, on peut encore citer les conteneurs frigorifiques, les conteneurs dangereux et les conteneurs destinés aux hangars d'emportage - dépôtage ou aux ateliers de réparation.

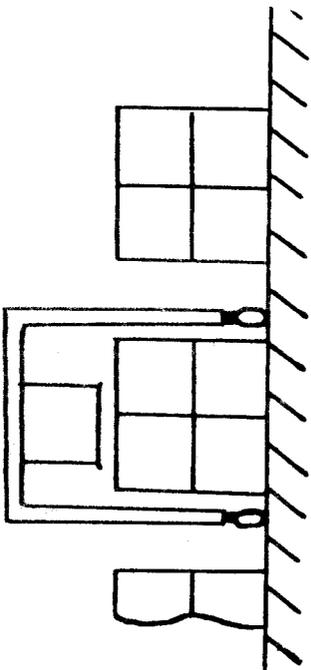
Nous venons de présenter sommairement un terminal à conteneurs, nous allons analyser dans le détail les différentes opérations nécessaires à la manutention des conteneurs en vue de construire notre modèle de simulation.



Bloc A

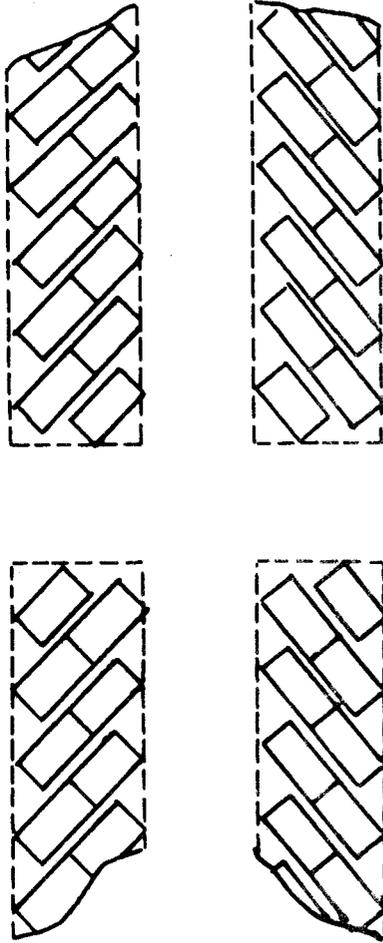
Bloc B

Vue de dessus



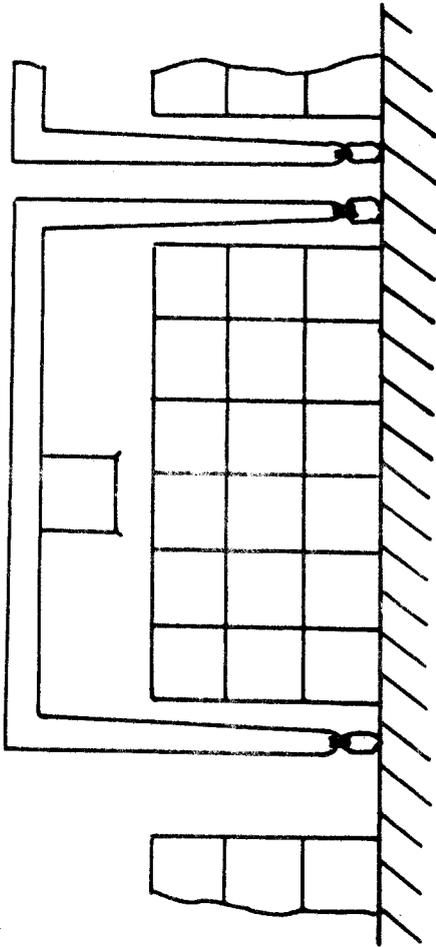
Coupe verticale

Engins prenant sur le côté ou sur le dessus

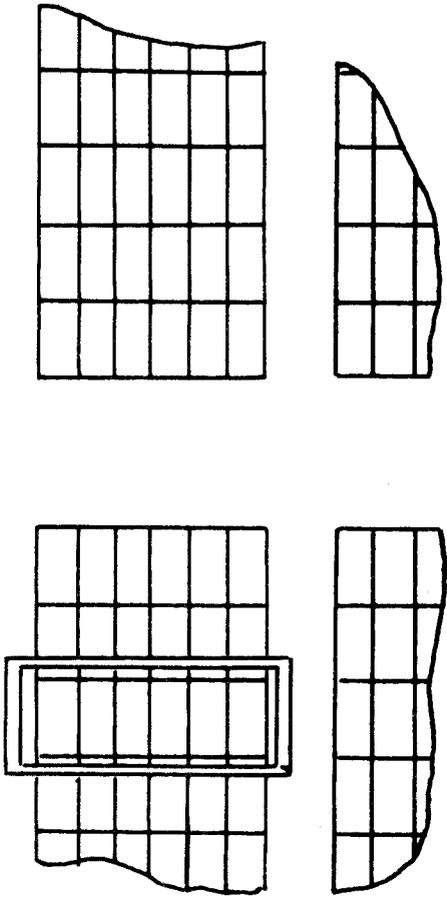


Petit cavalier prenant sur le dessus





Coupe verticale



Vue de dessus

GRAND PORTIQUE SUR PNEU

#### I - 4. ANALYSE DE FONCTIONNEMENT D'UN TERMINAL A CONTENEURS

Pour rendre le modèle de simulation le plus représentatif possible de la réalité, nous allons analyser dans le détail les différentes étapes de transition des navires et des conteneurs lors de leur passage au terminal, ainsi que les contraintes auxquelles ils sont soumis.

Notons dès à présent que dans la construction du modèle, on pourra envisager de ne faire intervenir que globalement certains aspects du problème, afin de ne pas rendre le modèle trop difficile à manipuler. En effet, il s'est avéré dans le passé, que des modèles trop détaillés étaient inutilisables à cause de leur degré de complexité.

D'autre part, le modèle n'a pas la prétention de représenter exactement, et ceci dans tous les détails, le système réel. Dans le cas du terminal à conteneurs, on doit pouvoir tester les performances globales du système lors d'une modification du matériel ou du trafic sans pour autant engager des dépenses importantes pour le système en lui-même.

#### *I - 4.1 - Description de la partie maritime*

---

L'arrivée d'un navire à un terminal est prévue environ 20 jours avant la date effective. En même temps que la compagnie avertit les autorités portuaires de l'arrivée d'un de ses navires, elle leur fournit le plan de déchargement du navire. Ce plan de déchargement contient le nombre de conteneurs qui seront à décharger au terminal ainsi qu'un certain nombre de caractéristiques concernant les conteneurs eux-mêmes, à savoir :

- marque et numéro du conteneur
- port de destination/port de provenance
- poids du conteneur
- éventuellement, données particulières pour les conteneurs frigorifiques ou dangereux (code et température de stockage).

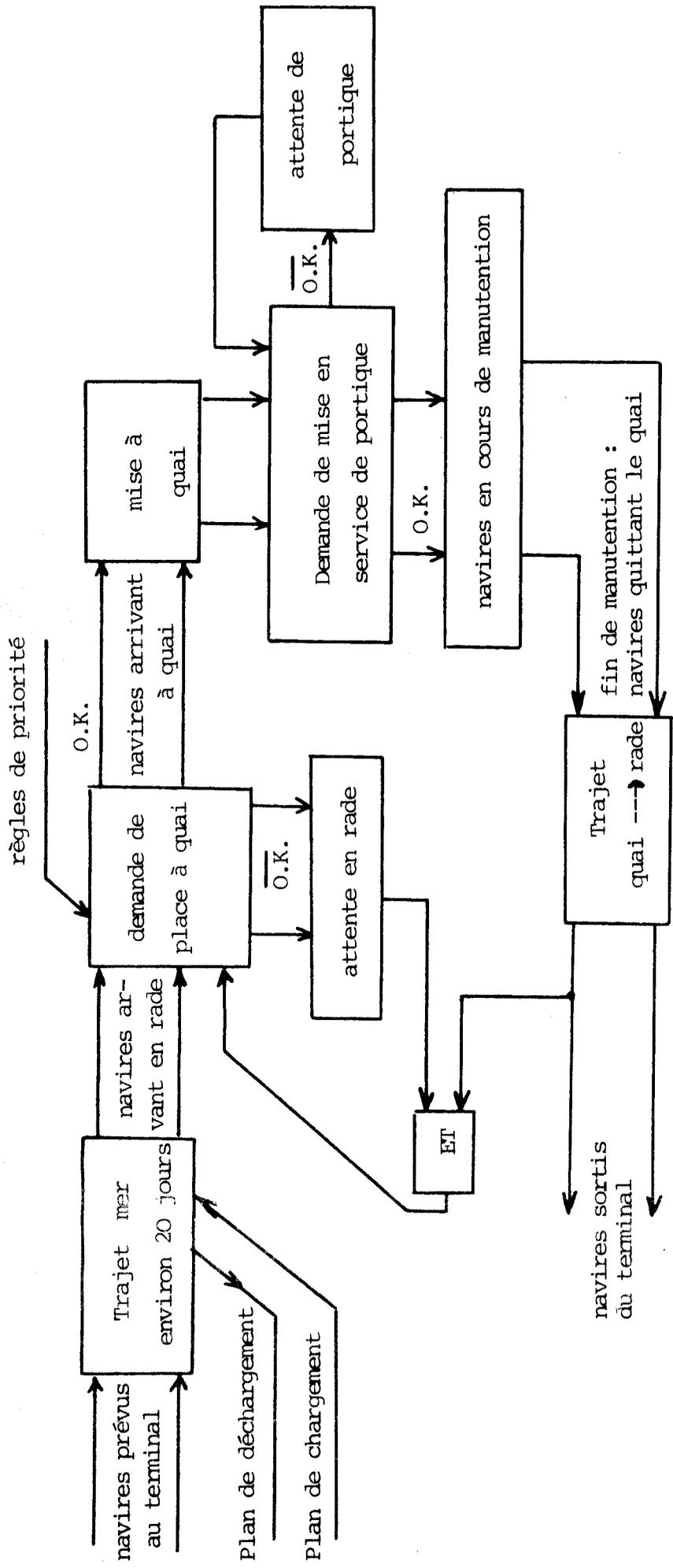
Inversement, la compagnie est tenue au courant, avec les mêmes renseignements des conteneurs qui arrivent de "l'hinterland" par route ou par voie ferrée, ce qui lui permet d'établir un plan de chargement du navire en fonction du port de destination, du poids et d'autres conditions particulières.

Ce sont ces deux plans (déchargement et chargement) qui vont décider principalement de l'emplacement qu'occupera chaque conteneur sur le parc.

La compagnie effectue une demande de place à quai, quand le navire est en rade; c'est-à-dire après ses 20 jours de trajet mer environ. Le navire effectuera les différentes manoeuvres d'accostage après un éventuel temps d'attente en rade s'il manque de place à quai. On a observé dans la réalité, que cette manoeuvre d'accostage dure environ 2 heures.

Bien entendu, il peut y avoir des règles de priorité à l'accostage quand plusieurs navires sont en concurrence au point de vue de l'obtention d'une place à quai. Ces règles de priorité dépendront essentiellement du type des navires susceptibles d'accoster. On autorisera, par exemple, en premier lieu, l'accostage du navire le plus gros, car son coût d'immobilisation est beaucoup plus élevé.

D'autre part, pour certains ports, il est nécessaire de respecter les phénomènes de marées suivant le tirant d'eau des navires en rade.



PARTIE MARITIME



## I - 4.2 - Description de la partie terrestre

---

A partir de l'instant où le navire est accosté, les opérations de manutention des conteneurs peuvent commencer. Avant de définir le trajet que va effectuer chaque conteneur, citons les trois grands types de conteneurs du point de vue de la manutention :

- les conteneurs "import" qui vont du navire vers l'intérieur du pays
- les conteneurs "shifting" que nous avons déjà signalé lors de la présentation d'un terminal
- les conteneurs "export" qui vont de l'intérieur du pays vers le navire.

Bien entendu, ces trois types de conteneurs ne font que résumer la majeure partie du trafic.

Lors de son passage sur le terminal, un conteneur utilise un ou plusieurs engins de manutention. Nous avons divisé le trajet des conteneurs en étapes élémentaires identiques pour tous les conteneurs. Ces étapes se succéderont dans un ordre dépendant du type du conteneur.

Tout d'abord, voyons l'étape de transition du navire au quai. Le conteneur utilise pour cela un portique de quai ou une grue pendant un temps que nous appellerons cycle de manutention. Il faut faire intervenir plusieurs éléments dans ce cycle, à savoir : le temps d'un cycle dit "technique" lié aux performances du portique, mais aussi des temps annexes qui sont :

- enlèvement ou remise de panneau de cale
- changement de spreader (nécessaire si on a plusieurs longueurs de conteneurs sur un même navire)
- relevage de l'avant-bec du portique, lors des changements de cale.
- saisie ou dessaisie du conteneur
- attente due au navire
- attente due à l'opérateur
- pannes du portique de quai ou du spreader (pannes de courte durée).

Au vu de l'étude économique réalisée par l'E P I en 1977, ces différentes contraintes augmentent le temps d'un cycle d'environ 28 %. On obtient ainsi ce que l'on appelle une cadence commerciale (inverse du cycle technique augmenté de 28 %). Dans le but de simplifier notre modèle, on peut envisager dès à présent de faire intervenir cette cadence commerciale au lieu de la cadence technique à laquelle il serait nécessaire de superposer toutes les contraintes citées ci-dessus. On a observé dans la réalité des cadences commerciales très diverses selon le type de portique utilisé et le port concerné.

Pour donner un ordre de grandeur, on constate couramment des cadences allant de 10 conteneurs par heure à 30 conteneurs par heure.

Avant de voir les différentes étapes de manutention sur parc, signalons que vu la diversité des engins de parc existants, nous ne ferons intervenir que des cadences commerciales basées sur les observations dans la réalité.

Nous allons "suivre" un conteneur de type import pour décrire les différentes opérations auxquelles il est soumis.

#### *1 - 4.3 - Trajet effectué par un conteneur de type import*

-----

Dès la fin de manutention navire-quai, il se présente deux possibilités.

La première est la mise sur remorque du conteneur par le portique de quai à condition toutefois que la remorque soit d'avance sous le portique.

La deuxième possibilité est de mettre le conteneur sur le quai si on ne dispose pas de remorque au moment voulu. En effet, les portiques de quai représentent un gros investissement comparés aux engins de parc; on s'efforcera donc toujours de ne pas bloquer le travail du portique.

Dans le cas où le conteneur est déposé sur le quai (en arrière-bec du portique), on voit apparaître la nécessité d'une opération supplémentaire que l'on peut diviser en trois étapes élémentaires :

- trajet d'un ensemble tracteur-remorque jusqu'au quai
- trajet d'un engin de préhension jusqu'au quai (straddle-carrier ou cavalier)
- cycle de manutention de l'engin de préhension.

L'étape suivante, et ceci dans les deux cas que nous venons de citer, est le trajet de l'ensemble tracteur-remorque vers la zone de parc où doit être déposé le conteneur. Rappelons à ce sujet qu'une place a été attribuée à chaque conteneur dès que son arrivée au terminal a été prévue, et qu'il n'y aura donc pas de perte de temps due au choix de cet emplacement.

Pendant le temps de trajet du tracteur et de la remorque, on demande à un straddle-carrier par exemple de se rendre sur le parc pour l'opération de déchargement de la remorque.

Dans le cas des terminaux disposant de portiques couvrant une partie de l'aire de stockage, cette suite d'opérations du navire au parc se déroulera en une seule étape (cycle du portique utilisé) pour un certain nombre de conteneurs stockés dans les zones les plus proches du quai.

Pour en revenir au cas le plus courant que nous avons décrit en premier, les engins de parc ont un cycle plus long que le portique de quai et les différentes étapes introduisent des retards dans la manutention. L'observation des terminaux en fonctionnement montre qu'il faut environ trois ensembles tracteur-remorque desservant un portique pour ne pas ralentir la cadence de ce dernier (le nombre de places en arrière-bec étant limité) si la distance du quai au parc est inférieure à 300 mètres.

A ce stade de leur passage au terminal, les conteneurs sont sur le parc. Ils vont y rester pendant une durée de séjour qui dépend de la fluidité du trafic avec "l'hinterland". Les conteneurs attendant un camion pour leur départ par route partiront en général dans les 24 heures qui suivent leur arrivée au terminal. Le délai sera plus long pour les conteneurs partant par voie ferrée (entre 1 jour et une semaine).

Les conteneurs partant par route ne nécessitent plus qu'une seule et dernière opération. En effet, le camion qui prend le conteneur en charge est autorisé à venir sur le parc jusqu'à l'emplacement où se trouve le conteneur ou au moins dans l'allée la plus proche. Dans les deux cas, un engin de préhension suffit à la manutention de ce conteneur. Pour ces conteneurs on considère qu'ils ne font plus partie du terminal quand le camion franchit la limite de l'aire de stockage.

La situation est légèrement différente pour les conteneurs partant par chemin de fer. En effet, la SNCF dispose dans chaque terminal, d'une aire de stockage qui lui est propre. Les conteneurs nécessiteront donc chacun un ensemble tracteur-

remorque et un engin de préhension pour transiter du parc du terminal au parc SNCF. Il s'en dégage plusieurs étapes élémentaires :

- trajet des engins de parc jusqu'à l'emplacement du conteneur
- opération de chargement sur la remorque
- trajet jusqu'à la zone SNCF
- déchargement du conteneur

Pour le chargement sur le train, les conteneurs sont repris par des engins appartenant à la SNCF, plus adaptés aux voies ferrées (Citons par exemple les portiques sur rail enjambant deux ou trois voies ferrées). On peut considérer ses conteneurs comme ne faisant plus partie du terminal à partir de l'instant où ils sont déposés sur la zone SNCF.

#### *I - 4.4. - Trajet effectué par les conteneurs de type export*

---

Les conteneurs de type export suivent le processus inverse des conteneurs de type import. Les étapes élémentaires nécessaires à la manutention seront les mêmes.

Les conteneurs "export" arrivent au terminal avant le navire qui doit les emporter. Ils seront sur le parc entre 13 jours et 12 heures avant la date d'arrivée prévue du navire. La majorité d'entre-eux arriveront les quatrième et cinquième jours avant le navire.

#### *I - 4.5. - Trajet effectué par les conteneurs de type shifting.*

---

Les conteneurs de type shifting que nous avons déjà signalé à deux reprises à cause de leur particularité, ne nécessitent, pour la plupart d'entre-eux, que deux étapes élémentaires (un cycle portique pour le déchargement et un autre pour le chargement). Les portiques de quai (même les plus petits), disposent d'un certain nombre d'emplacements en arrière-bec. C'est là que seront mis ces conteneurs dans la mesure de la place disponible. Si cet arrière-bec, pour un portique donné, est saturé, les conteneurs "shifting" nécessitent les mêmes opérations que les conteneurs "import" en ce qui concerne leur déchargement et leur trajet

jusqu'au parc, et les mêmes opérations que les conteneurs "export" en ce qui concerne leur réembarquement.

On fait une différence au point de vue de l'emplacement qu'ils occuperont sur le parc. En effet, ils seront mis le plus près possible du quai pour limiter les déplacements des engins de parc.

Au sujet de l'arrière-bec, rappelons que les conteneurs "import" qui y ont été déposés, ne seront repris que lorsqu'il y aura un excédent d'engins de parc pour desservir les portiques de quai.

#### *I - 4.6 - Moyens humains et horaires de travail*

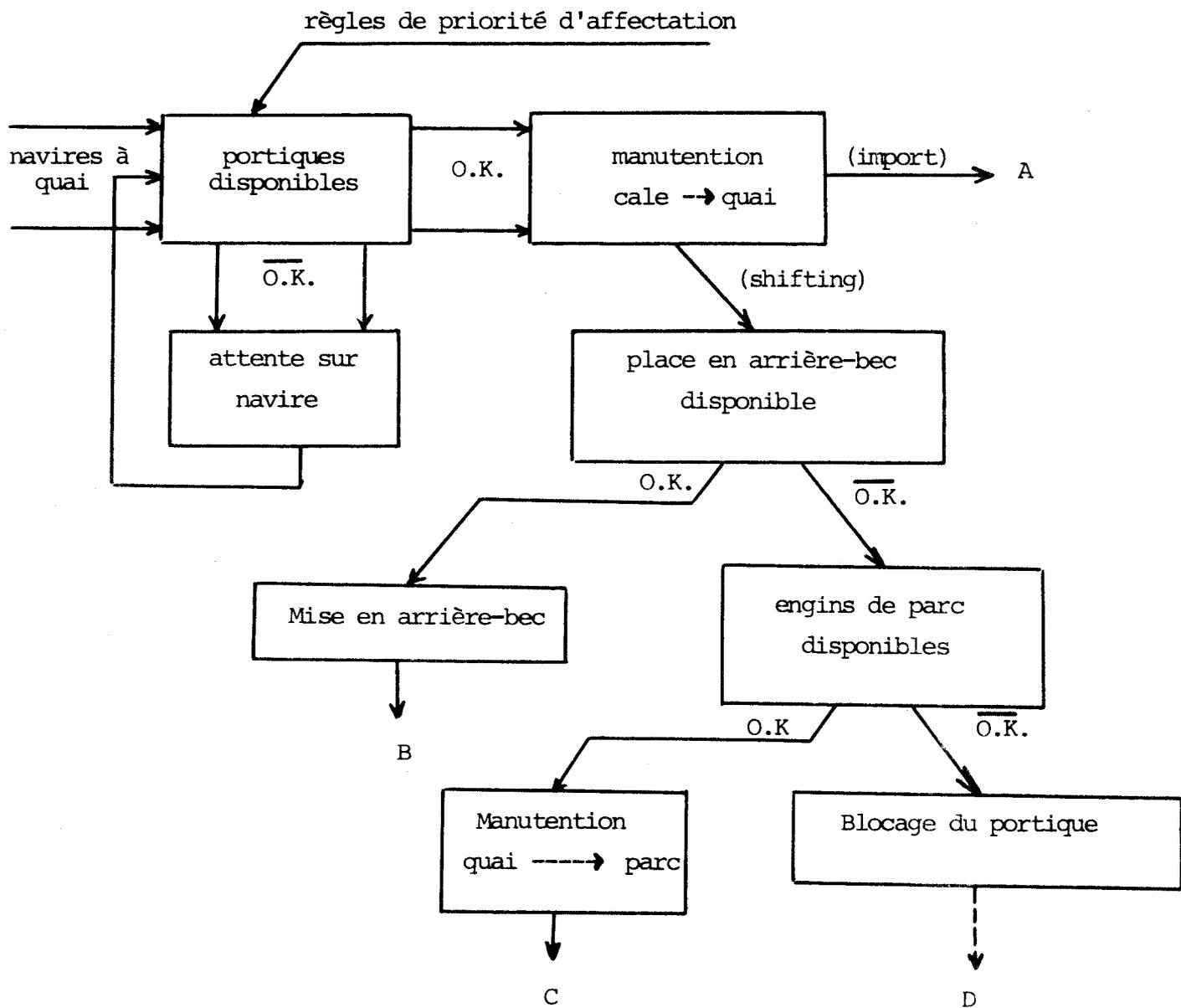
-----

Le personnel employé pour la conduite des engins de manutention est embauché par la compagnie maritime selon ses besoins. Les horaires de travail varient selon les terminaux. On peut avoir, par exemple, pendant les 6 premiers jours de la semaine, trois périodes de travail appelées shifts, chaque shift faisant 6 heures 40 minutes, et un seul shift le 7ème jour.

Ces horaires de travail apportent de nouvelles contraintes à la manutention. En effet, si une compagnie embauche du personnel pour la manutention d'un de ses navires, alors que le shift est en cours depuis 2 heures par exemple, elle devra fournir le salaire du shift complet. Le choix reste libre pour les compagnies, mais on voit apparaître des seuils au-delà desquels les compagnies maritimes préfèrent attendre le début du shift suivant malgré l'immobilisation du navire.

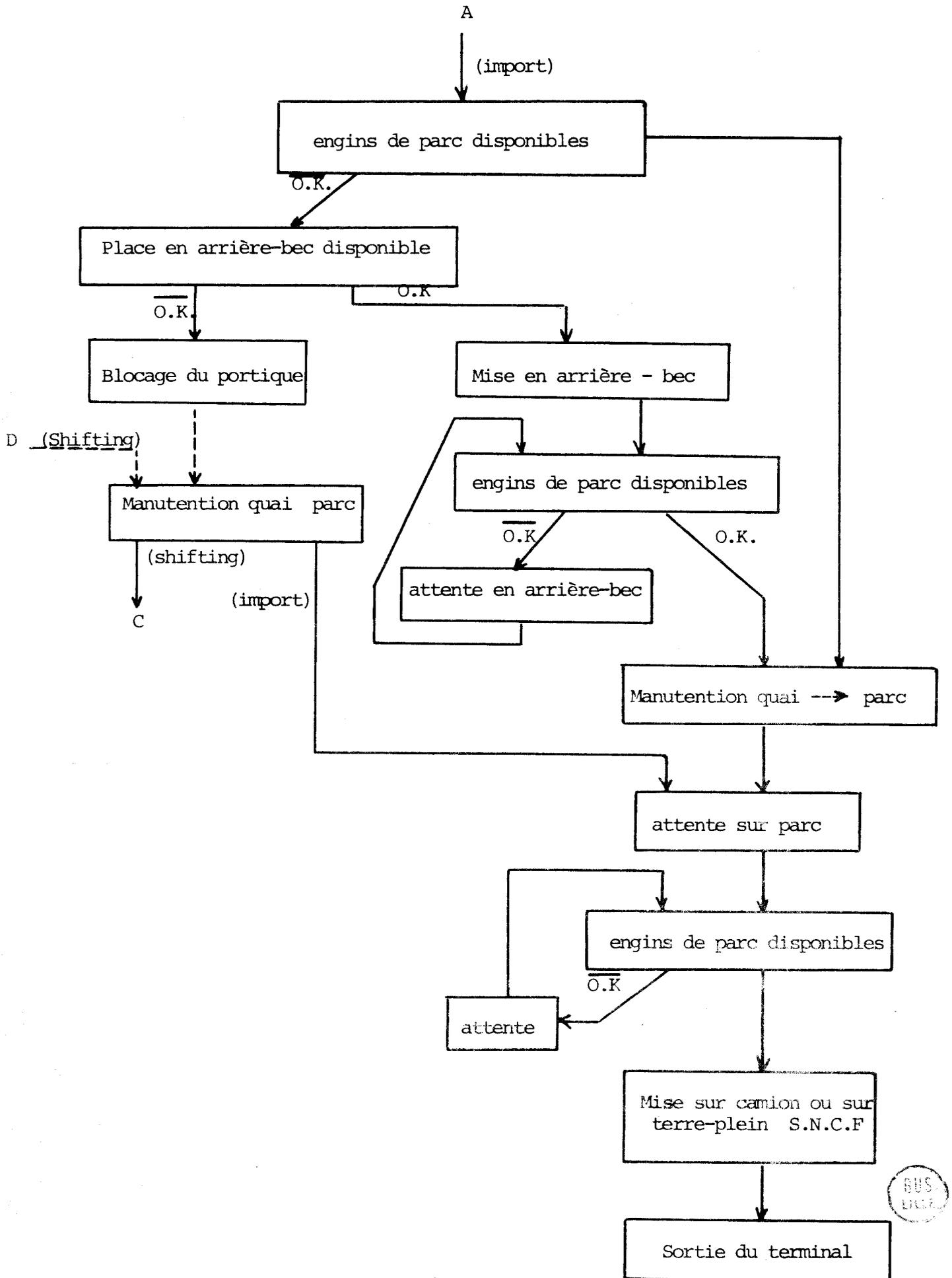
#### *I - 5. CONCLUSION*

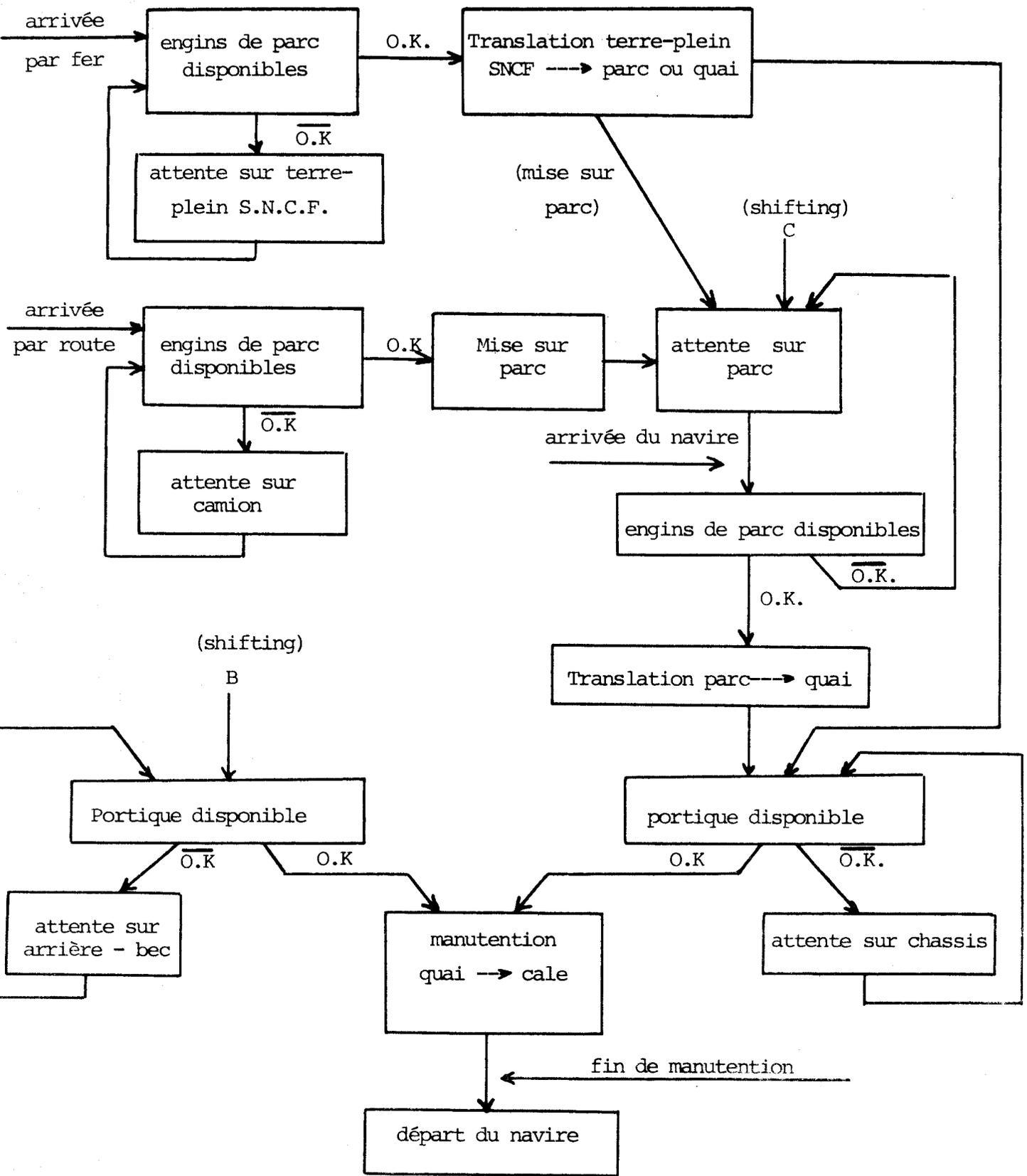
Un terminal à conteneurs est un système complexe en ce sens qu'il présente un grand nombre de configurations possibles, tant au point de vue des infrastructures que des opérations de manutention à effectuer. Il nous sera donc nécessaire de construire un modèle assez général, étant donné que le but est de pouvoir modifier un maximum de grandeurs influant sur le comportement du système.



PARTIE TERRESTRE







CHAPITRE II

---

OUTIL DE MODELISATION

000

## II - 1. INTRODUCTION

Notre but est donc de construire un modèle du système réel. Nous allons d'abord définir ce que l'on entend par "simulation".

Dans notre cas, la signification du mot simulation sera prise dans le sens de la représentation du système réel. En effet, notre but est de représenter le plus fidèlement possible le fonctionnement d'un terminal à conteneurs.

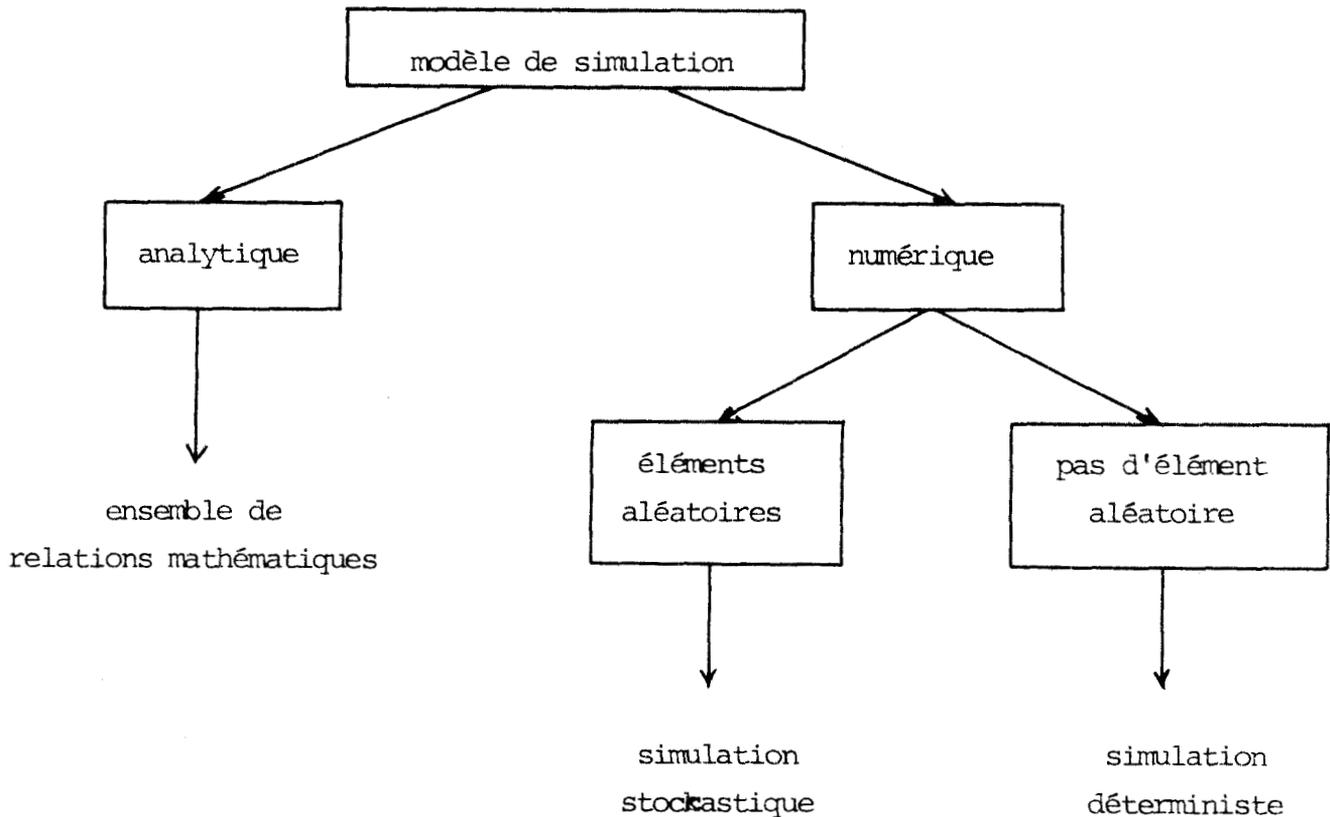
Il existe plusieurs types de simulation. Le constructeur du modèle choisira le type de simulation le mieux adapté au problème auquel il est confronté (figure II.1.1.).

La manière la plus précise de représenter un système est la construction d'un modèle analytique où les relations de cause à effet sont traduites par des équations mathématiques.

En dehors de ces modèles analytiques, il existe des modèles numériques parmi lesquels on peut distinguer deux types de simulation, selon les phénomènes qui sont à représenter :

- les phénomènes qui ne font intervenir aucun élément aléatoire, mais dont les relations entre éléments sont complexes et/ou nombreuses. Pour ces modèles, on se sert du calculateur pour trouver une solution à partir d'hypothèses données en respectant l'apparition logique des événements, modifiant l'état du système. On réalise pour ce type de phénomène une simulation déterministe.

- Les phénomènes où interviennent des éléments aléatoires. On réalise alors une simulation stockastique.



(figure II-1.1.)

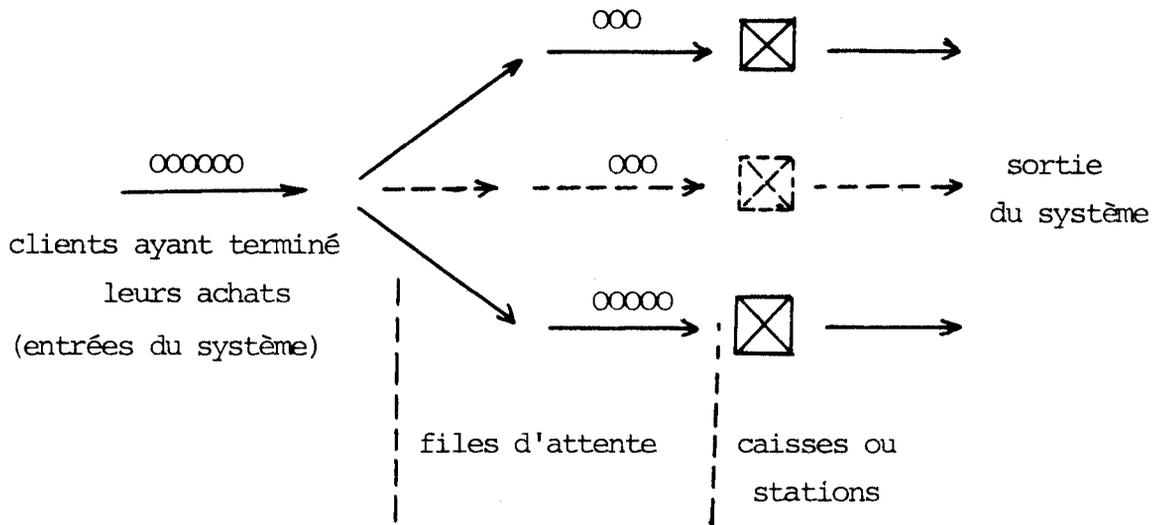
## II - 2. METHODOLOGIE D'UNE ETUDE DE SIMULATION

### II - 2.1 - Raisons du choix de la simulation numérique

Le système que nous avons à modéliser présente des grandeurs aléatoires (arrivées des navires, nombre de conteneurs, etc ...) et des phénomènes d'attente (exemple : attente de poste à quai).

Nous allons tout d'abord décrire sommairement un phénomène d'attente/KAU-1, CHU/. Prenons, pour cela, le cas classique d'un grand magasin où les clients arrivent selon une loi que l'on peut déterminer par observation du système réel.

Dans un système tel que celui-ci, les entrées seront les clients ayant effectué leurs achats. Le phénomène d'attente a lieu aux caisses où les clients attendent ou non pour régler leurs achats et partir. Il apparaît donc un certain nombre de files d'attente (attente des clients devant les caisses) et un certain nombre de "stations" (caisses). On peut résumer ce phénomène par le graphe ci-dessous.



Dans le cas simple que nous venons de présenter, on peut adopter une méthode de résolution analytique. En effet, si on réalise un nombre d'observations suffisamment grand, on constate que le processus d'arrivée des clients coïncide de façon assez précise avec un processus de Poisson, dont on connaît parfaitement le comportement. Rappelons que la loi de Poisson est régie par la distribution de probabilité suivante :

$$p_n(t) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!}$$

où :  $p_n(t)$  : probabilité d'apparition de  $n$  évènements dans l'intervalle de temps  $t$

$\lambda$  : taux moyen d'arrivée dans le système.

(la probabilité pour qu'un évènement se produise dans l'intervalle de temps  $\Delta t$  est :  $\lambda \Delta t$  où  $\Delta t$  est un infiniment petit).

La durée de service  $\mu$  d'une station, dans le cas général, peut être :

- constante
- liée à la longueur de la file d'attente
- variable mais déterminée
- aléatoire, mais connue en probabilité.

On peut ainsi établir une intensité de trafic  $\Psi$  définie comme suit :

$$\Psi = \frac{\lambda}{\rho}$$

Dans la plupart des systèmes où apparaissent des phénomènes d'attente, il existe plusieurs stations (N stations pour un système quelconque).

Notre but n'est pas de faire une synthèse des méthodes de recherche opérationnelle en ce qui concerne les phénomènes d'attente, mais de faire quelques rappels permettant de justifier le choix de la méthode que nous avons adoptée.

Pour le lecteur intéressé plus particulièrement par ces méthodes analytiques, il se rapportera aux ouvrages cités en bibliographie traitant de façon complète ces méthodes de résolution /KAU-1, CHU, AGA, KAU-2, MOR/.

Suite aux conventions que nous avons citées ci-dessus, nous pouvons donner un cas particulier de phénomène d'attente qu'il est possible d'étudier de cette façon :

- arrivées dans le système de type poissonniennes
- plusieurs stations à taux de service relatif à la même distribution selon la loi exponentielle.

Posons  $\bar{n}$  le nombre d'unités dans la file d'attente.

On obtient dans ce cas particulier un processus d'Erlang dont la probabilité d'attente est donnée par la formule :

$$p(\bar{n}) = \frac{\frac{\Psi^{\bar{n}}}{N! (1 - \Psi/N)^{\bar{n}}}}{\frac{\Psi}{N! (1 - \Psi/N)} + 1 + \frac{\Psi}{1!} + \frac{\Psi}{2!} + \dots + \frac{\Psi}{(N-1)!}}$$

avec  $p(\bar{n})$  : probabilité pour que le temps d'attente soit supérieur à 0.

$\bar{n}$  étant le nombre moyen d'unités dans la file, on connaîtra le temps moyen d'attente d'une unité par :

$$\bar{t}_F = \frac{\bar{n}}{\lambda} = \frac{\Psi^{\bar{n}}}{N \cdot N! \rho (1 - \frac{\Psi}{N})^{\bar{n}}}$$

Il existe des abaques donnant la probabilité d'attente et le temps moyen d'attente en fonction du nombre de stations N et de l'intensité de trafic  $\psi = \frac{\lambda}{\mu}$

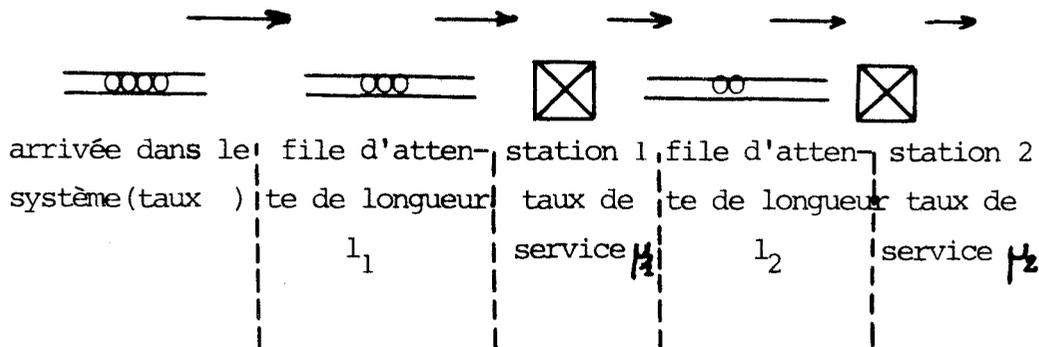
Nous pourrions encore citer bon nombre de cas particuliers qui ont été étudiés et dont le comportement est bien connu, mais ceux-ci n'apporteraient rien à notre étude en particulier.

Si nous reprenons le cas du grand magasin, pour une étude plus complète, il aurait été nécessaire de tenir compte, au moins, de deux phénomènes d'attente :

- l'attente ou non aux caisses pour le paiement des achats
- l'attente ou non d'un chariot libre pour l'entrée dans le magasin.

Ces deux phénomènes d'attente sont liés entre eux. Quelques cas de phénomènes d'attente en cascade ont également été étudiés à partir de méthodes analytiques. L'étude en est possible en ramenant le système à quelques cas particuliers nécessitant d'importantes hypothèses simplificatrices.

Prenons comme illustration l'exemple traité par le professeur P.M. MORSE.



P.M. MORSE a traité le cas où l'on a comme hypothèse de départ :

- arrivée poissonienne
- taux de service  $\mu_1 = \mu_2 = \mu$
- longueurs autorisées pour les files d'attente  $\begin{cases} l_1 = 0 \\ l_2 = 1 \end{cases}$

Ces trois hypothèses nous donnent 7 équations de probabilité selon les configurations que peut prendre le système.

Ces équations de probabilité à prendre en compte représentant tous les états possibles du système, on conçoit facilement que l'étude devient rapidement fastidieuse dans le cas de systèmes complexes où un grand nombre de phénomènes d'attente sont liés entre eux.

Dans le cas du terminal à conteneurs, au vu de l'analyse du système, nous avons adopté la méthode de simulation numérique. Ce type de modélisation de système a eu un essor assez important ces dernières années, grâce aux performances de plus en plus grandes des calculateurs modernes.

La simulation numérique permet de suivre les règles logiques séquentielles du comportement du système. Nous verrons dans la partie suivante, la description de quelques langages de simulation, mais signalons dès à présent que la plupart d'entre eux dispose d'un certain nombre de générateurs de nombres aléatoires permettant de représenter des arrivées d'unités selon des lois classiques (Loi de Poisson, loi de Gauss, exponentielle, ...) mais également selon des lois empiriques basées sur l'observation du système réel.

Avant de voir plus en détail le plan d'une étude de simulation numérique, remarquons que cette méthode de modélisation n'est possible que sur de "gros" calculateurs, car la programmation nécessite un emplacement mémoire important. (Il s'est déjà produit dans d'autres études que des systèmes ne pouvaient être simulés dans leur ensemble faute de capacité mémoire de l'ordinateur). C'est dans le but d'éviter ce problème de capacité que la Direction des Ports Maritimes et des Voies Navigables a décidé de scinder l'étude en deux parties. Dans notre modèle, le gain de mémoire se fera sous la forme d'une partie maritime traitée de façon superficielle.

Le deuxième avantage, dans le fait de scinder cette étude, est le coût d'exploitation du modèle. Bien que des progrès énormes aient été faits dans le domaine des langages de simulation, l'exécution d'un programme nécessite un temps machine important. Nous verrons par la suite la justification de ce temps d'occupation machine dans la description des langages les plus couramment utilisés.

*II - 2.2 - Plan d'une étude de simulation numérique*  
-----

Avec l'accroissement du succès des modélisations par simulation numérique, on a essayé de "normaliser" le processus de mise en oeuvre des modèles. Cette normalisation est basée sur l'expérience/ DOR, FEU, KAR/.

Le premier point est de définir le problème auquel on est confronté et le but que l'on veut atteindre. On a tendance, en général, à négliger l'étape de documentation qui permet quelquefois de trouver des simplifications à la mise en oeuvre du modèle. Pour notre étude, cette étape de documentation s'est faite en coopération avec la Direction des Ports Maritimes et des Voies Navigables, ainsi que l'E P I, qui a principalement tiré ses renseignements auprès des ports autonomes de Marseille et du Havre.

Lors de la définition du problème, il ne faut pas oublier le facteur temps. Car la mise au point d'un modèle de simulation est souvent très longue. Il faut donc, dès le début, prévoir la possibilité de tenir compte de l'évolution du système. Sans cette précaution, on risque fort d'aboutir à un modèle inutilisable par le fait qu'il sera non représentatif du système réel au moment de sa mise en application.

Le deuxième point est beaucoup plus technique. Il s'agit de définir, selon les objectifs de l'étude, les entrées et les sorties du modèle, ainsi que les variables d'état.

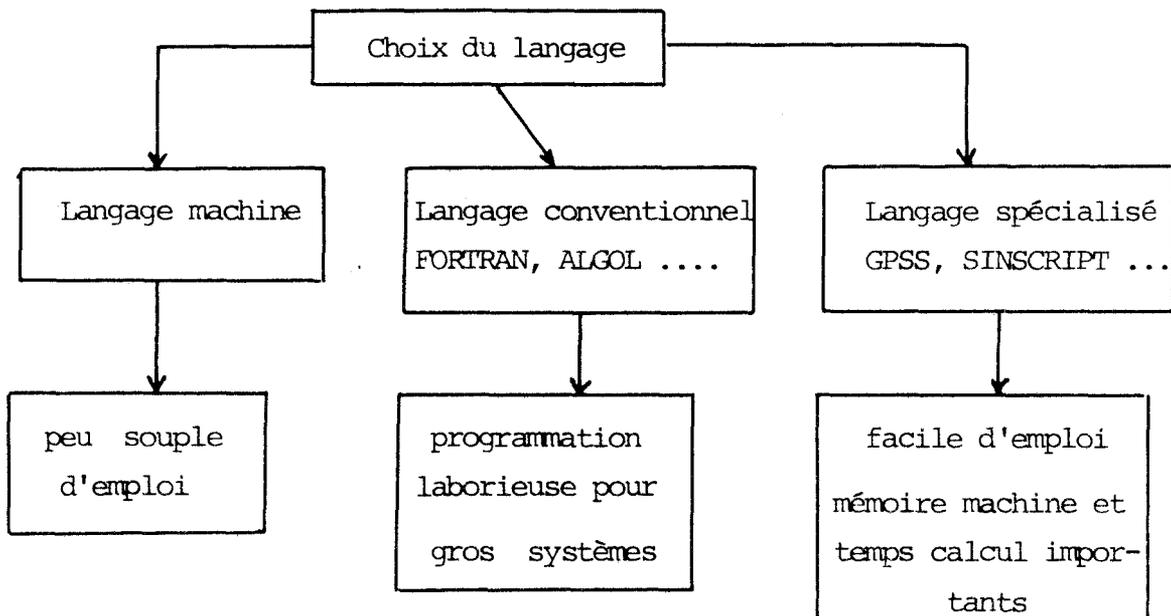
On a rarement le choix pour ce qui est de la machine que l'on va utiliser. Le plus souvent, on sera limité au choix du langage de programmation.

Très peu de monde utilise encore le langage machine. En effet, il n'est pas d'un emploi très souple pour une étude relativement complexe et les modifications qui s'avèrent nécessaires au cours de l'exploitation, entraînent généralement un travail de restructuration du programme très laborieux.

Viennent ensuite les langages conventionnels comme le FORTRAN, l'ALGOL, etc... qui sont connus de pratiquement tout le monde.

Bon nombre d'études ont été réalisées en FORTRAN, avec des programmes très structurés et très modulaires. Néanmoins, pour l'étude de très gros systèmes on aboutit fréquemment à des programmes très impressionnants. N'oublions pas que ces langages ont été conçus pour la résolution d'équations et les calculs mathématiques.

Restent enfin les langages spécialisés (GPSS, SINSRIPT, etc ...) qui offrent l'avantage d'être d'un emploi relativement facile. De par leur conception, ce sont eux qui nécessitent la plus grande capacité mémoire et le temps de calcul le plus long. (figure II.2.2.1).



(Figure II.2.2.1)

Après avoir choisi le langage à utiliser et selon ses possibilités, il faut tenir compte des besoins de l'utilisateur pour produire les résultats sous une forme intéressante.

Beaucoup de programmes de simulation sont difficilement exploitables à cause des résultats incomplets ou peu clairs.

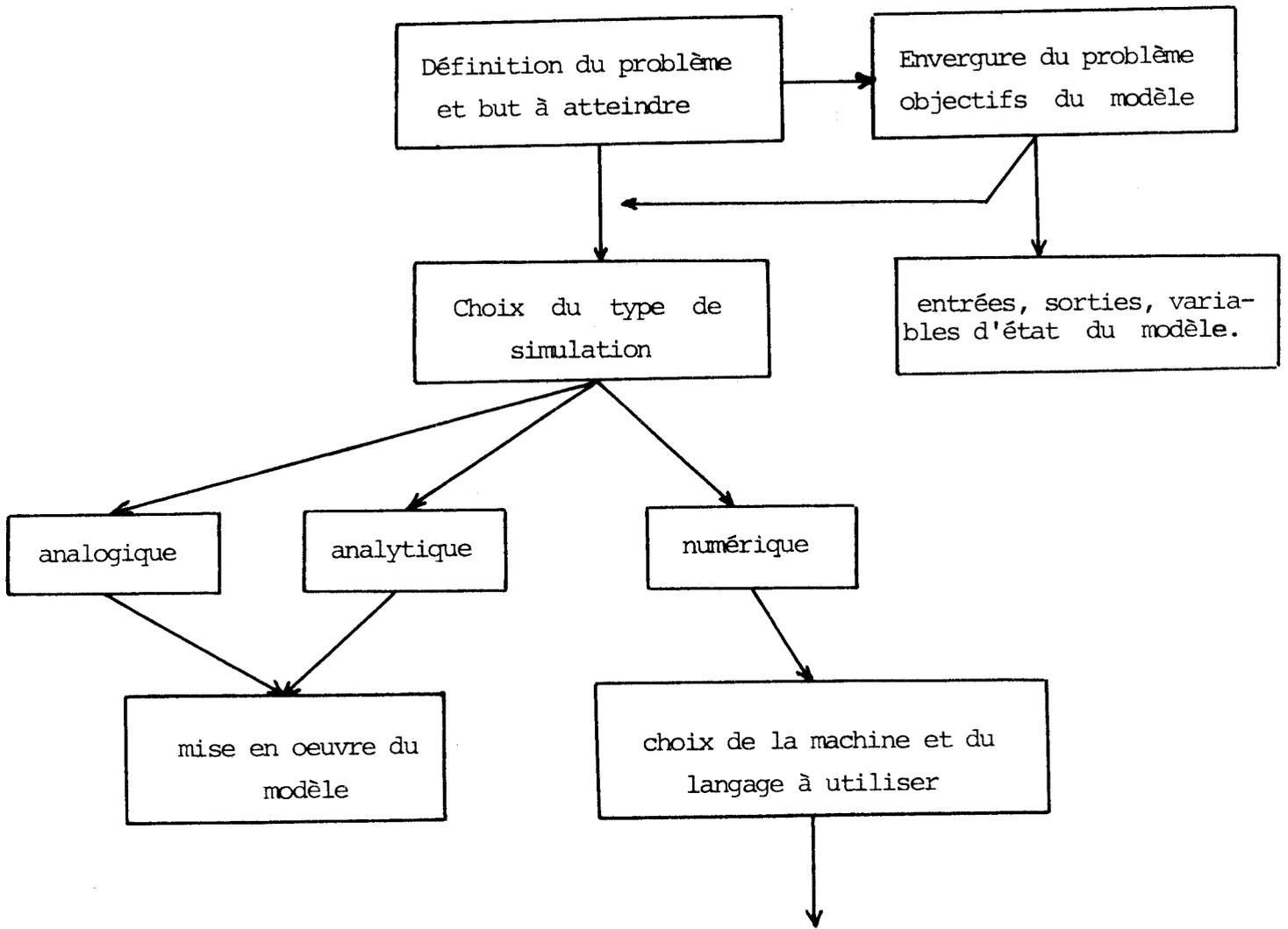
On retrouve, ici encore, un avantage d'un certain nombre de langages spécialisés qui tiennent à jour, tout au long de l'exécution d'un programme, les statistiques de l'évolution des grandeurs les plus importantes.

Abordons maintenant le point délicat de ce type de simulation. C'est la validation du modèle (ou intervalle de confiance). La solution la plus simple qui vient à l'esprit est de simuler une ou plusieurs situations passées. Ceci permet de comparer les résultats pratiques et théoriques. Si la comparaison est satisfaisante, on peut penser que le modèle restera valable dans un avenir plus ou moins long. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue qu'un modèle de simulation ne donne jamais une solution certaine, mais une idée du comportement du système réel, sous certaines contraintes.

En ce qui concerne l'utilisation d'un modèle par un client, l'expérience montre que ce modèle doit toujours être accompagné d'une documentation détaillée, faute de quoi le modèle risque fort d'être incompréhensible. Retenons à ce sujet un point qui nous paraît très important. Il nous semble, en effet, indispensable que l'utilisation ait un dialogue permanent avec les personnes attachées à la construction du modèle. Ceci permet souvent d'éviter de grosses erreurs et de plus, l'utilisateur peut se faire de lui-même, une idée de la validation du modèle.

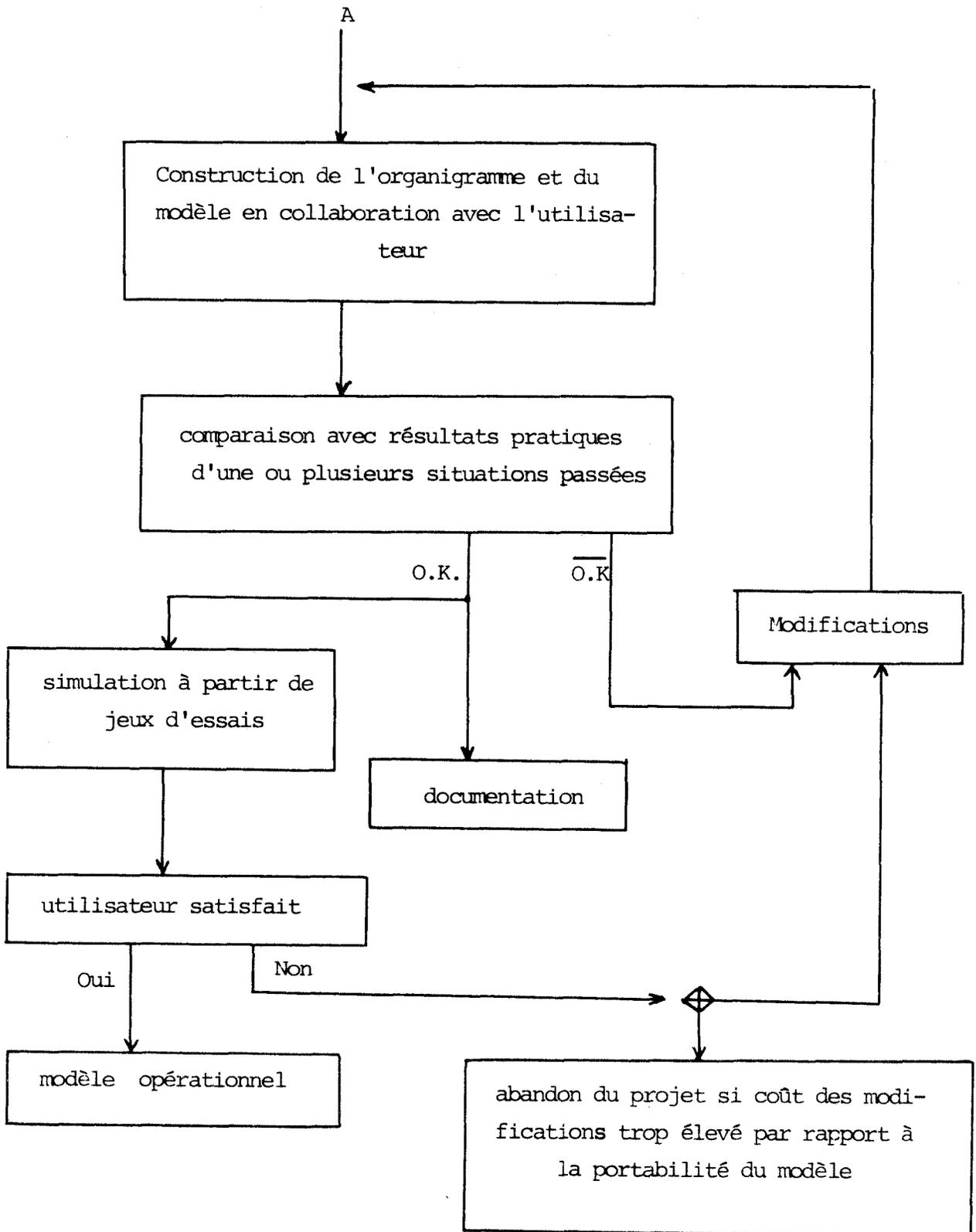
La réalisation d'un organigramme du système en collaboration avec l'utilisateur, permet de cerner le problème de façon plus claire et plus précise. En plus, de cet organigramme, il est nécessaire d'établir une notice technique d'utilisation du modèle, comme pour n'importe quel outil de travail (présentation des jeux de données, modifications possibles pour tester plusieurs politiques différentes, etc ...).

Le schéma de la figure II.2.2.2. ci-dessous résume la méthodologie d'une étude de simulation numérique.



(Figure II.2.2.2.) A





(Figure II.2.2.2. suite)

## II - 3. SYNTHESE DE QUELQUES LANGAGES DE SIMULATION

Notre but n'est pas de faire une synthèse détaillée de tous les langages de simulation existants à l'heure actuelle et ceci pour la raison suivante.

Il existe beaucoup de langages de simulation qui ne sont adoptés qu'à un seul type de machine. Nous verrons donc le descriptif des langages les plus couramment utilisés dans ce domaine et adaptables, en général, sur un grand nombre de machines.

Rappelons toutefois que ces langages ne sont utilisés que sur les gros calculateurs /IEE, GEN, OCK, CER, CRU, BOB, AFC/.

Nous verrons tout d'abord celui qui nous intéresse le plus, à savoir le GPSS (General Purpose Simulation System).

En effet, le service informatique du Port Autonome de Dunkerque, avec lequel nous avons travaillé, a décidé, au vu des problèmes qui lui étaient posés, d'adopter ce langage de simulation.

Ensuite, nous aborderons le SIMSCRIPT et le SIMULA qui sont également très utilisés, puis de façon plus succincte, quelques langages moins répandus.

### II.3.1. - *Caractéristiques générales du GPSS*

-----

Le GPSS a été mis au point par Gordon pour la Compagnie I.B.M. en 1961. Ce langage, comme la plupart des autres, a évolué depuis, et on a vu apparaître successivement cinq versions dont la dernière est le GPSS V. Il ne s'appuie sur aucun autre langage conventionnel, il a été conçu pour se rapprocher le plus possible des concepts de simulation. Pour cela, Gordon a introduit les notions d'entité et d'attribut que nous verrons apparaître dans le modèle.

Le modèle :

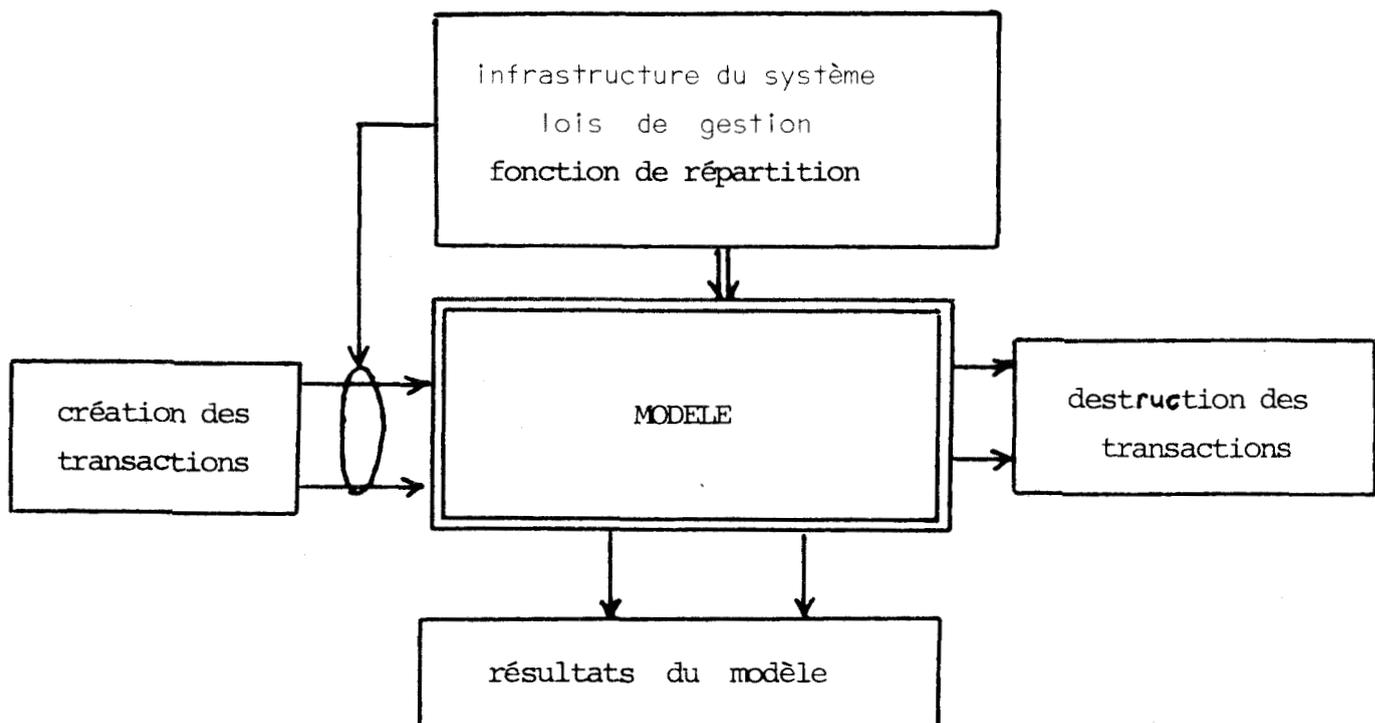
Il est constitué d'une suite de blocs caractérisant les entités du modèle. A ces blocs seront associés des attributs (paramètres et variables).

La simulation du système sera représentée par des transactions qui sont les individus du système réel, "circulant" à l'intérieur du modèle, d'un bloc à l'autre. Ces transactions peuvent être les clients d'un magasin, les trains sur un réseau ferroviaire, etc ...

Dans notre cas, elles représenteront les navires et les conteneurs. Ces transactions sont individualisées et gérées par les lois définies lors de la programmation du modèle.

Le GPSS n'étant inspiré d'aucun autre langage, il a été conçu dans le but de permettre la construction du modèle par transcription quasi immédiate de l'organigramme du système réel. Cette transcription se fait à l'aide des blocs. La version la plus récente du GPSS comporte environ 45 types de blocs, ce qui permet de faire face aux problèmes posés par la construction de la plupart des modèles.

#### Fonctionnement du modèle



(figure II.3.1.1.)

Avec l'utilisation des langages usuels du type FORTRAN, les instructions d'un programme sont exécutées dans un ordre bien défini, suivant le processus logique séquentiel d'écriture et il n'intervient pas de notion de temps.

Pour la simulation d'un système tel que le terminal à conteneurs, il est évident qu'il faut faire intervenir cette notion de temps : lois d'arrivée, durée de manoeuvre, etc ...

Le GPSS permet ceci car il fonctionne à l'aide de deux horloges :

- une horloge dite absolue qui représente l'écoulement du temps dans le système réel

- une horloge dite relative qui peut servir à référencer l'exécution d'un évènement par rapport à un autre.

Les transactions entreront dans le modèle à des instants et à des endroits fixés à l'avance par les données d'entrée. Après avoir effectué un certain parcours dans le modèle, elles seront détruites. Dans le cas du langage de simulation, le parcours n'est pas connu à l'avance; il dépendra de l'apparition ou de la non apparition d'un certain nombre d'évènements conditionnant son trajet.

Lors du passage des transactions dans le modèle, l'accumulation des statistiques est automatique. Ces résultats statistiques seront imprimés à la fin de la simulation sans commande spécifique. Le GPSS dispose d'entités telles que : station simple (FACILITY), station multiple (STORAGE), file d'attente (QUEUE), etc .... et ce sont les temps d'occupation moyens, le nombre d'unités, etc.... ayant occupé ces stations et files qui seront sauvegardés. Dans le cas des stations multiples, c'est l'utilisateur du modèle qui fixe la capacité de chaque station.

Pour les systèmes qui comportent des phénomènes d'attente, le GPSS ne craint pas la comparaison avec les autres langages. Il est simple à mettre en oeuvre pour ce type de problème, mais c'est aussi lui qui nécessite le temps de calcul le plus long.

La simulation des arrivées des individus dans le système est rendue facile grâce aux huit générateurs de nombres aléatoires dont dispose le GPSS. Ces générateurs permettent de programmer des lois classiques du type loi de Poisson ou autre ainsi que des lois empiriques définies par l'utilisateur du modèle.

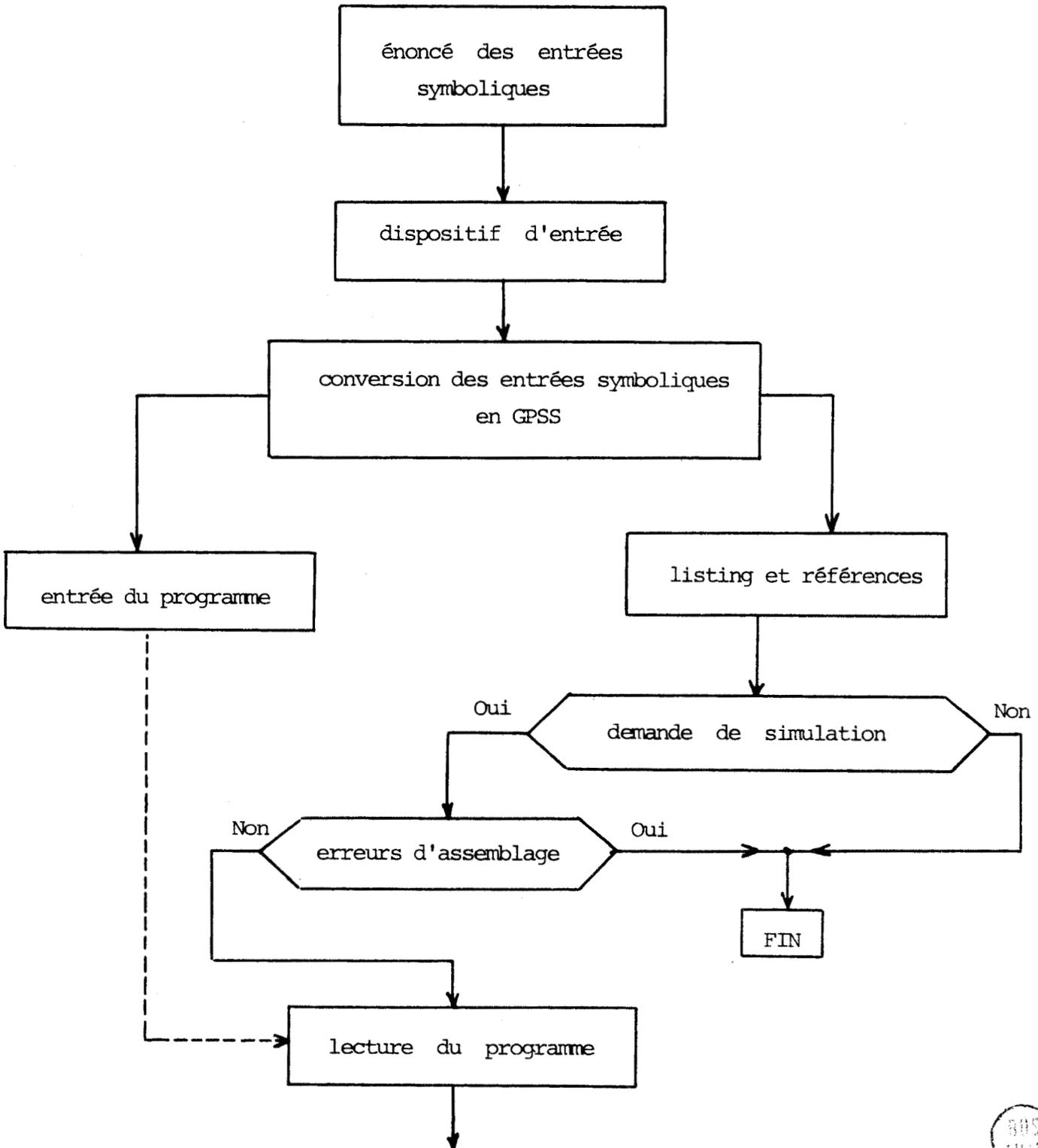
Signalons une dernière possibilité de ce langage. Lors de la construction du modèle, on peut introduire un ordre HELP, après sauvegarde d'un certain nombre de grandeurs, qui permet à l'utilisateur de faire appel à un certain nombre de sous-programmes FORTRAN ou PL/1 qu'il aura écrit auparavant.

Cette possibilité est rarement utilisée car le but d'un langage de simulation n'est pas d'utiliser de gros outils mathématiques et les calculs nécessaires au cours d'une simulation restent en général très simples.

La justification du temps d'exécution est donnée par le nombre de transactions qui se déplacent dans le modèle et par l'accumulation des résultats statistiques.

Le schéma (figure II.3.1.2.) ci-dessous nous explique le processus d'exécution d'un programme de simulation écrit en GPSS.

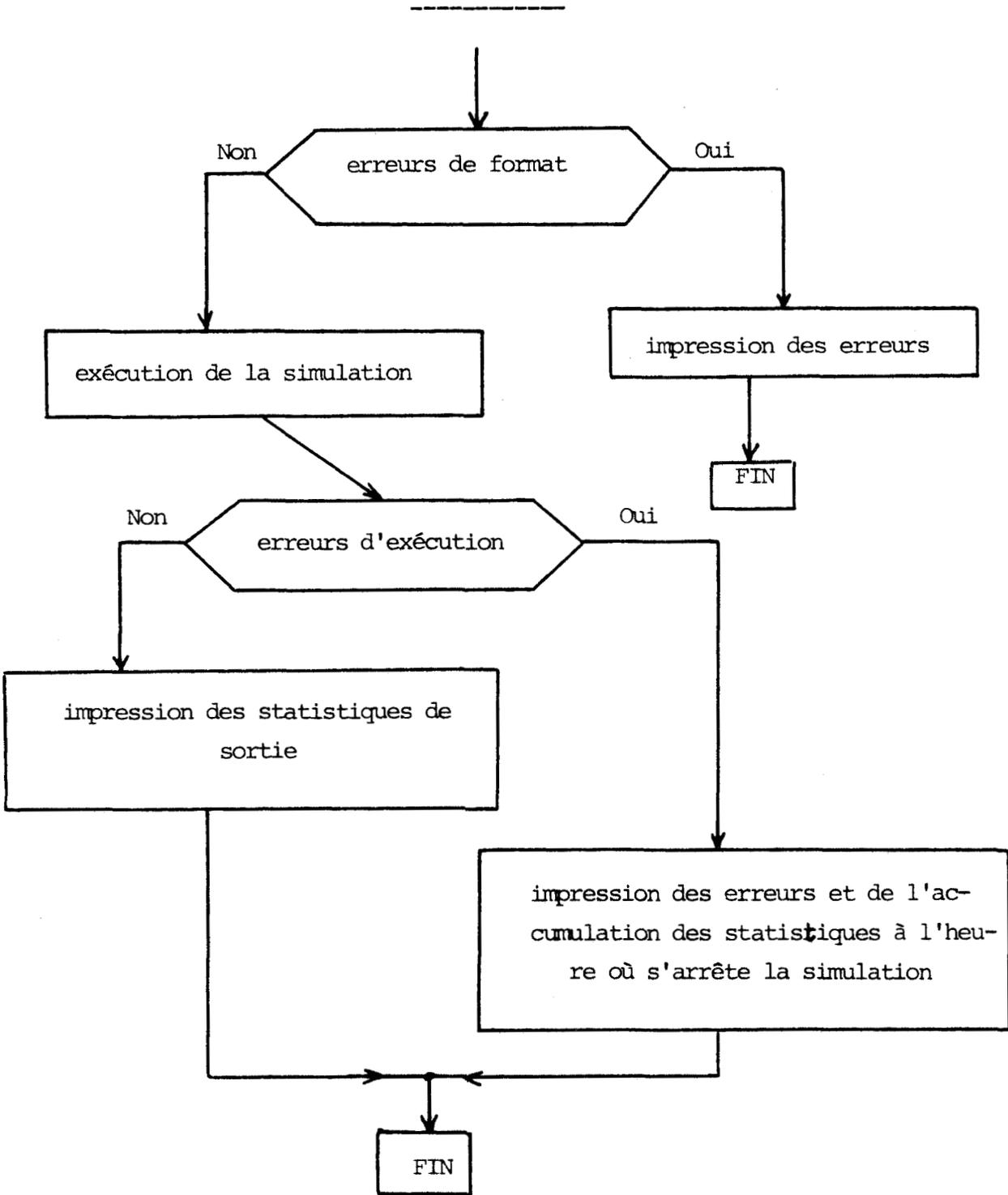
PROCESSUS D'EXECUTION D'UN MODELE ECRIT EN G P S S



(Figure II.3.1.2.)



PROCESSUS D'EXECUTION (suite)



(Figure II.3.1.2. suite)



### II - 3.2 - Description générale du SIMSCRIPT : /KIV/

Le SIMSCRIPT est sans doute avec le GPSS le langage de simulation le plus utilisé à l'heure actuelle. La première version a été mise au point à la Rand Corporation en 1963. Tout comme le GPSS, il a été amélioré par la suite.

Le SIMSCRIPT fait partie des langages de simulation qui ont pour point de départ le FORTRAN. Il est quasiment une extension de ce langage adaptée aux problèmes de simulation.

Il est basé sur la notion d'évènements. Ces évènements peuvent être endogènes (internes au système simulé) ou exogènes (provoqués par l'extérieur). A un instant donné, l'état du système est complètement défini par l'ensemble des entités et leurs attributs correspondants. L'occurrence d'un évènement modifie l'état du système par le changement d'un attribut, la création ou la destruction d'une entité. L'évènement est causé par SIMSCRIPT au temps prévu.

Les différents calculs de résultats statistiques doivent être programmés par l'utilisateur, mais ils sont simplifiés par un générateur de rapport disponible en SIMSCRIPT qui permet à l'aide d'une seule instruction, de faire plusieurs calculs du type : moyenne, écart type, variance, etc ....

L'utilisation du GPSS limite la construction des modèles à cause du nombre de blocs disponibles restreint. Par contre, le SIMSCRIPT offre des possibilités plus grandes mais est plus difficile à mettre en oeuvre. Le temps de calcul pour l'exécution d'un modèle donné est plus petit que pour l'exécution du modèle équivalent écrit en GPSS.

### II - 3.3. - Le langage SIMULA /UNI/

SIMULA (Simulation Language) a été développé à Oslo (Norvège) par DAHL et NYGAARD. Il est surtout utilisé par les personnes habituées à l'ALGOL 60 puisqu'il reprend certaines notions de ce langage comme point de départ.

SIMULA utilise le concept de processus. Lors de la construction d'un modèle, il faudra décrire tous les processus du système. Chaque processus possède des règles de comportement qui seront ses caractéristiques dynamiques et des données structurées (chaque élément des données structurées constitue un attribut d'un processus donné).

Un certain nombre de commandes permet de contrôler les événements. Si un événement se produit, il va activer un processus qui, lui, change l'état du système.

Les différents processus décrivant le système peuvent être organisés sous forme d'arbre (l'activation d'un ou plusieurs processus dépendant du résultat d'un autre processus). Lors de l'exécution d'un modèle, chaque processus peut être dans quatre états différents : actif, suspendu, passif ou terminé.

- actif : il peut modifier l'état d'un ou plusieurs processus, y compris de soi-même
- suspendu : il est momentanément inactif, mais il peut être réactivé par une instruction de commande
- passif : il peut être réactivé par un autre processus et non par une commande
- terminé : il n'a plus aucun rôle à jouer dans le système en cours de simulation.

Pour conclure sur le langage SIMULA, notons que l'utilisateur doit programmer les résultats statistiques qu'il désire obtenir. Il a été prévu quelques instructions permettant de simplifier cette programmation.

#### *II - 3.4 - Autres langages de simulation*

-----

Nous ne citerons que quelques uns des autres langages de simulation, mais qui ont un champ d'application beaucoup moins large que ceux que nous venons de voir.

- DYNAMO : surtout utilisé pour les grands systèmes économiques

- GASP : adapté aux ordinateurs de moyenne et petite taille

- SIMPL/1: /SIM/ Comme SIMULA, il est basé sur le concept de processus. Il a été développé en 1970. Il s'appuie sur le langage usuel PL/1 et offre des facilités pour le traitement de listes, de problèmes de gestion, etc ....

A l'heure actuelle, il existe environ une douzaine de langages de simulation numérique. Les autres langages, que nous n'avons pas cités dans ce chapitre, sont soit utilisables sur un seul type de machine comme nous l'avons déjà signalé, soit adaptés à un seul type de problème de simulation. Ce sont en général des langages créés à partir d'un langage usuel (FORTRAN, ALGOL, etc ...) par un utilisateur particulier dans le seul but de résoudre un problème bien spécifique.

#### II - 4. CONCLUSION

Dans la mesure où on adopte une méthode de modélisation par simulation numérique, on constate que l'on a rarement le choix quant au langage et à la machine à utiliser. Il nous paraît donc inutile d'insister sur les critères favorables à un langage plutôt qu'à un autre et/ou à une machine plutôt qu'à une autre. Dans notre cas, le GPSS qui nous est disponible sur une machine performante, semble convenir parfaitement à notre étude.

CHAPITRE III

---

LE MODELE DE SIMULATION

ooo

III - 1. INTRODUCTION

Rappelons que notre modèle a pour but de s'attacher de façon précise à la manutention à terre et à la gestion du parc de stockage. Ce modèle nous permettra de "tester" le comportement et les performances du matériel dont dispose le terminal pour les manutentions sur l'aire de stockage. De plus, on se réserve, de cette façon, la possibilité de prévoir la saturation de certaines zones du parc et les différents points d'engorgement qui peuvent survenir du fait d'une augmentation importante du nombre de conteneurs.

III - 2. LES DONNEES DU PROBLEME

Il faut tout d'abord définir le trajet des conteneurs dans notre modèle. Un conteneur sera considéré comme faisant partie du modèle entre l'heure à partir de laquelle on connaît le plan de déchargement du navire sur lequel il se trouve, pour la liaison avec l'extérieur du pays, et l'heure à laquelle il franchit la limite de l'aire de stockage, pour la liaison avec l'intérieur. On aborde également le travail lié à la partie S N C F pour les conteneurs arrivant ou partant par voie ferrée.

III - 2.1 - Caractérisation des individus du système réel

Nous avons vu que dans un modèle écrit en GPSS, les "individus" du système à simuler sont représentés par des transactions. Dans notre cas, ces individus seront les navires et les conteneurs. Il faut donc définir un certain nombre d'attributs (paramètres et variables) associés à chaque transaction, caractérisant les individus.

En ce qui concerne les navires, les principales caractéristiques sont les suivantes :

- la compagnie à laquelle ils appartiennent
- leur catégorie (traduite par leur capacité)
- le nombre de conteneurs de chaque type qu'ils transportent
- le plan de déchargement (emplacement sur le navire de chaque conteneur à décharger).

Les conteneurs seront caractérisés par un numéro spécifique contenant les informations suivantes :

- le numéro du navire par lequel ils arrivent ou sur lequel ils doivent être chargés
- un codage de leur type (import, export, shifting)

Ils possèdent également un certain nombre d'attributs caractérisant :

- leur mode d'évacuation
- leur contenu (plein, vide, ...)
- le numéro de la cale dans laquelle ils sont pour les "imports" ou dans laquelle ils doivent être chargés pour les "exports".

### *III - 2.2. - Définition des infrastructures d'un terminal*

---

Les individus étant caractérisés, on représentera les infrastructures du système réel à l'aide des entités FACILITIES et STORAGES (respectivement stations simples et stations multiples) du GPSS. Ces entités serviront à imposer, dans le modèle, le nombre d'engins de quai et d'engins de parc dont dispose le terminal que l'on veut simuler. Les différentes zones de stockage seront représentées d'une manière classique à savoir des matrices.

### III - 2.3. Activité d'un terminal

Le système étant défini, il faut reproduire un trafic de navires et de conteneurs. Selon la durée de simulation que l'on envisage, on génère un certain nombre de navires avec chacun leur chargement afin de représenter le trafic réel. A ce sujet, nous avons vu dans la description du GPSS, que l'utilisateur dispose de huit générateurs de nombres aléatoires. Ces générateurs nous seront utiles pour concrétiser :

- la loi d'arrivée des navires
- la loi de séjour des conteneurs "import" sur le parc
- la loi d'arrivée des conteneurs "export" en fonction de l'heure prévue d'arrivée du navire correspondant
- les pourcentages de conteneurs de chaque type.

L'unité de temps pour le modèle de simulation est laissée au choix de l'utilisateur. Dans notre cas, elle dépendra des différentes lois que l'on vient de citer et des performances des engins de manutention (données par la cadence commerciale).

En fonction de l'unité de temps que l'on a choisie, l'horloge absolue du GPSS permet de simuler des horaires d'activité du terminal.

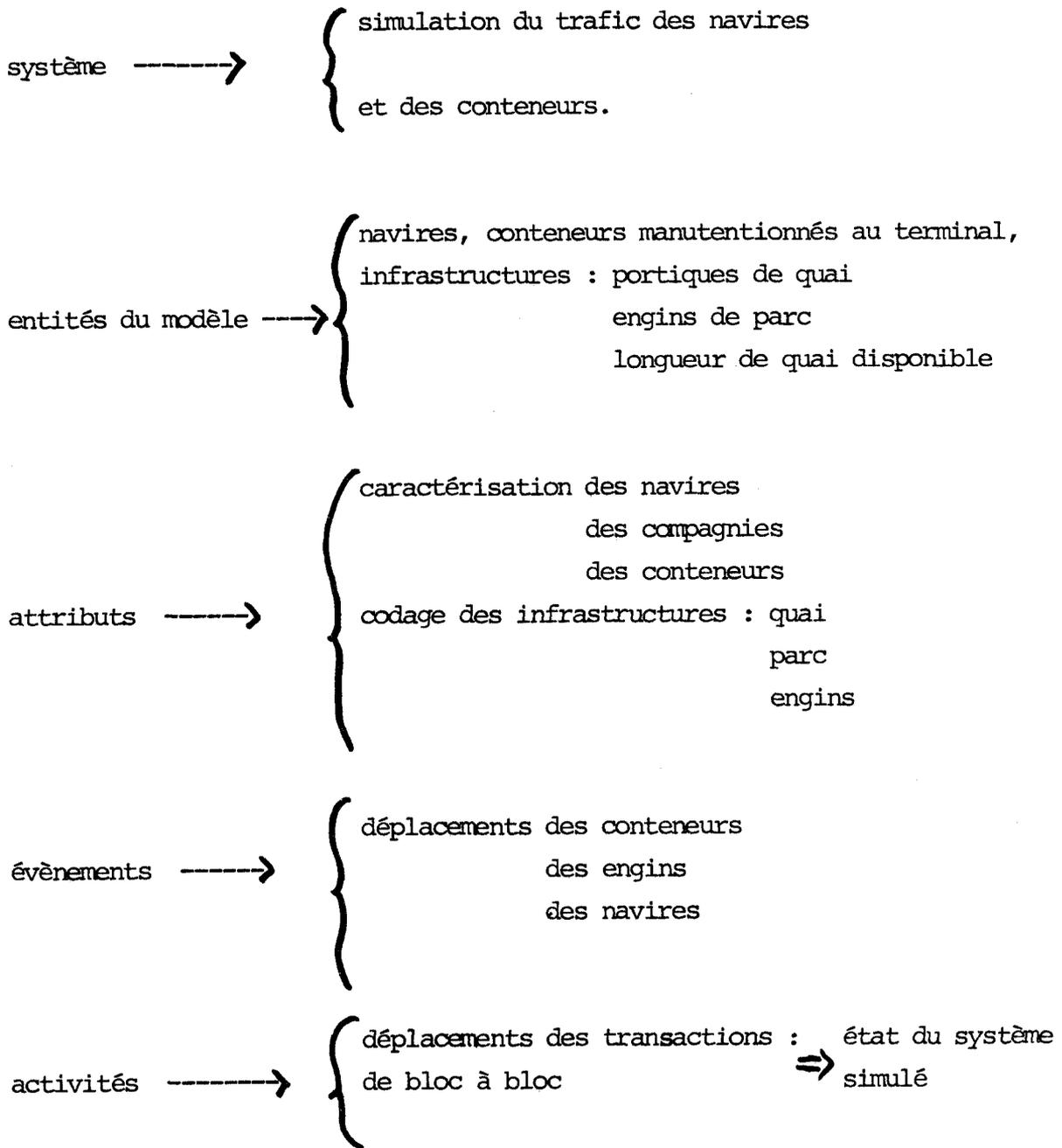
Toutes les grandeurs que nous venons de présenter seront les initialisations et les données d'entrée du modèle. Elles sont extrêmement faciles à modifier et ceci permettra la simulation d'un très grand nombre de situations susceptibles de se produire dans la réalité.

Avant de passer à l'élaboration du modèle proprement dit, signalons une modification possible des entités du modèle. En effet, on a vu qu'un programme écrit en

GPSS, nécessite un temps d'exécution assez long. De ce fait, on pourra envisager de représenter un petit lot de conteneurs du même type par une seule transaction du modèle. Bien entendu si cela a lieu, ce sera au détriment de la précision des statistiques de sortie du modèle.

D'autre part, au moment de la génération des conteneurs d'un navire, dans le but de ne pas alourdir inutilement le modèle, on ne tiendra compte que des conteneurs qui ont un rôle à jouer dans la vie du terminal que l'on veut simuler.

En dernière remarque, nous pouvons dire qu'il est possible de modifier, avant le lancement de l'exécution d'une simulation, la longueur de quai disponible au terminal.



### III - 3. LE PROGRAMME DE SIMULATION

#### III - 3.1. Généralités -----

L'adaptation du modèle de simulation que nous avons réalisé à un problème particulier ne doit pas nécessiter une restructuration complète du programme. C'est dans ce but que nous l'avons réalisé de façon modulaire.

Le contenu de chaque module a été décidé en accord avec le Port Autonome de Dunkerque au vu des modifications susceptibles d'être apportées au modèle.

Dans un premier temps, nous allons voir les différents modules dans leur ensemble (figure III.3.1.1.).

On peut tout d'abord distinguer un certain nombre de tâches qui ne sont pas spécifiques à un conteneur ou à un navire.

Ces tâches représentent en fait les décisions des autorités portuaires au vu du trafic et de l'état du terminal. Partant de cette remarque, au lieu de réaliser une simulation séquentielle des événements du système, nous avons introduit un moniteur chargé d'effectuer les tâches répétitives. Ce moniteur sera lui-même divisé en plusieurs modules représentant chacun une décision. L'avantage principal de ce moniteur est que, vu de l'utilisateur, chaque module est exécuté en un temps nul, il n'influe donc pas sur la vie du terminal au point de vue des temps de transit des individus du système.

D'autre part, il permet un allègement du programme en évitant la réécriture des tâches répétitives.

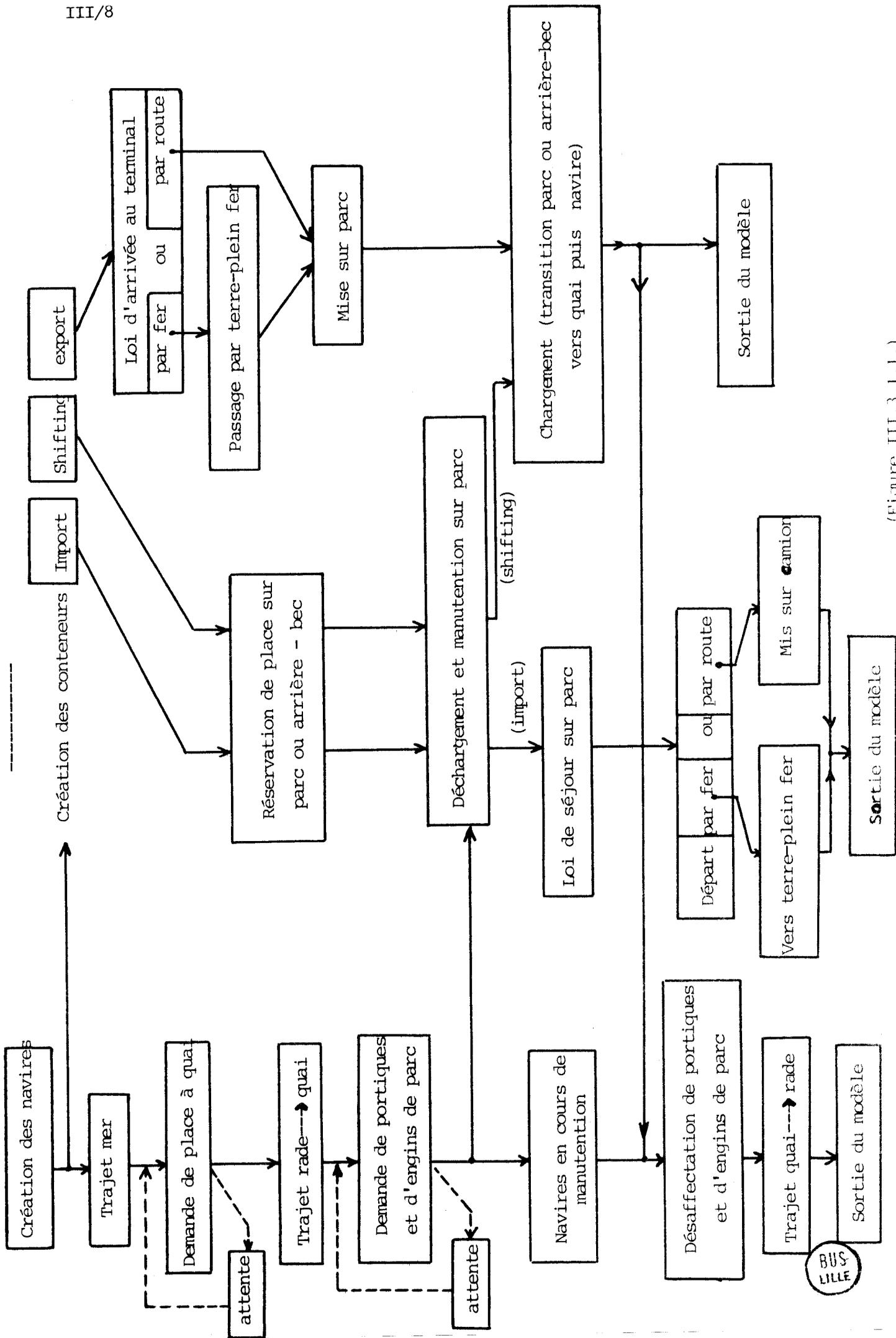
En dehors de ce moniteur, la vie du terminal est représentée par ce que l'on appellera :

- l'impulsion navire qui simule la vie des navires venant au terminal
- l'impulsion conteneur import chargée de simuler le passage des conteneurs du navire vers l'intérieur du pays.

- l'impulsion conteneur export : passage de l'intérieur du pays au navire
- l'horloge qui fixera la durée de la période simulée ainsi que les horaires de travail que l'on a choisis.
- l'impulsion pannes d'engins représentant les pannes de longue durée des portiques de quai.

Nous allons voir que du point de vue structuration du programme, on peut traiter chaque module de façon indépendante.

Le langage GPSS dispose de 128 niveaux de priorité. Un niveau de priorité est affecté à chaque transaction du modèle. Le moniteur aura la priorité la plus basse puisqu'il effectue un travail de fond et la transaction servant à initialiser certaines données de la simulation aura la priorité la plus élevée. Les transactions représentant les navires et les conteneurs auront des priorités identiques.



(Figure III.3.1.1.)

*III - 3.2. La vie des navires au terminal (Figure III.3.2.1.)*  
-----

Dans notre modèle de simulation, nous avons défini une loi d'arrivée des navires au terminal, basée sur l'observation du système réel. Cette loi est créée à l'aide d'une instruction `FUNCTION` du GPSS aisément modifiable par l'utilisateur du modèle.

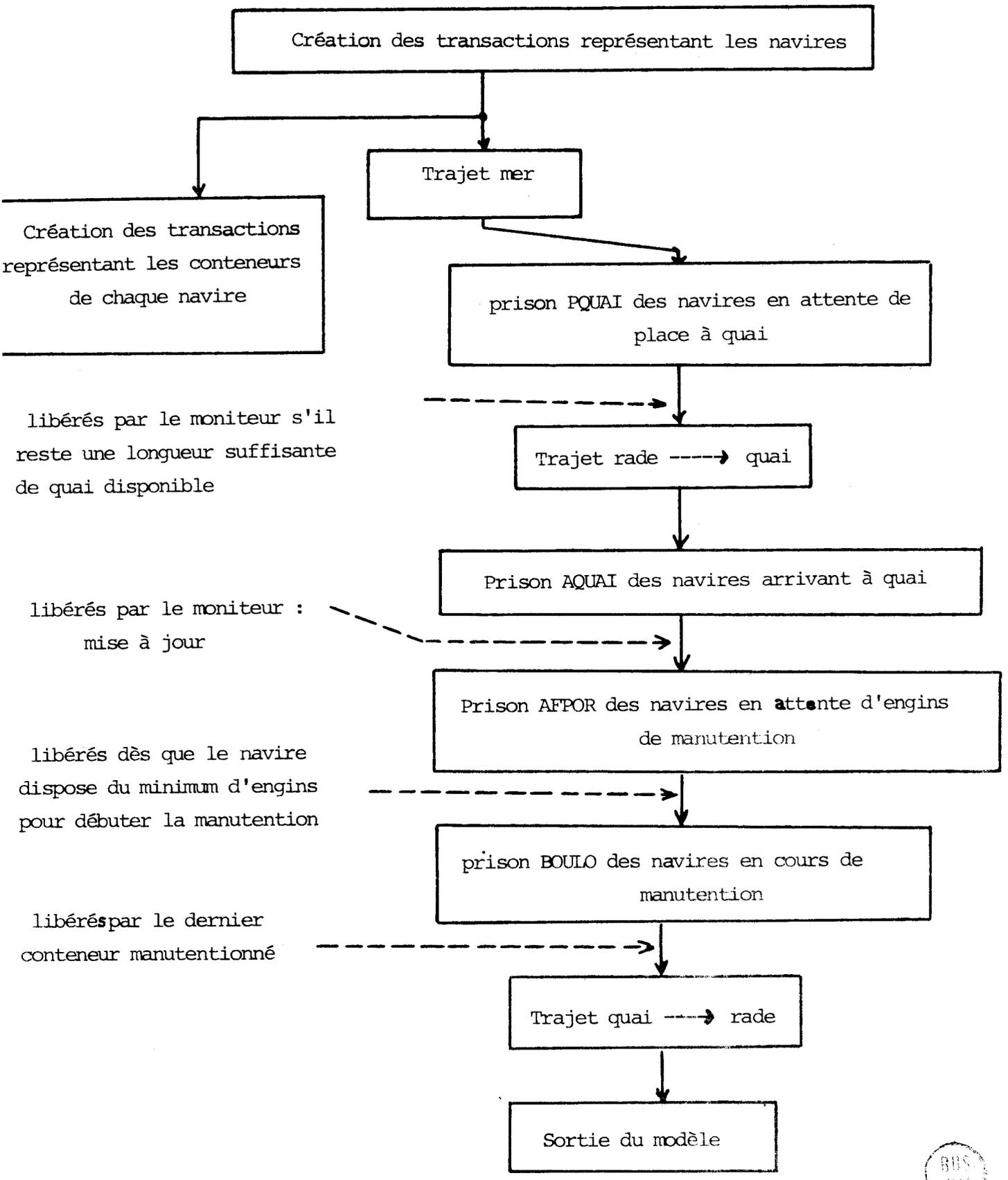
Dès que la transaction représentant un navire est générée, on lui affecte ses caractéristiques (numéro d'identification, numéro de compagnie, catégorie : longueur, nombre de cales, etc ...).

Ce sont les transactions "navire" qui déclenchent le processus de création des transactions "conteneur".

La première étape effectuée par le navire est son trajet mer. Une fois celui-ci effectué, il fait une demande de place à quai. Cette affectation de place à quai fera l'objet d'un des modules du moniteur. Si la demande est satisfaite, le navire peut alors commencer son trajet rade-quai qui correspond aux manoeuvres d'accostage. Dans la négative, il sera envoyé dans une prison d'attente en rade. Une nouvelle requête aura lieu quand un autre navire quittera le quai, libérant une certaine longueur à nouveau disponible.

Le navire étant arrivé à quai, la mise en service d'un ou plusieurs portiques de quai et d'engins de parc sera décidée par les autorités portuaires compétentes. C'est le déroulement des opérations de manutention des conteneurs qui imposera la marche à suivre quant aux différentes affectations, désaffectations et changements de cales nécessaires.

Les résultats que l'on détaillera à la fin du mémoire, sont accumulés et enregistrés pendant toute la simulation de la vie des navires au terminal.



(Figure III.3.2.1.)



*III - 3.3. Les conteneurs type import et shifting*  
-----

Rappelons tout d'abord que les conteneurs de type shifting sont manutentionnés de la cale au quai et inversement, car ils gênent le déchargement d'un ou de plusieurs conteneurs de type import. Pour cette raison, ils seront considérés comme des conteneurs "import" au déchargement et comme des conteneurs "export" au chargement.

La compagnie à laquelle appartient le navire arrivant au terminal, envoie par télex les renseignements concernant les conteneurs qui sont à décharger. Dans notre modèle, ceci correspond à la création des conteneurs "import". L'arrivée d'un navire est prévue environ 20 jours avant l'entrée en rade. Ceci permet aux autorités portuaires de prévoir l'emplacement qu'occupera chaque conteneur sur le parc. En ce qui nous concerne, les initialisations de début de simulation nous ont permis de découper la zone de stockage en plusieurs blocs. Une série de blocs correspond à la zone de stockage réservée à une compagnie donnée et chaque bloc est réservé en priorité à un type de conteneur. Une illustration de ce parc est donnée figure III.3.3.1.

Les transactions "conteneur" se réservent un emplacement sur le parc, selon la place disponible par blocs préférentiels. Nous avons vu que les conteneurs "shifting" sont mis de préférence en arrière-bec des portiques, afin d'éviter certaines étapes de manutention, néanmoins, dans la mesure de la place disponible, ils se réservent un emplacement sur parc car le souci majeur est de ne pas bloquer les portiques de quai et le nombre de places en arrière-bec est restreint. S'il se produit une saturation du parc, celle-ci apparaîtra lors de la sortie des résultats de la simulation avec le nombre de conteneurs qui n'ont pas trouvé d'emplacement.

Nous avons décrit grossièrement le découpage sur la figure III.3.3.1. Les blocs ont une superficie identique.

Lorsque le gerbage est autorisé, il varie entre 2 et 5 hauteurs de conteneurs, selon les engins de parc dont le terminal dispose. Nous avons signalé lors de la présentation d'un terminal (chapitre I) que les conteneurs vides

étaient stockés dans une zone spécifique. Il faut ajouter aux raisons déjà citées, qu'ils ne peuvent être stockés sous des conteneurs pleins sans risque d'écrasement.

		Numéro de compagnie						
		1	2	3	4	5	6	7
shifting	Bloc n° 1	11	21	31				
	2	12	22					
export	3	13						
	4							
import								
vide								
	10	20	30	40				

Figure III.3.3.1. - Configuration du parc de stockage

Les allées réservées à la circulation sont incluses dans chaque bloc, ce qui nous donne une surface de parc environ double de la superficie occupée par les conteneurs eux-mêmes.



Le déchargement d'un navire (Figure III.3.3.2.) peut commencer dès qu'un portique a été affecté à une cale. On a alors une première phase de translation, identique pour tous les conteneurs, il s'agit de la manutention cale-quai. Lors de l'arrivée à quai, il se présente plusieurs cas :

- Cas du conteneur "shifting". Il est mis en arrière-bec du portique, s'il reste un emplacement libre et dans ce cas, il libère la place qui lui avait été réservée sur le parc. S'il doit être mis sur le parc, il nécessite des engins. Les engins de parc sont libres; le conteneur transite vers la zone de parc et y est déposé. Les engins de parc ne sont pas disponibles, le conteneur bloque le portique jusqu'à ce qu'il soit pris en charge.

- Cas du conteneur "import" : Avec les mêmes contraintes dues aux engins de parc, le conteneur sera mis à son emplacement sur le parc. Le portique ne sera bloqué que s'il n'y a plus d'emplacement en arrière-bec disponible. Dans ce dernier cas, il faudra par la suite reprendre le conteneur pour l'amener sur le parc et ceci dès qu'on dispose d'engins de parc affectés ou non au portique en service, afin de dégager le plus rapidement possible la zone arrière-bec.

Le fait de distinguer chaque portique et chaque engin de parc nous permet de détecter les points d'engorgement lors de la manutention.

Dès que les conteneurs "shifting" sont mis à terre on les considère comme des conteneurs "export".

A ce niveau de la simulation, on a le choix entre deux politiques différentes de manutention. La politique sera choisie pour toute la durée de la simulation par initialisation de paramètre en début de programme.

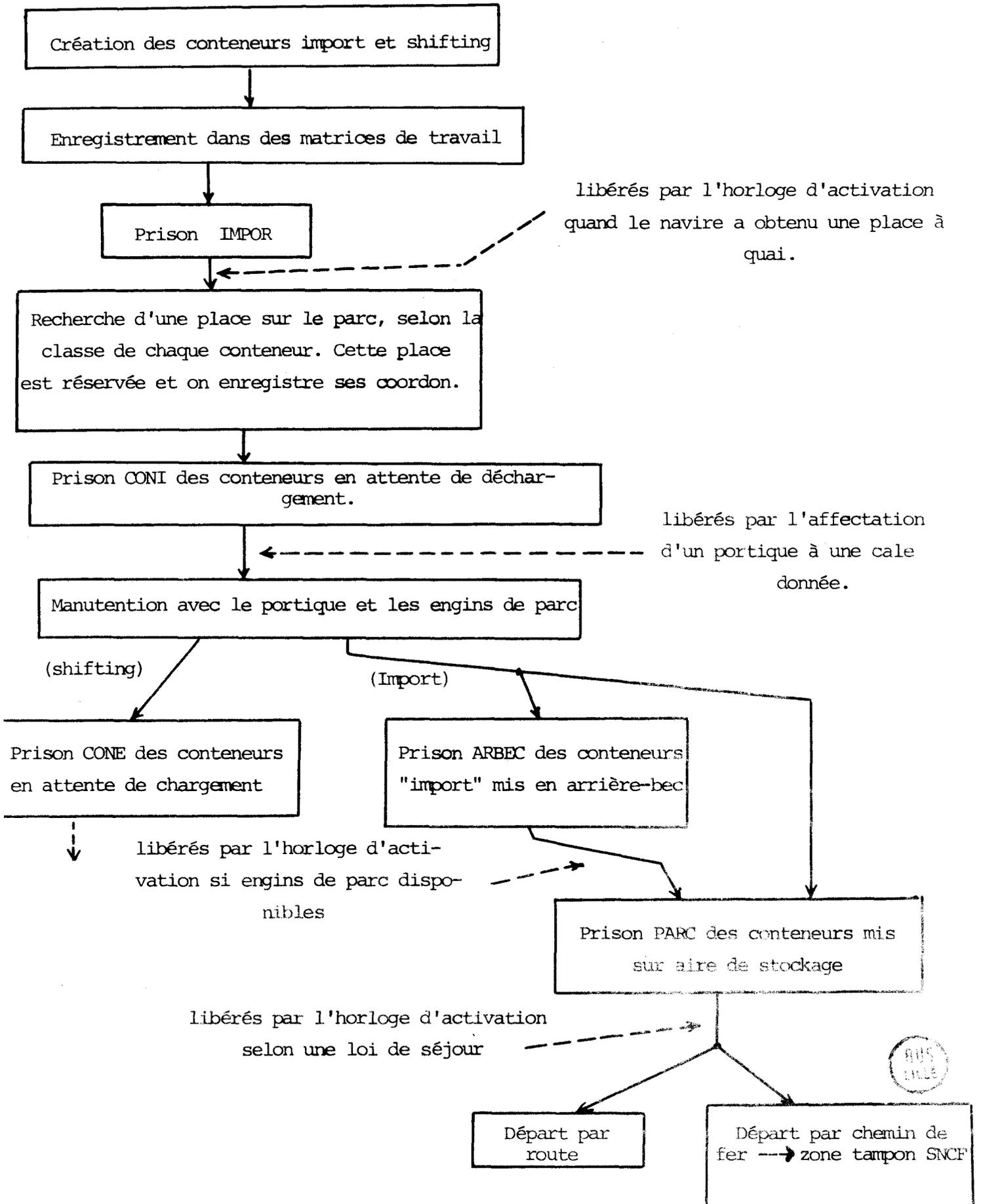
En premier lieu, on peut décider de faire la manutention import d'une cale et de commencer immédiatement la manutention export, sans qu'il y ait changement de cale de la part du portique de quai.

En deuxième lieu, on réalise d'abord toute la manutention import du navire. Ceci implique deux fois plus de mouvements du ou des portiques de quai d'une cale à l'autre. C'est seulement à la fin de cette manutention import que débutera le chargement.

La manutention import du navire étant terminée, les conteneurs séjournent sur le parc pendant un temps déterminé suivant l'observation dans la réalité. Ces conteneurs ont deux possibilités d'évacuation, soit par chemin de fer, soit par route. Le mode d'évacuation dans la réalité, comme dans notre modèle, est connu dès que le passage du conteneur au terminal est prévu.

La transition du parc de stockage S N C F au train et la manutention de chargement sur le train ne sont pas prises en compte dans notre modèle, étant donné que tout le matériel qui entre en jeu est propre à la S N C F.

Simulation du déchargement des navires



(Figure III.3.3.2.)

III - 3.4. *Les conteneurs de type export et shifting* (Figure III.3.4.1.)

---

Nous avons vu, lors de l'analyse d'un terminal, que les conteneurs destinés à être embarqués sur un navire donné, sont sur l'aire de stockage avant que le navire ne soit arrivé à quai.

Le processus d'arrivée des conteneurs, que ce soit par chemin de fer ou par route, est l'inverse du processus de départ des conteneurs de type import. Les étapes successives élémentaires de transition jusqu'au parc seront les mêmes.

Les renseignements concernant le nombre et les caractéristiques des conteneurs à embarquer, sont transmis par les autorités portuaires à la compagnie à laquelle appartient le navire qui, elle, établira un plan de chargement. Dans le cas de notre modèle de simulation, ceci correspond à l'affectation d'un numéro de cale à chaque transaction représentant un ou plusieurs conteneurs.

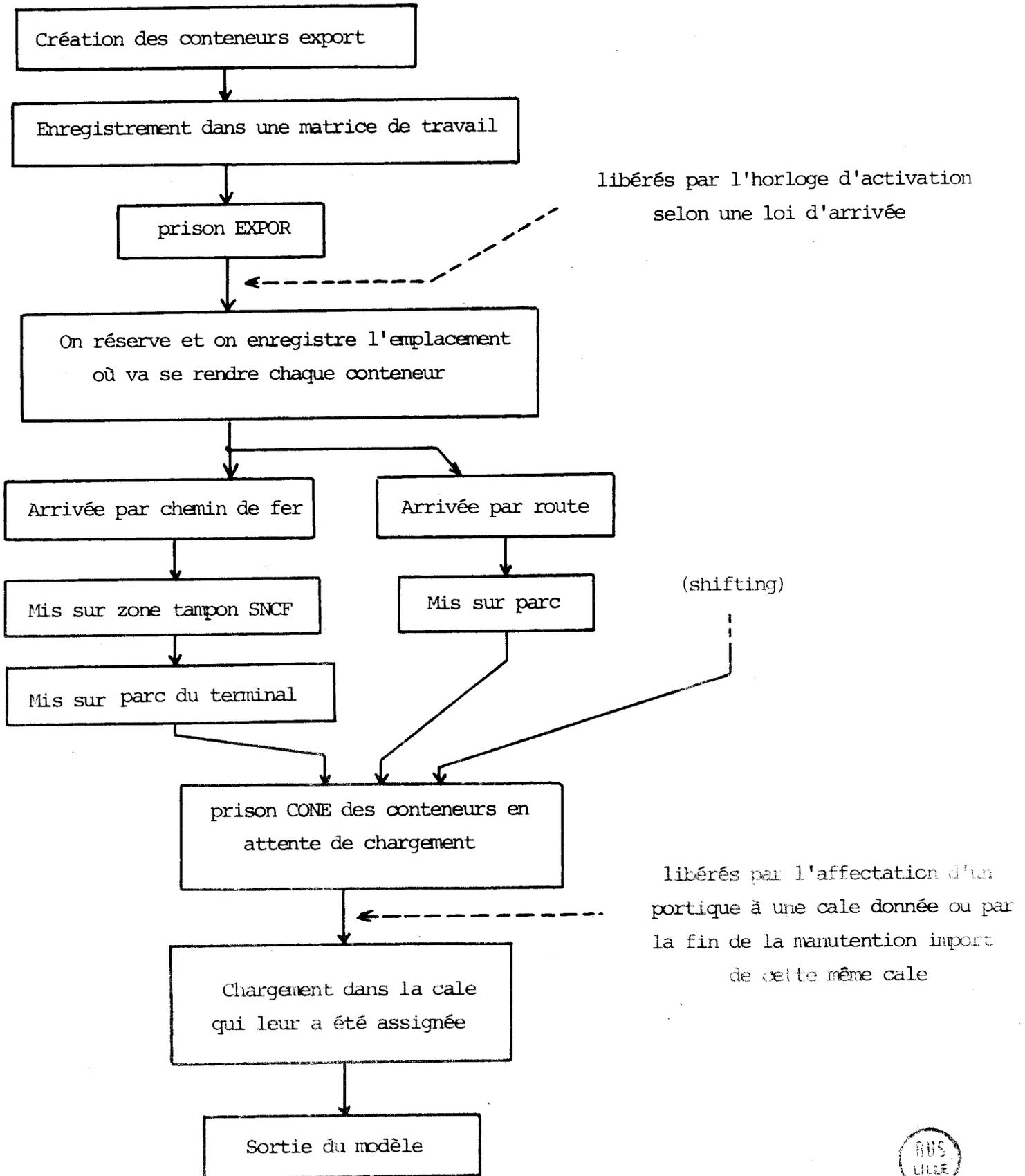
Pour les trajets du parc au portique de quai, les conteneurs suivront également les mêmes étapes élémentaires et dans l'ordre inverse du processus import.

Dans le cas du chargement, le portique de quai ne sera jamais bloqué, mais il peut se produire une attente de conteneur due aux performances ou au nombre insuffisant des engins de parc. Si le portique n'est pas disponible au moment où un conteneur se présente au quai, l'engin de parc sera bloqué. En effet, on ne dépose pas ce conteneur sur le quai, car il nécessiterait une opération de manutention supplémentaire s'il était déposé hors du rayon d'action du portique.

Dès que la manutention export d'un navire est terminée, celui-ci peut quitter le quai et effectuer son trajet quai → rade.

Remarque : Quel que soit le type de conteneur, l'emplacement qu'il occupe sur le parc est immédiatement disponible pour un autre conteneur, dès que ce premier est pris en charge par un engin de parc.

SIMULATION DU CHARGEMENT DES NAVIRES



(Figure III.3.4.1.)



III - 3.5. - Le moniteur

Comme nous l'avons vu dans les généralités au début de ce chapitre, le déroulement du moniteur ne doit, en aucun cas, ralentir la manutention des conteneurs. Pour cela, nous considérons que le moniteur effectue un travail de fond; il aura donc la priorité 0 (la plus basse).

D'autre part, aucune instruction contenue dans les différents modules ne devra bloquer l'exécution d'un de ceux-ci. Ceci aurait pour conséquence de rendre la prise de décision en un temps non nul et à l'heure de la décision l'état du système peut ne plus être le même qu'au moment de la demande.

Nous allons maintenant présenter les différents modules de ce moniteur.

Deux modules sont rattachés à la vie des navires au terminal :

- distribution de place à quai
- arrivée à quai

Trois modules gèrent la manutention des conteneurs :

- mise en service des portiques et des engins de parc
- désaffectation des portiques et des engins de parc
- lancement de chargement

Le moniteur possède enfin un dernier module qui est dû aux nécessités techniques du programme de simulation.

Distribution de place à quai (Figure III.3.5.1.)

On a pu constater dans la plupart des terminaux à conteneurs existants à l'heure actuelle, que le quai n'est pas divisé en postes, mais est considéré comme une longueur disponible pour y faire accoster les navires.

Dans le cas d'un "découpage" en postes ou demi-postes, un navire voulant accoster ne peut occuper qu'un nombre entier de postes ou de demi-postes. La conséquence immédiate de ce découpage est de diminuer le nombre de navires pouvant accoster. Néanmoins, ce mode de mise à quai est quelquefois retenu dans les terminaux disposant d'une grande longueur de quai.

Au vu de cette remarque, nous avons retenu, pour notre modèle, la solution d'une longueur de quai disponible. Dans notre modèle, l'opération de déhalage (glissement des navires le long du quai pour permettre l'accostage d'un navire supplémentaire), n'est pas possible.

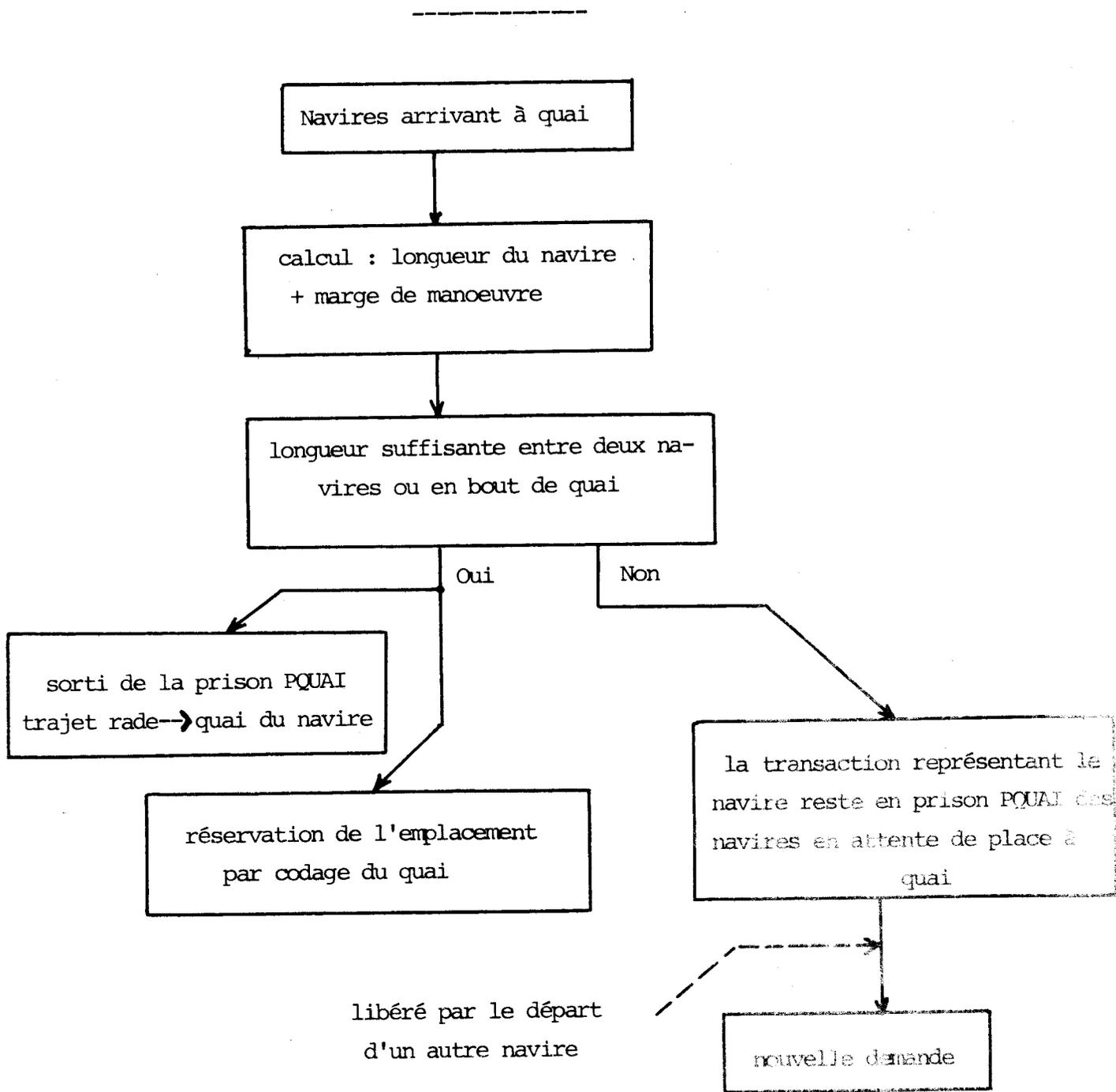
Tout d'abord, l'arrivée des navires est prévue suffisamment longtemps à l'avance pour permettre de prévoir l'emplacement des navires et de plus, l'opération de déhalage n'étant pas gratuite en temps et en matériel, elle n'est pas effectuée systématiquement dans tous les terminaux. Signalons que le modèle de simulation du port autonome de Marseille reproduit cette opération de déhalage.

Dans notre cas, le navire fait une demande de place à quai lorsqu'il est arrivé en rade. Compte tenu de sa longueur et de la marge de manoeuvre qu'il nécessite, on lui attribue une place si la longueur du quai disponible restante est suffisante. Cette place disponible peut être soit en bout de quai, soit entre deux autres navires. Si l'allocation de place à quai est satisfaite, on enregistre les renseignements nécessaires à la réservation de cette place.

Arrivée à quai des navires

La représentation de l'arrivée à quai d'un navire (après son trajet rade-quai), se fait sous la forme de sauvegarde d'informations dans des matrices.

DISTRIBUTION DE PLACE A QUAI



(Figure III - 3.5.1.)



Ces sauvegardes nous permettront de gérer le déroulement de la simulation tant au point de vue des navires que des conteneurs qu'ils transportent. Ces renseignements de départ évolueront au fur et à mesure de l'avancement de la manutention.

Voyons maintenant les modules concernant la manutention des conteneurs.

#### Mise en service des portiques de quai et des engins de parc (Figure III.3.5.2)

Dans notre modèle, nous avons introduit des horaires de travail. Pendant les six premiers jours de la semaine, trois shifts de 6 heures sont assurés, le premier débutant à 7 heures, le deuxième à 13 heures et le dernier à 19 heures. Le dimanche, seul le premier shift (de 7 heures à 13 heures) sera assuré. Bien entendu, ces horaires sont modifiables à souhait et on peut aller jusqu'à un service de 24 heures sur 24. La première condition de mise en service d'un portique est que la demande soit faite pendant les horaires d'activité.

A chaque demande d'affectation de portique, on s'assure tout d'abord qu'il reste un portique disponible, mais aussi un minimum d'engins de parc de chaque type pour assurer l'évacuation des conteneurs vers la zone de stockage.

Par initialisation dans notre modèle, nous avons réservé trois politiques d'affectation de portique. Cette politique est choisie pour toute la durée de la période simulée.

. Premier cas : Dans la mesure du matériel disponible, on essaie d'affecter un maximum de portiques au navire le plus ancien à quai. Ces portiques sont accompagnés d'un certain nombre d'engins de parc de chaque type. Le nombre minimum et le nombre maximum d'engins de parc nécessaires est fixé par l'utilisateur du modèle en initialisation du programme. On mémoriserà le cas des portiques qui ne disposent pas pour le début de la manutention, du maximum d'engins de parc, afin de compléter cette affectation dès que possible.

. Deuxième cas : Les demandes de mise en service sont faites par les navires pour eux-mêmes. C'est-à-dire qu'on ne cherchera pas systématiquement à servir le navire le plus ancien à quai. Dans la mesure des ressources disponibles, on affectera, au navire demandeur, deux portiques avec leurs engins respectifs. Si un seul portique a été mis en service, il n'y aura pas de deuxième affectation pour ce navire.

. Troisième cas : On commence toujours par satisfaire, dans la mesure du matériel disponible, le navire le plus ancien à quai, mais on lui affectera au maximum deux portiques. Contrairement au cas précédent, si lors du premier essai d'affectation il n'a bénéficié que d'un seul portique, une deuxième demande sera faite dès qu'un portique sera libéré par un autre navire.

Dans les trois cas, la demande sera mémorisée pour un navire n'ayant eu aucune demande satisfaite.

Remarques :

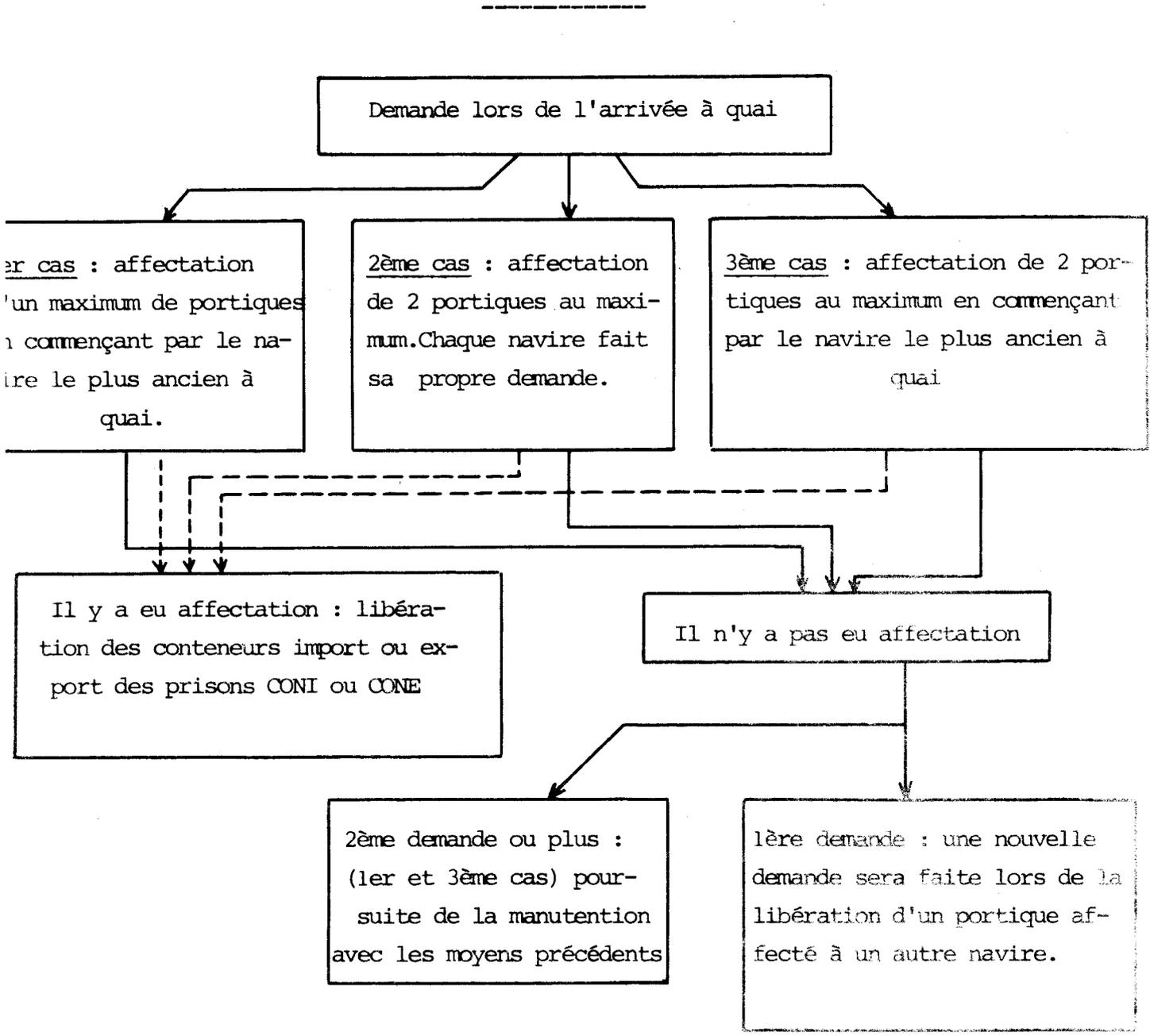
Les portiques sont affectés en priorité aux cales qui nécessitent des mouvements de type import et ensuite seulement aux cales nécessitant des mouvements de type export.

De plus, dans le cas d'affectations multiples pour un même navire, deux portiques ne peuvent travailler sur des cales contiguës. On évitera ce phénomène en n'affectant un portique à une cale que si les cales voisines ne sont pas en cours de manutention.

Enfin, l'affectation d'un portique à une cale donnée n'est, à priori, valable que pour un type de mouvement (import ou export).

Nous verrons dans le paragraphe suivant, les variantes de ce processus.

MISE EN SERVICE DES PORTIQUES



Dès la première mise en service, le navire est enlevé de la liste AFPO des navires en attente de portique.

(Figure III.3.5.2.)



Désaffectation des portiques et des engins de parc (Figure III.3.5.3.)

La prise de décision de ce module dépend des politiques d'affectation et de manutention que l'on a choisi au début de la simulation.

La demande de désaffectation a lieu à la fin de la manutention de chaque cale. Deux politiques de manutention sont possibles à ce niveau :

Premier cas : On a décidé de faire tous les mouvements de type import pour un navire donné avant de commencer les mouvements de type export. Dans ce cas, il y aura désaffectation du portique et de ses engins à chaque fin de cale.

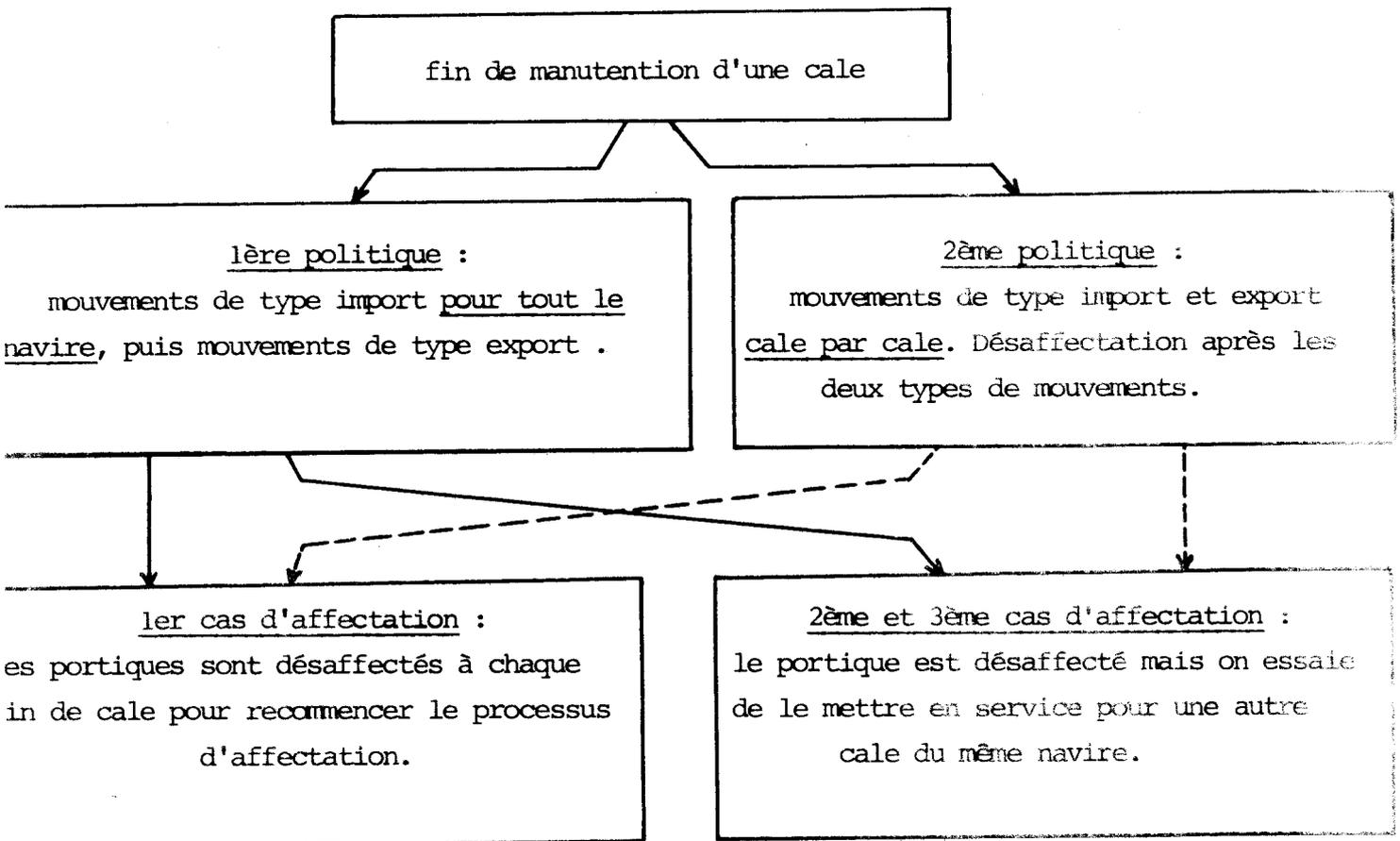
Deuxième cas : On réalise l'import d'une cale puis l'export de cette même cale avant de déplacer le portique. Il n'y a donc pas de désaffectation à la fin des mouvements import dans la mesure où la cale nécessite une manutention export.

D'autre part, la désaffectation dépend de la politique de mise en service des portiques. Dans le cas 1 que nous avons décrit dans la partie précédente (affectation d'un maximum de portique), il y aura désaffectation totale à chaque fin de cale et on recommencera éventuellement le processus de mise en service si la manutention du navire n'est pas terminée.

Dans les cas 2 et 3, il n'y aura désaffectation totale que si les manutentions "import" et "export" du navire sont terminées. Dans tous les autres cas, lors d'une fin de cale, on essaiera de réaffecter le portique à une autre cale du même navire. Ceci avec les mêmes contraintes de cale non contiguës.

C'est la dernière désaffectation de portique pour un navire qui déclenche le processus de départ du quai de ce dernier.

DESFFECTATION DES PORTIQUES ET DES ENGIN DE PARC



(Figure III.3.5.3.)



Lancement de chargement

Ce module a seulement pour but de lancer le début de la manutention "export" des cales auxquelles un portique est en service, et ceci uniquement dans le cas où l'on a choisi la politique de faire l'import et l'export d'une même cale avant de déplacer le portique.

Module annexe

Pour le bon déroulement de la simulation, on se sert de plusieurs matrices servant à stocker l'état d'avancement de la manutention des navires.

En fait, ce dernier module n'a aucune réalité physique quant au système simulé. Nous avons vu qu'un navire cesse de faire partie du modèle dès qu'il a effectué son trajet quai-rade. C'est à ce moment qu'intervient ce module en ce sens qu'il supprime tous les enregistrements matériels concernant les navires quittant le terminal.

Ceci a pour but de simplifier pour les navires encore à quai, les recherches d'informations et permet de diminuer l'encombrement mémoire nécessaire pour un trafic donné.

Bien entendu si certains résultats s'avèrent intéressants pour l'exploitation du modèle, ils seront stockés en vue d'une impression ultérieure.

III - 3.6. - *L'horloge d'activation*

-----

Elle a tout d'abord un rôle d'initialisation. En effet, certaines données doivent être enregistrées dès le début de la simulation :

- codage de la configuration du parc en fonction :
  - . du numéro de compagnie
  - . du type de conteneur
  - . du niveau de gerbage autorisé
  
- nombre d'engins de parc à affecter à chaque portique de quai.

Pour ce faire, on donnera à la transaction représentant cette horloge, la priorité la plus élevée.

En dehors de ce rôle d'initialisation, elle permet en fonction de l'unité de temps que l'on a choisie pour la simulation, de fixer :

- des horaires de travail
- des arrêts d'activité pour raisons extérieures.

III - 3.7. *L'impulsion panne*

-----

Cette impulsion génère les pannes de longue durée des portiques de quai en rendant ces derniers non disponibles. Le taux de pannes est basé sur l'expérience.

III - 3.8. - L'horloge de simulation

Cette transaction a pour seul but de fixer la durée de la période simulée en fonction de l'unité de temps choisie par l'utilisateur.

III 4. CONCLUSION

La modularité du programme nous permet d'envisager des modifications importantes tant au point de vue principe de fonctionnement du modèle qu'infrastructures et équipement du terminal.

L'ajout d'un ou plusieurs modules ne change en rien la compréhension du modèle si on prend la précaution de respecter l'indépendance d'un module vis-à-vis des autres en ce qui concerne la tâche à représenter.

CHAPITRE IV



EXPLOITATION DU MODELE

000

#### IV - 1. INTRODUCTION

Dans un premier temps, nous avons testé les possibilités d'exploitation du modèle avec des données non représentatives d'un système réel. Ces données ont été choisies pour deux raisons :

- La première est de pouvoir observer l'incidence de la variation d'un certain nombre de paramètres du système sur les performances globales.

- La deuxième est de minimiser le temps d'exécution d'une simulation. Pour cela, la grandeur la plus significative que nous avons réduit est le nombre de conteneurs transportés par chaque navire.

Dans un deuxième temps, il nous a été confié la tâche de représenter le terminal à conteneurs du port rapide de Dunkerque-Ouest.

Le premier objectif de cette représentation consiste à se faire une idée de la validation du modèle par la simulation de situations dont on connaît très bien les résultats.

Le deuxième objectif, selon les perspectives d'avenir qu'envisagent les autorités du Port Autonome, sera de mettre en évidence les conséquences d'une augmentation de trafic et de définir à partir de quel seuil il faudra envisager une modification qualitative ou quantitative des moyens de manutention et des infrastructures du terminal.

#### IV - 2. PRESENTATION DES GRANDEURS D'ENTREE MODIFIABLES

Vu la diversité des initialisations possibles, nous n'avons pas étudié tous les cas susceptibles de se produire dans la réalité. Notre but est de montrer les résultats que l'on peut tirer d'un tel modèle. Chaque organisme intéressé devra utiliser au mieux les possibilités de celui-ci selon ses besoins personnels.

Avant d'aborder quelques cas particuliers, nous allons voir, du point de vue quantitatif, les grandeurs modifiables.

En ce qui concerne les infrastructures du terminal, on peut imposer une capacité de stockage sur parc quelconque avec ou sans emplacement occupés au départ de la simulation. La longueur de quai, disponible pour l'accostage des navires, est initialisable.

Dans notre modèle, elle est représentée sous forme d'un nombre de modules de 20 pieds. Il n'y a pas non plus de limite pour cette grandeur. On se sert d'une matrice pour permettre ou non la mise en arrière-bec des portiques.

Le nombre de places disponibles sur cet arrière-bec dépend, dans la réalité, des performances des portiques de quai utilisés; là aussi on aura la possibilité d'un nombre quelconque d'emplacements sur tout ou partie de la longueur du quai.

Voyons maintenant le problème des engins nécessaires au fonctionnement du terminal. Le nombre de portiques de quai utilisables a été fixé arbitrairement entre 1 et 10.

Dans le cas des terminaux à conteneurs actuels, on n'envisage pas l'utilisation de 10 portiques qui représentent un investissement énorme et qui, de plus, n'auraient pas la possibilité de travailler dans de bonnes conditions vu les problèmes de gêne mutuelle.

Nous avons vu dans la description du modèle que les engins de parc sont représentés par des stations multiples. Ici aussi on peut envisager l'emploi d'un nombre quelconque d'engins de chaque type. En effet, la capacité de ces stations multiples est décidée par l'utilisateur du modèle selon l'investissement qu'il consacre à l'achat d'engins.

Partant d'un équipement pour un terminal donné, il nous reste à reproduire un trafic de navires et de conteneurs. Pour cela, rappelons que l'on a créé un certain nombre de fonctions à partir des générateurs de nombres aléatoires, dont dispose le GPSS. Pour chaque simulation, ces lois peuvent être modifiées.

Nous récapitulons ci-dessous ces lois et leur rôle respectif :

- ALEAS : loi d'arrivée des navires
- NBECON : nombre de conteneurs à manutentionner par navire
  
- SEJI : loi de séjour sur parc des conteneurs arrivant par navire
  
- SEJE : loi d'arrivée des conteneurs en provenance de l'Hinterland
  
- LONNA : catégorie des navires
  
- NOCAL : plan de déchargement et chargement du navire par affectation d'un numéro de cale à chaque conteneur.

Ainsi, le nombre de navires et de conteneurs arrivant au terminal sera fonction de la durée de la période simulée et des initialisations de ces lois.

Il faut maintenant respecter certaines conditions de travail du terminal. Nous avons répertorié dans le chapitre précédent, les différents choix de politiques de manutention et d'organisation.

Nous avons également introduit des shifts de travail.

Dans le cas général, l'activité d'un terminal sur une journée est divisée en 3 shifts variant de 6 h à 7 heures. Ceci est valable pendant 6 jours de la semaine; un seul shift étant assuré le 7ème jour (dimanche) et les jours fériés.

Dans notre modèle, les horaires d'activité sont modifiables à volonté, mais nous n'avons pas tenu compte des jours fériés.

Signalons enfin la dernière loi de notre modèle (ALEA 1). C'est celle-ci qui introduit les pannes de longue durée des portiques de quai; ces pannes peuvent atteindre 1 journée.

Il est intéressant de réaliser la simulation représentant une période réelle maximum. On sera limité par la capacité de calcul de l'ordinateur. C'est l'utilisateur du modèle qui choisira le compromis entre la période simulée et le temps de calcul selon l'ordinateur dont il dispose et les résultats qu'il attend du modèle.

#### IV - 3. RESULTATS FOURNIS PAR LE MODELE

Nous allons d'abord voir les résultats fournis par le modèle dans leur ensemble. Certains d'entre-eux nécessiteront une reprise manuelle, afin d'être plus explicites aux yeux d'un utilisateur n'ayant pas connaissance du langage GPSS et/ou n'ayant pas participé à l'élaboration du modèle.

Voyons tout d'abord les résultats des files d'attente au quai.

- Attente de place à quai : Elle traduit les navires qui ont attendu en rade le départ d'un autre navire leur permettant d'accoster.
  
- Attente de portiques de quai et d'engins de parc : Délais entre l'obtention d'une place à quai et l'affectation d'un premier portique de quai. Rappelons que la mise en service d'un portique de quai n'est possible que si ce dernier dispose d'un minimum d'engins pour effectuer les transitions quai-parc et inversement.
  
- Attente d'engins de parc : pour les conteneurs arrivant de l'intérieur du pays par chemin de fer et par route et allant vers le parc. Dans un premier temps, ces conteneurs ne sont pas manutentionnés par des engins affectés à un portique.

A partir de ces files d'attente, on obtient le nombre d'individus qui sont passés dans chacune d'elles, avec :

- nombre d'individus à temps d'attente nul et non nul
- temps moyen d'attente pour les individus à temps d'attente non nul
- nombre d'individus dans la file à l'instant où s'arrête la simulation
- nombre moyen d'individus dans la file pendant la période simulée
- nombre maximum d'individus dans la file pendant la période simulée.

Chaque portique de quai est représenté par une station simple ou FACILITY. Ceci nous permet de connaître :

- le nombre de conteneurs manutentionnés par chaque portique
- le temps d'occupation moyen de chaque portique par mouvement , si on ne tient pas compte des pannes de longue durée
- le temps d'occupation total de chaque portique comparé à la période simulée.

Les engins de parc sont formés d'un ensemble de stations multiples ou STORAGES. Pour chaque type d'engins (remorque, tracteur, cavalier), on dispose d'une station multiple afin de définir les moyens du terminal. De plus, nous avons introduit également pour chaque type d'engin, une station multiple associée à chaque portique. Ces stations particulières ont pour rôle de représenter les engins au service de chaque portique. Les principaux résultats sont :

- le nombre de mouvements effectués par chaque groupe d'engins
- le temps moyen d'utilisation par mouvement
- le temps d'utilisation comparé à la durée de la période simulée.

Dans la description du modèle, les trajets effectués par les conteneurs lors de leur passage au terminal, ont été divisés en étapes élémentaires. Dans la programmation du modèle, nous avons réalisé une totalisation des temps de passage des conteneurs lors de chaque groupe d'étapes. Cette totalisation est faite au moyen d'un certain nombre de tables pour lesquelles nous avons défini des classes de fréquences.

Pour chaque table on aura :

- le nombre d'individus ayant effectué ce groupe d'étapes
- leur répartition par classe de fréquence
- le temps moyen mis par un individu pour effectuer ce groupe d'étapes.
- l'écart type
- le pourcentage d'individus par classe de fréquence
- le pourcentage cumulé et le pourcentage restant à chaque classe de fréquence.

Signalons un point technique important pour la programmation. Les résultats fournis par chacune de ces tables peuvent paraître impressionnants; en fait, ils ne nécessitent pas une programmation compliquée. Deux instructions sont suffisantes par table.

- une première pour définir les classes de fréquence et leur nombre
- une deuxième (TABULATE). C'est lors du passage d'une transaction sur cette instruction que seront enregistrées les informations concernant l'individu représenté. Le GPSS se charge lui-même d'accumuler les renseignements au long de la simulation et d'effectuer les calculs statistiques.

Suite à cette remarque, nous allons avoir les différents résultats qui, eux, sont tenus à jour par le modèle.

Ce sont principalement les résultats matriciels.

Résultats concernant les navires :

- heure d'arrivée au terminal
- heure de début de déchargement
- heure de fin de déchargement
- heure de début de chargement
- heure de fin de chargement
- heure de départ du quai
- temps total de manutention
- temps d'escale
- longueur de chaque navire venu au terminal
- nombre de conteneurs manutentionnés par navire.

Remarque :

L'heure de fin de déchargement et l'heure de début de chargement n'apparaîtront que si on a choisi la politique de faire tout l'import du navire avant de commencer l'export.

Résultats concernant le parc et le quai :

- Etat d'occupation des différentes zones de stockage à l'instant où s'arrête la simulation.
- Nombre maximum de conteneurs sur le parc pendant la période simulée.
- Etat d'occupation du quai.

En reprenant manuellement un certain nombre de ces résultats, on peut obtenir la longueur de quai utilisée et le nombre de navires à quai en "découpant" la période simulée par tranches horaires.

Ces résultats sont intéressants dans la mesure où ils permettent de savoir si un ou plusieurs équipements (quai, parc, nombre d'engins) sont ou ne sont pas disproportionnés comparés au reste des possibilités du terminal.

#### IV - 4. PRESENTATION DE QUELQUES ESSAIS EFFECTUES

Afin de limiter le temps d'exécution du programme, dans les exemples que nous avons traités, la durée de la période simulée varie de un mois à deux mois. Les données que nous avons choisies ont pour but de reproduire approximativement les possibilités des principaux terminaux français à l'heure actuelle. Pour cela, le trafic étant d'environ 40 000 conteneurs par an, nous avons représenté trois conteneurs du même type par une seule transaction du modèle. Il s'avère, au vu des résultats, que les calculs statistiques restent tout à fait corrects.

Nous ferons arriver au terminal, en moyenne, un navire par jour, l'intervalle minimum entre deux arrivées consécutives étant 0 et l'intervalle maximum étant 2 jours. Ces navires pourront être de 3 catégories différentes; chaque catégorie étant caractérisée par la longueur du navire donc sa capacité en conteneurs. Les longueurs choisies dans notre modèle sont les suivantes :

- 1ère catégorie : 95 mètres
- 2ème catégorie : 155 mètres
- 3ème catégorie : 215 mètres.

A ces navires seront affectées respectivement une moyenne de 20, 40 ou 60 transactions, représentant 60, 120 et 180 conteneurs tous types confondus.

Rappelons que l'on ne fait intervenir dans le modèle que les conteneurs qui ont un rôle à jouer dans la vie du terminal que l'on simule.

Les principales grandeurs que nous avons fait varier dans les essais que nous avons effectués sont les suivantes :

- le nombre de portiques de quai disponibles
- le nombre d'engins de parc de chaque type
- la politique de manutention
- les performances des portiques et des engins de parc
- les horaires de travail.

En ce qui concerne les moyens de manutention du terminal, nous avons fait varier, pour les différentes politiques de manutention possibles, de 2 à 4 le nombre de portiques de quai disponibles en affectant à chacun d'eux au maximum, 2 ou 3 engins de parc de chaque type.

Les performances des engins de manutention, dans les essais effectués, sont basés sur les performances des engins existant actuellement sur les terminaux français, à savoir :

Cadence commerciale des portiques de quai : 15 à 20 conteneurs par heure ce qui donne un cycle élémentaire de 3 à 4 minutes.

En ce qui concerne les performances des engins de parc, un modèle a été réalisé au début de l'étude pour tester l'influence de la distance à parcourir sur le temps de trajet des engins. Cet essai a été effectué sur 10 000 trajets. On a constaté pour des trajets extrêmes, une variation maximale de 30 %. A partir d'un temps de trajet moyen, le GPSS nous permet de faire intervenir un aléa au moyen d'une seule instruction (ADVANCE: temps moyen, écart autour de la moyenne). Pour les deux types d'engins que nous avons fait intervenir dans notre modèle, nous avons pris les cadences ci-dessous :

- cavalier : trajet quai vers parc = 3 minutes  $\Rightarrow$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{minimum 2 minutes} \\ \text{maximum 4 minutes} \end{array} \right.$

- ensemble tracteur-remorque :

trajet quai vers parc = 5 minutes  $\Rightarrow$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{minimum 3 minutes} \\ \text{maximum 7 minutes} \end{array} \right.$

Signalons un dernier point en ce qui concerne l'arrière-bec des portiques. Quoique la majorité des portiques de quai actuels aient la possibilité de stocker quelques conteneurs en arrière-bec, on permet, dans le modèle, la suppression de ces emplacements afin de tester l'influence sur la cadence de déchargement des portiques d'un nombre insuffisant d'engins de parc.

*IV - 4.1 - Comparaison des performances selon le nombre de portiques disponibles.*  
-----  
-----

Pour cela, nous avons repris manuellement les résultats matriciels donnés par le modèle suivant plusieurs essais effectués. Nous faisons apparaître sur les figures IV.4.1.1., IV.4.1.2. et IV.4.1.3., les temps d'escale moyens et les temps de manutention moyens par catégorie de navire. Le gain de temps d'escale obtenu avec 3 portiques de quai en comparaison avec 2 portiques varie de 10 à 45 % alors que le gain de temps de manutention varie de 0 à 30 %.

En fait, nous verrons par la suite que les résultats de la figure IV.4.1.3. sont biaisés. Ayant choisi l'affectation d'un maximum de portiques au navire le plus ancien à quai (AFFEC = 0) comme politique de mise en service, le modèle ne permet pas de faire intervenir un facteur de gêne dû au fait que des portiques travaillant près les uns des autres ralentissent mutuellement leur cadence. Cette perte de temps a été constatée dans la réalité mais aucune grandeur ne permet de la mesurer. Elle est due, en partie, au grand nombre de mouvements d'engins de parc sur une zone de quai restreinte.

*IV- 4.2. - Comparaison des performances selon la politique de manutention choisie.*  
-----  
-----

Nous avons vu que deux politiques de manutention sont possibles dans le modèle. Elles sont initialisées par un paramètre :

- POLIT = 1 : réalisation de tous les mouvements de type import du navire puis de tous les mouvements de type export.

- POLIT = 0 : réalisation, cale par cale, des deux types de mouvements en commençant par la manutention import.

La figure IV.4.2.1. montre que la réalisation des deux types de mouvements cale par cale donne de meilleurs résultats. Dans la mesure du possible, on aura intérêt à utiliser ce type de manutention.

Le gain de temps peut s'expliquer par le fait qu'il y a moins de mouvements des portiques de quai d'une cale à une autre pour un même navire.

Cette politique n'est pas toujours applicable. En effet, il peut être nécessaire de réaliser le plus rapidement possible tous les mouvements de type import dans le cas où un impératif est fixé par des horaires de train par exemple, pour la liaison avec l'intérieur du pays.

#### *IV - 4.3 - Différentes politiques de mise en service des portiques de quai.*

-----

Au vu des figures IV.4.3.1. et IV.4.3.2., il faudrait, dans la mesure du possible, affecter un maximum de portiques à un même navire (AFFEC = 0).

Dans notre modèle AFFEC = 1 signifie que l'on affecte au maximum deux portiques au navire qui en fait la demande et AFFEC = 2 correspond à l'affectation de deux portiques au maximum au navire le plus ancien à quai.

Les essais effectués avec AFFEC = 0 ne correspondent pas à la réalité, ils sont donc inexploitable pour une conclusion objective.

Pour les deux autres politiques de mise en service, on constate des temps d'escale et de manutention à peu près identiques. Nous expliquons cette concordance par le fait que le trafic que nous avons représenté correspond en moyenne à une arrivée de navire par jour. Or, la moyenne des temps d'escale des plus gros navires n'excède pas une journée. Il s'ensuit donc que les deux politiques possibles sont équivalentes puisqu'un navire effectuant sa demande pour lui-même est très souvent le navire le plus ancien à quai.

Il faudrait avoir des arrivées de navires plus fréquentes pour constater une différence sensible des temps d'escale et de manutention.

Nous avons effectué quelques essais avec des arrivées de navires très fréquentes, mais ceux-ci transportant peu de conteneurs. En fait, la simulation ne représentait aucun terminal réel; c'est pour cette raison que nous n'avons pas fait

apparaître de résultats graphiques. On a constaté des temps de manutention équivalents avec toutefois de meilleurs résultats pour AFFEC = 2. Quant aux temps d'escale ils se sont avérés être beaucoup plus grands pour AFFEC = 1.

L'extrapolation de ces résultats avec un nombre de conteneurs plus important, reste problématique. Si le cas se présentait dans la réalité, il serait vraisemblablement nécessaire de modifier le modèle afin de tenir compte des arrangements entre les différentes compagnies maritimes et les autorités portuaires; toujours dans le but d'immobiliser le moins possible les gros navires.

On pourrait envisager une priorité d'affectation de portiques aux porte-conteneurs de troisième génération.

#### *IV - 4.4. - Influence des performances des portiques de quai.*

---

Rappelons que les deux cadences commerciales que nous avons prises en compte sont :

- 20 conteneurs par heure
- 15 conteneurs par heure.

Les figures IV - 4.4.1., IV - 4.4.2 et IV - 4.4.3 nous montrent les gains de temps sur la manutention et l'escale grâce à une cadence commerciale de 20 conteneurs par heure. Ce gain varie de 0 à 30 % selon la catégorie du navire et la politique de mise en service des portiques.

La figure IV - 4.4.4. met en évidence l'influence de ces deux cadences sur le temps mis par les conteneurs entre l'heure à laquelle le plan de chargement du navire est connu et l'heure à laquelle ils arrivent sur leur zone de parc, ceci pour un nombre et des performances d'engins de parc identiques.

*IV - 4.5. Influence des performances des engins de parc*

Ces résultats apparaissent sur les figures IV - 4.5.1. et IV - 4.5.2. en ce qui concerne les temps d'escale et de manutention des navires et sur la figure IV - 4.5.3. pour les temps de transit des conteneurs vers le parc.

Les performances utilisées pour ces essais sont les suivantes :

- cavalier : trajet moyen quai → parc 3 et 4 minutes
- cavalier : temps de manutention : 3 minutes
- ensemble tracteur-remorque : trajet moyen quai → parc : 5 et 6 minutes.

Du point de vue des temps d'escale et de manutention des navires, de légères différences que l'on constate ne sont pas significatives d'une détérioration des performances générales du terminal.

En effet, après analyse des temps d'utilisation des stations simples représentant les portiques de quai, il apparaît que les engins de parc les moins performants "couvrent" la cadence commerciale des portiques s'ils sont au moins 3 de chaque type affiliés à un portique, ce qui est le cas dans les essais effectués dont nous présentons les résultats.

Sous cette hypothèse, la différence de temps apparaissant sur les courbes de la figure IV - 4.5.3. représente la perte de temps occasionnée uniquement lors du trajet du quai vers la zone du parc.

Dans tous les résultats que nous avons présentés précédemment, nous avons considéré le cas d'un terminal ayant 3 shifts de 6 heures d'activité pendant 6 jours et un shift de 6 heures le 7ème jour. Nous avons effectué un essai comparatif des temps de passage des navires au terminal dans le cas où celui-ci serait en activité 24 heures sur 24.

La figure IV - 4.5.4. nous explicite la répercussion de ces horaires sur les performances globales du terminal (représentées par le temps d'escale des navires).

AFFEC = 2 40 000 CONT./AN  
INTI = 1 440 mm

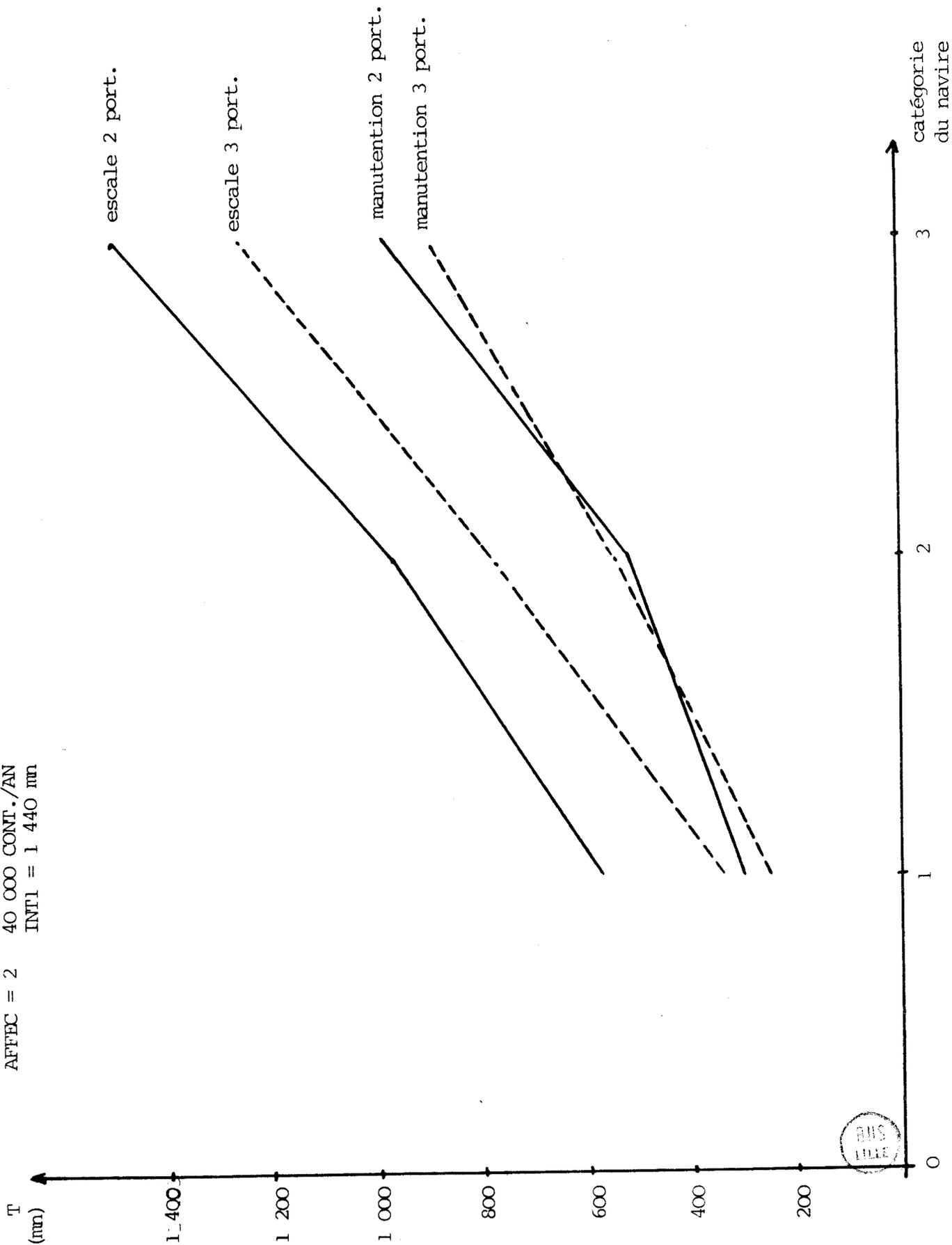


Figure IV - 4.1.1.

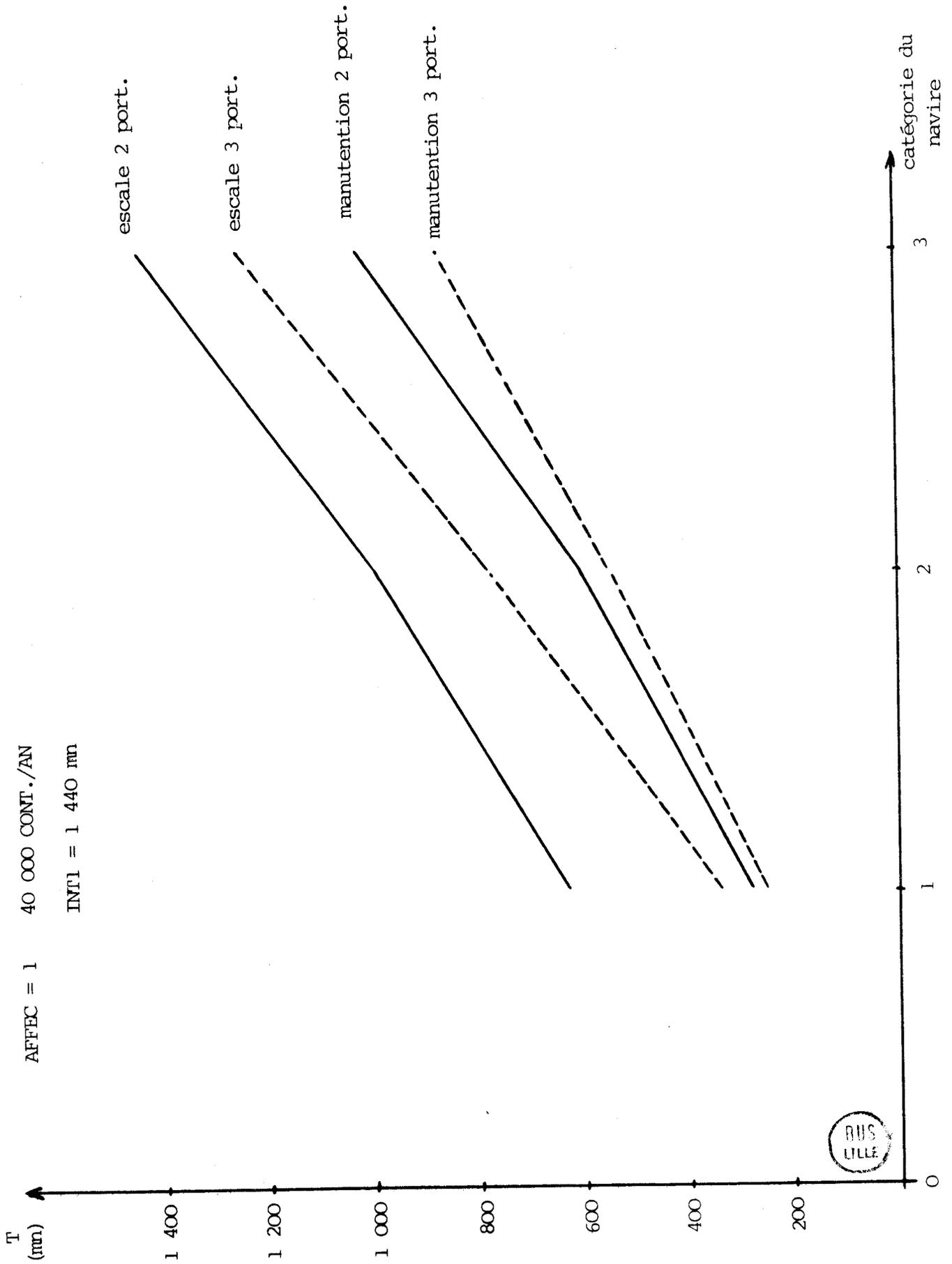


Figure IV - 4.1.2.

AFFEC = 0 40 000 CONT./AN  
INT1 = 1 440 mm

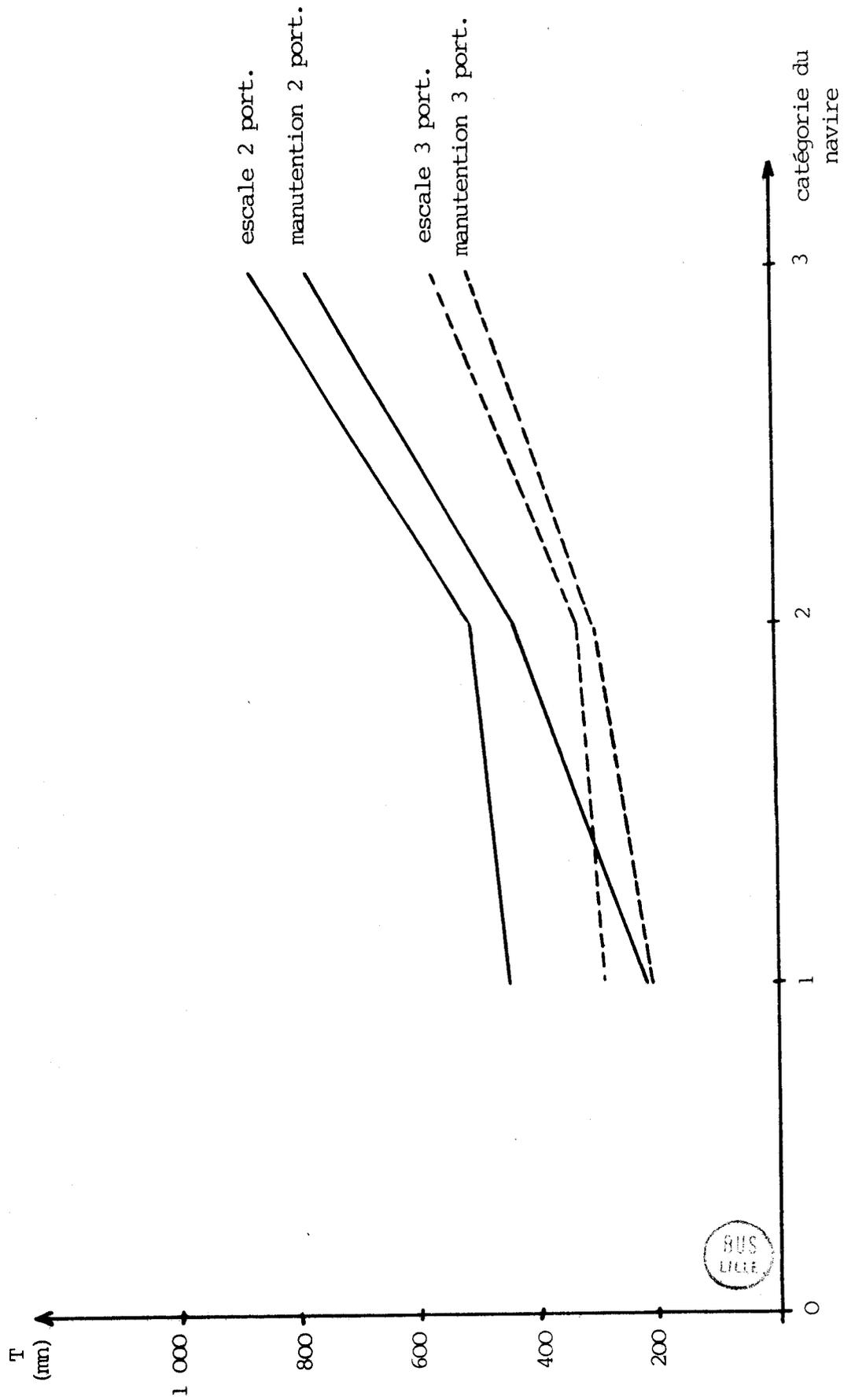


Figure IV - 4.1.3.

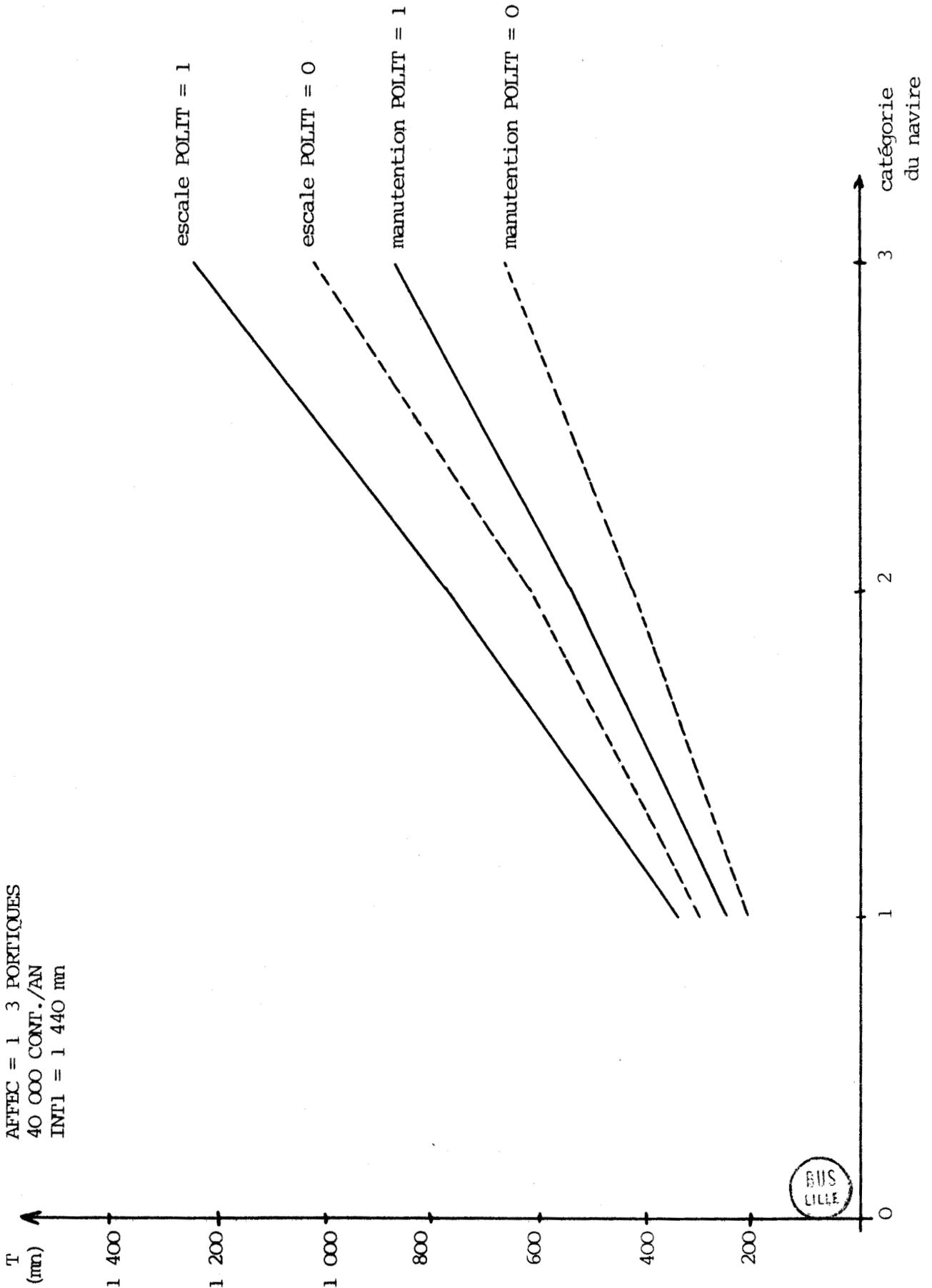


Figure IV - 4.2.1.

3 PORTIQUES CADENCE : 15 CONT./HEURE  
40 000 CONT./AN  
INT1 = 1 440 mm

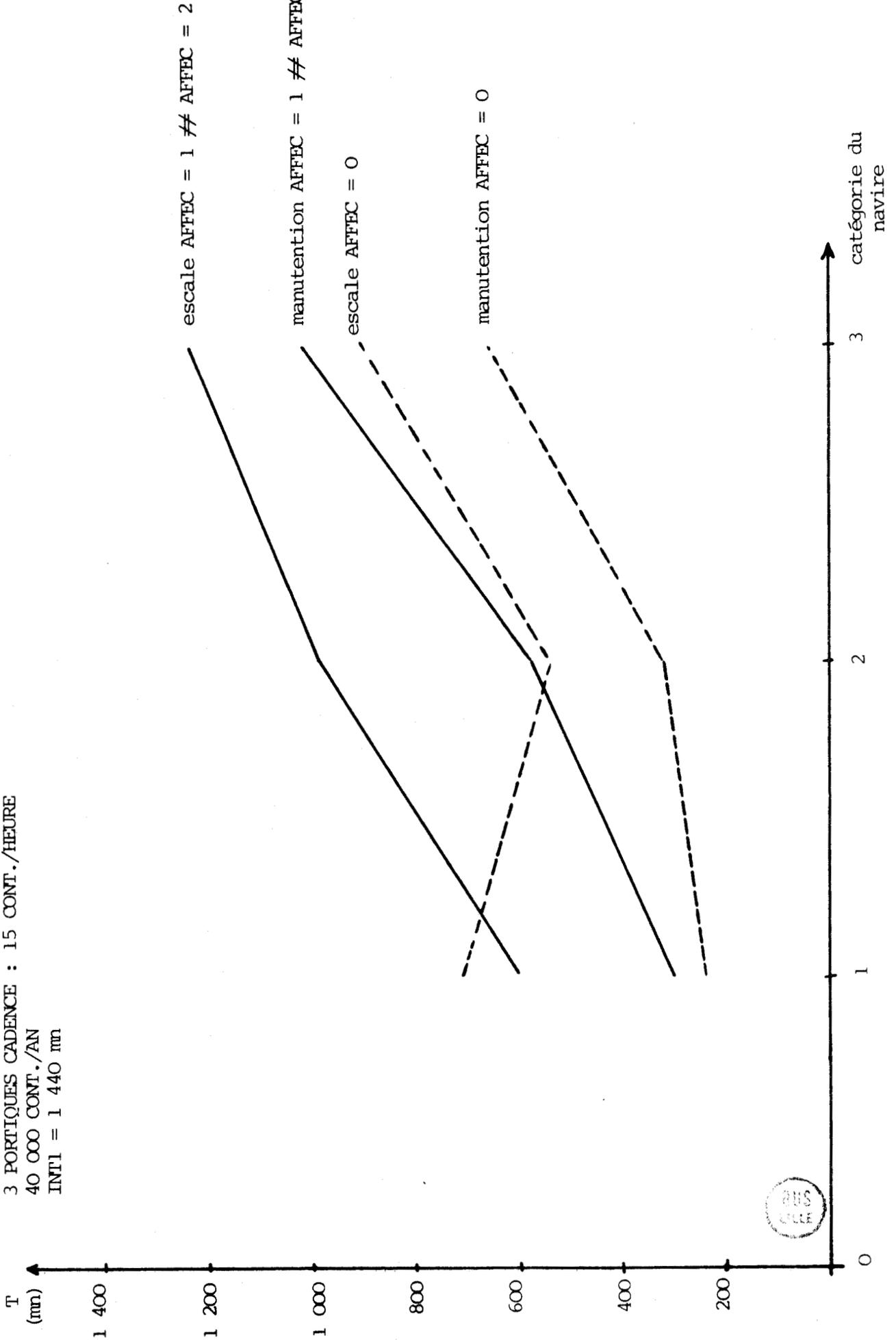


Figure IV - 4.3.1.

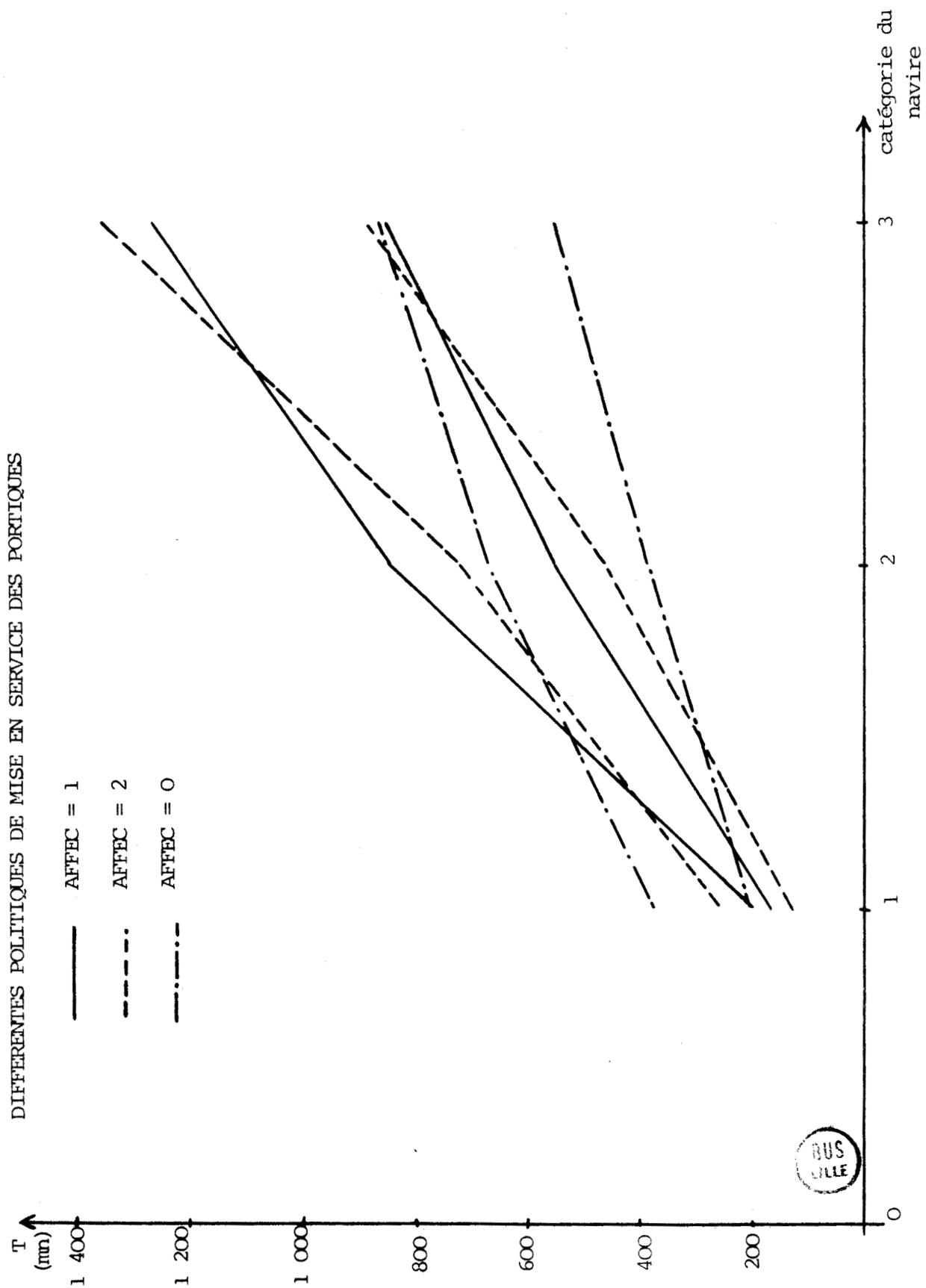


Figure IV - 4.3.2.

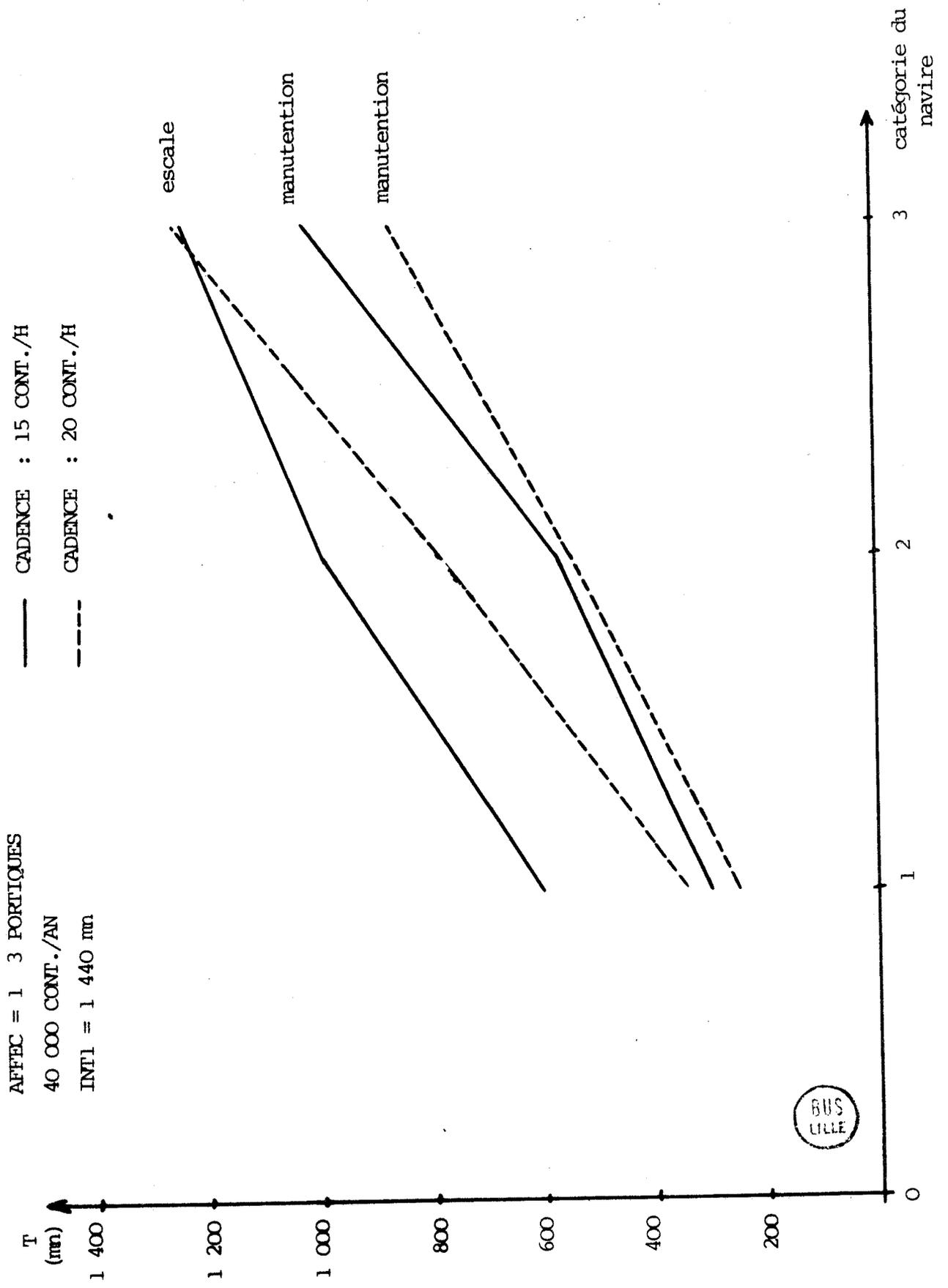


Figure IV - 4.4.1.

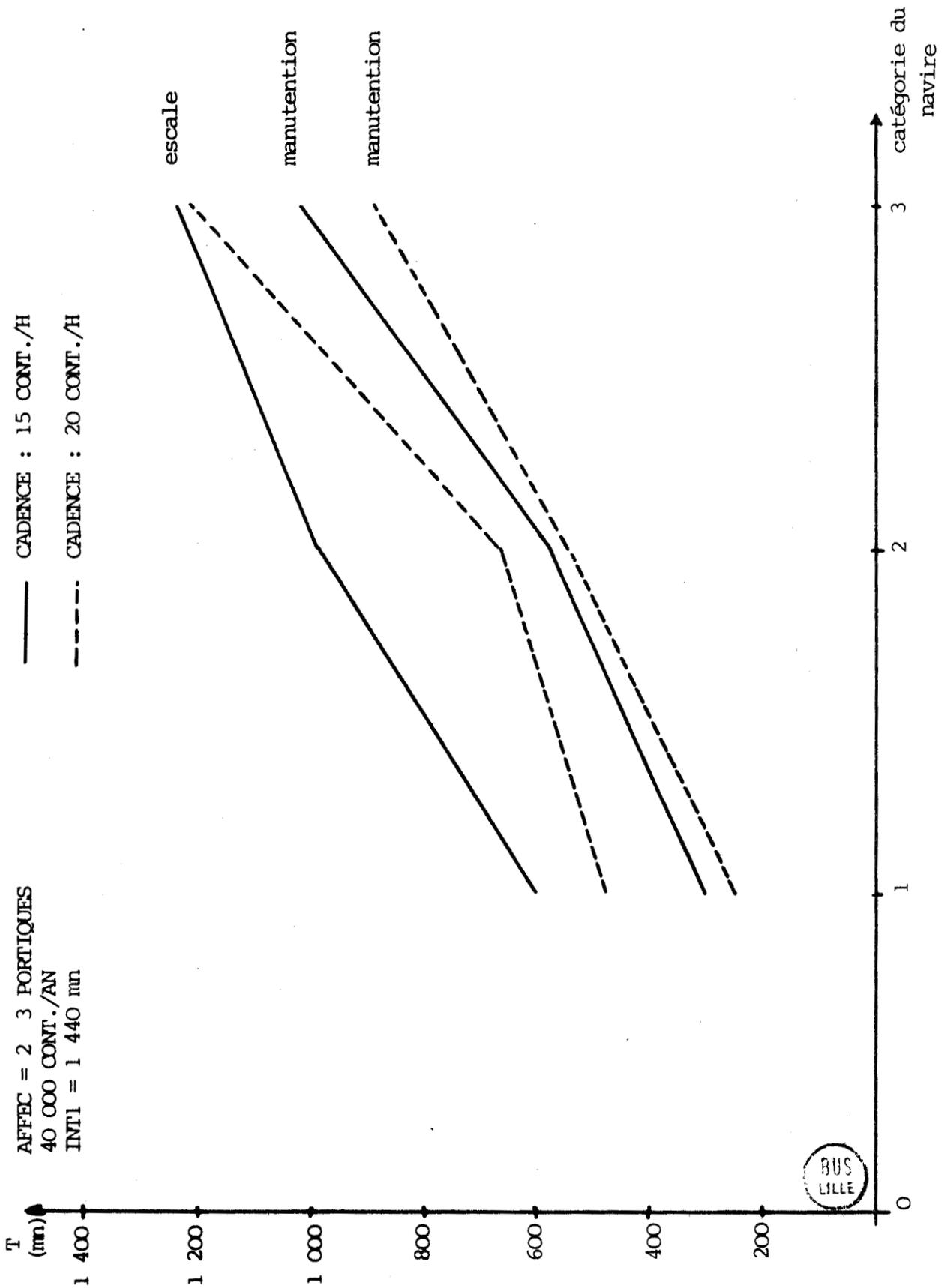


Figure IV - 4.4.2.



TRANSIT DES CONTENEURS DU NAVIRE VERS LE PARC

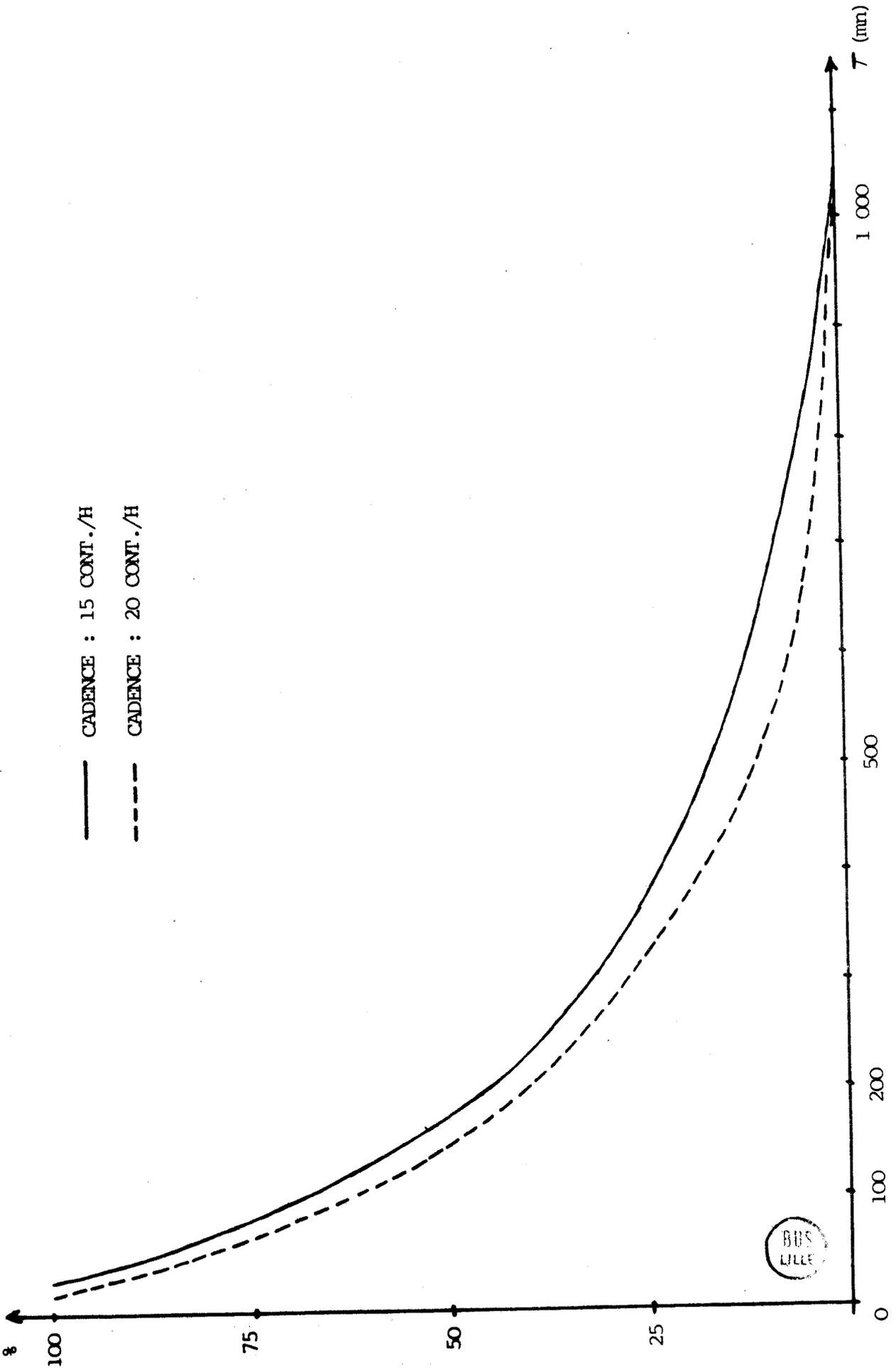


Figure IV - 4.4.4.



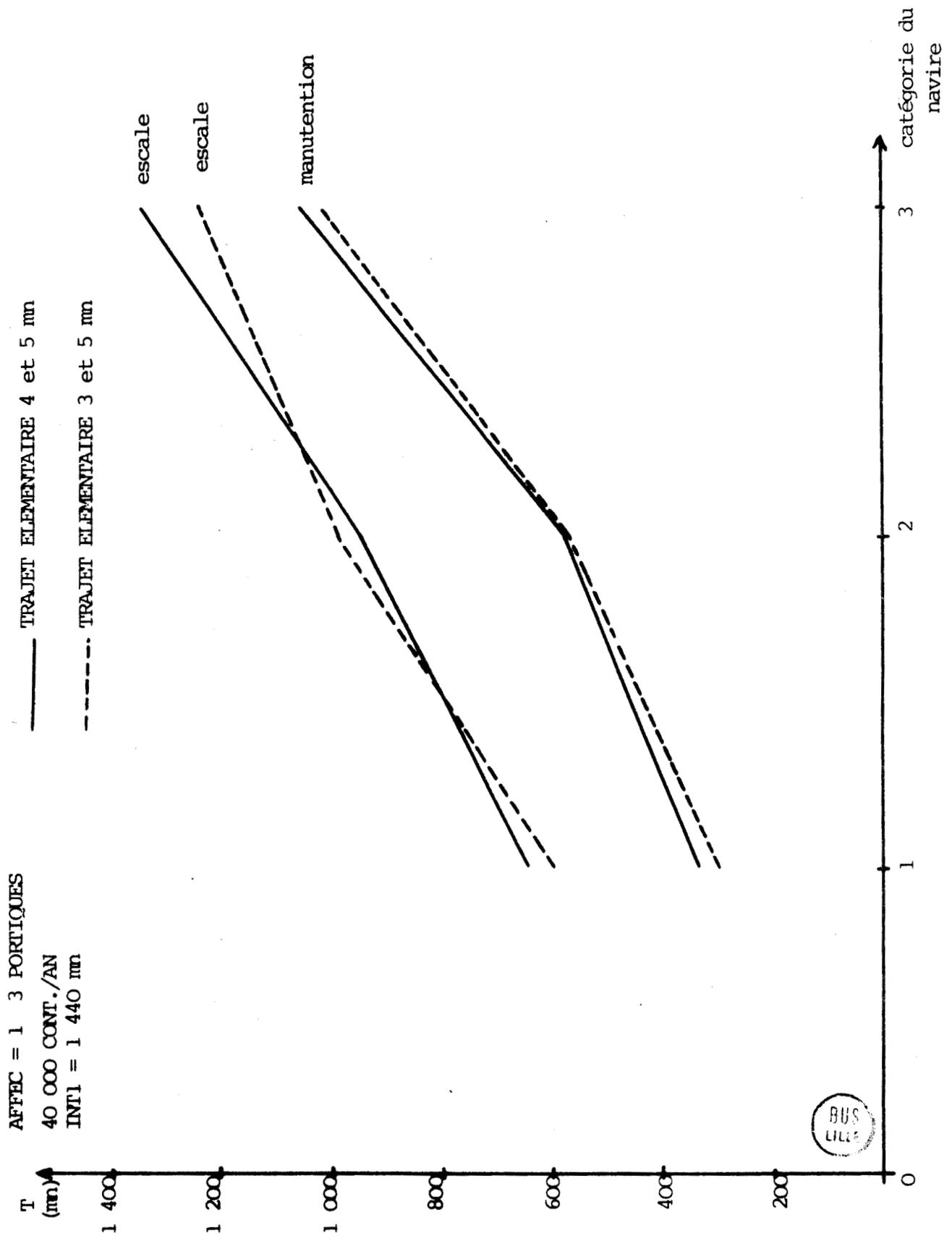


Figure IV - 4.5.1.

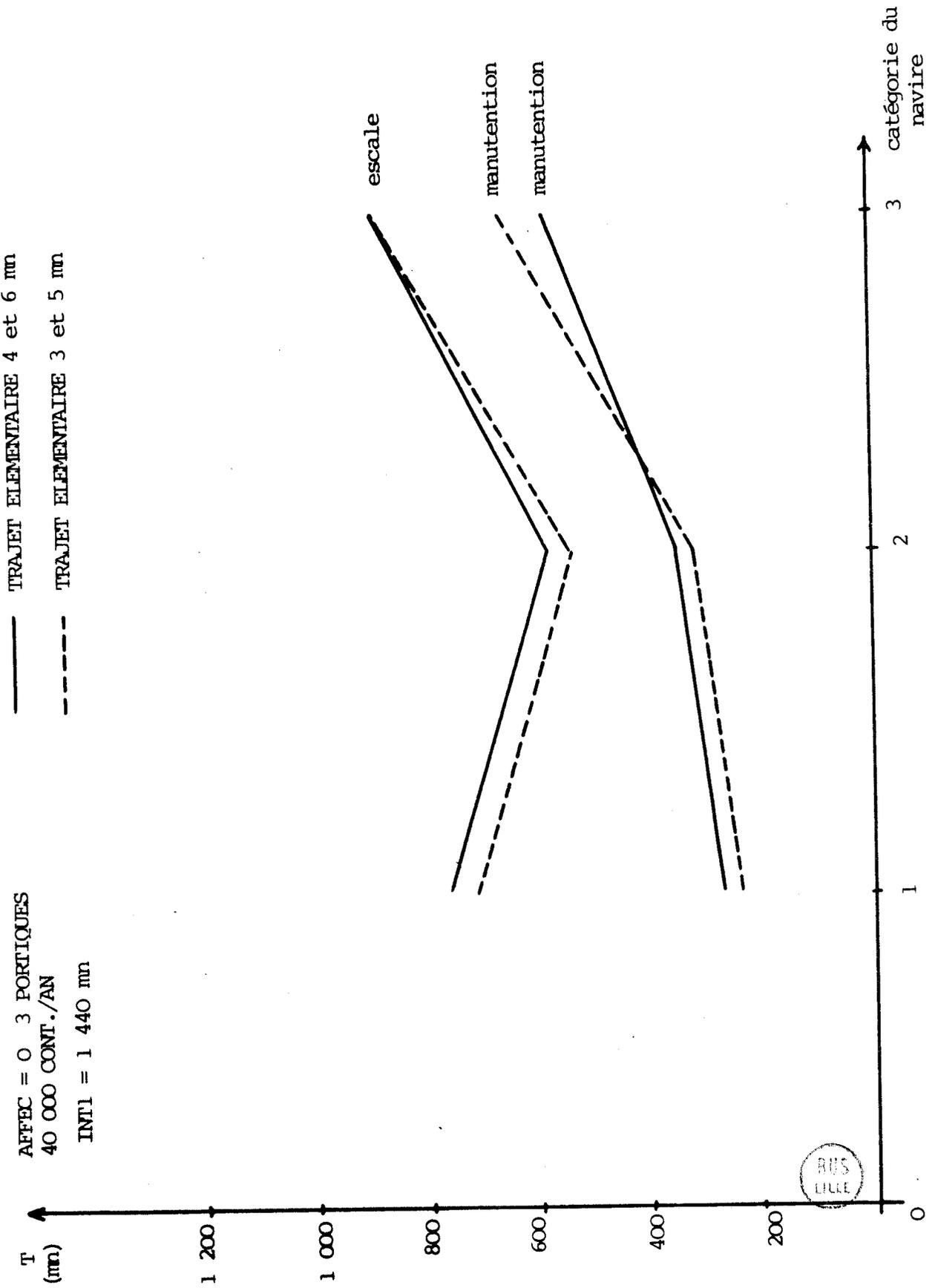


Figure IV - 4.5.2.

TRANSIT DES CONTENEURS DU NAVIRE VERS LE PARC

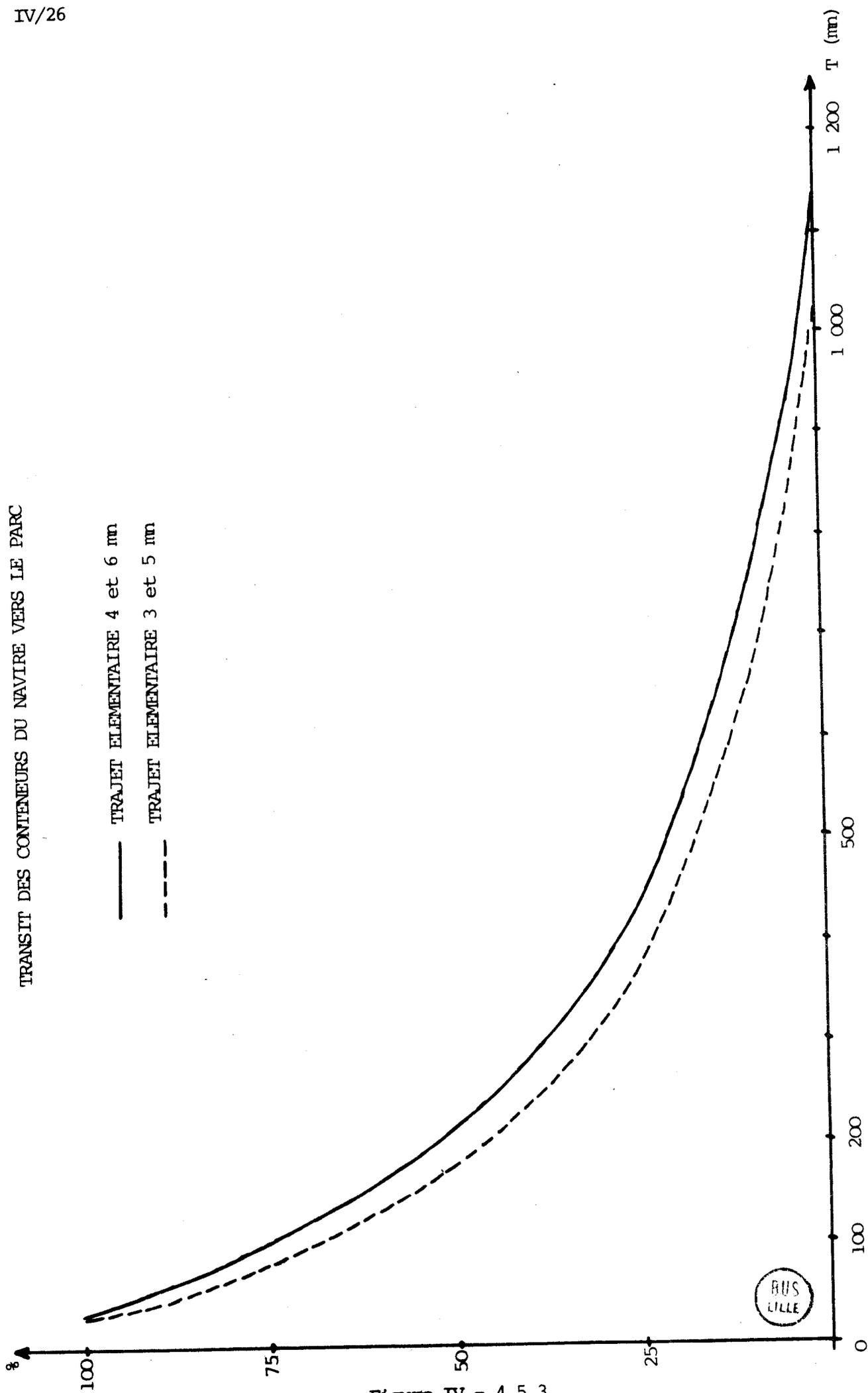


Figure IV - 4.5.3.

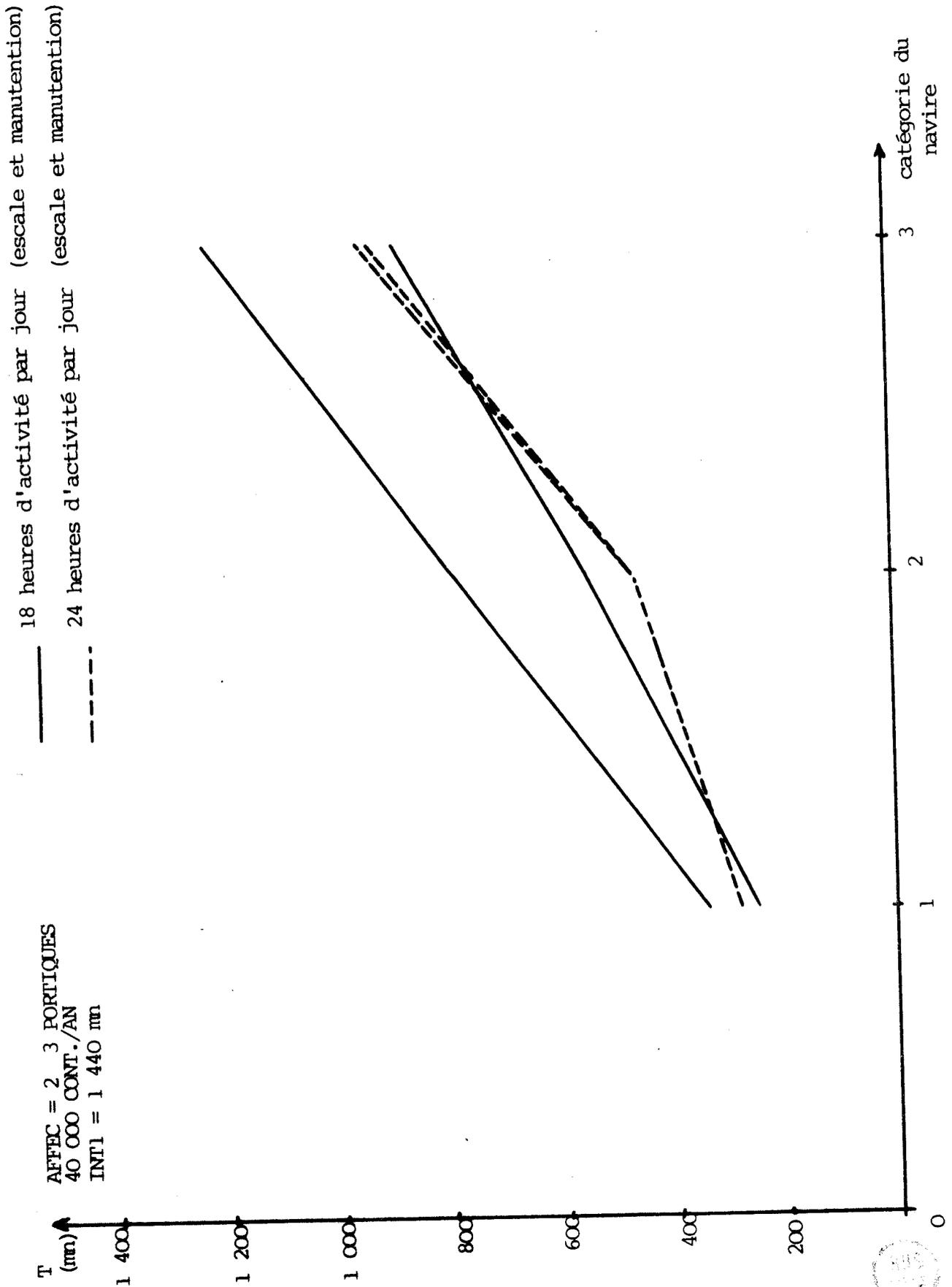
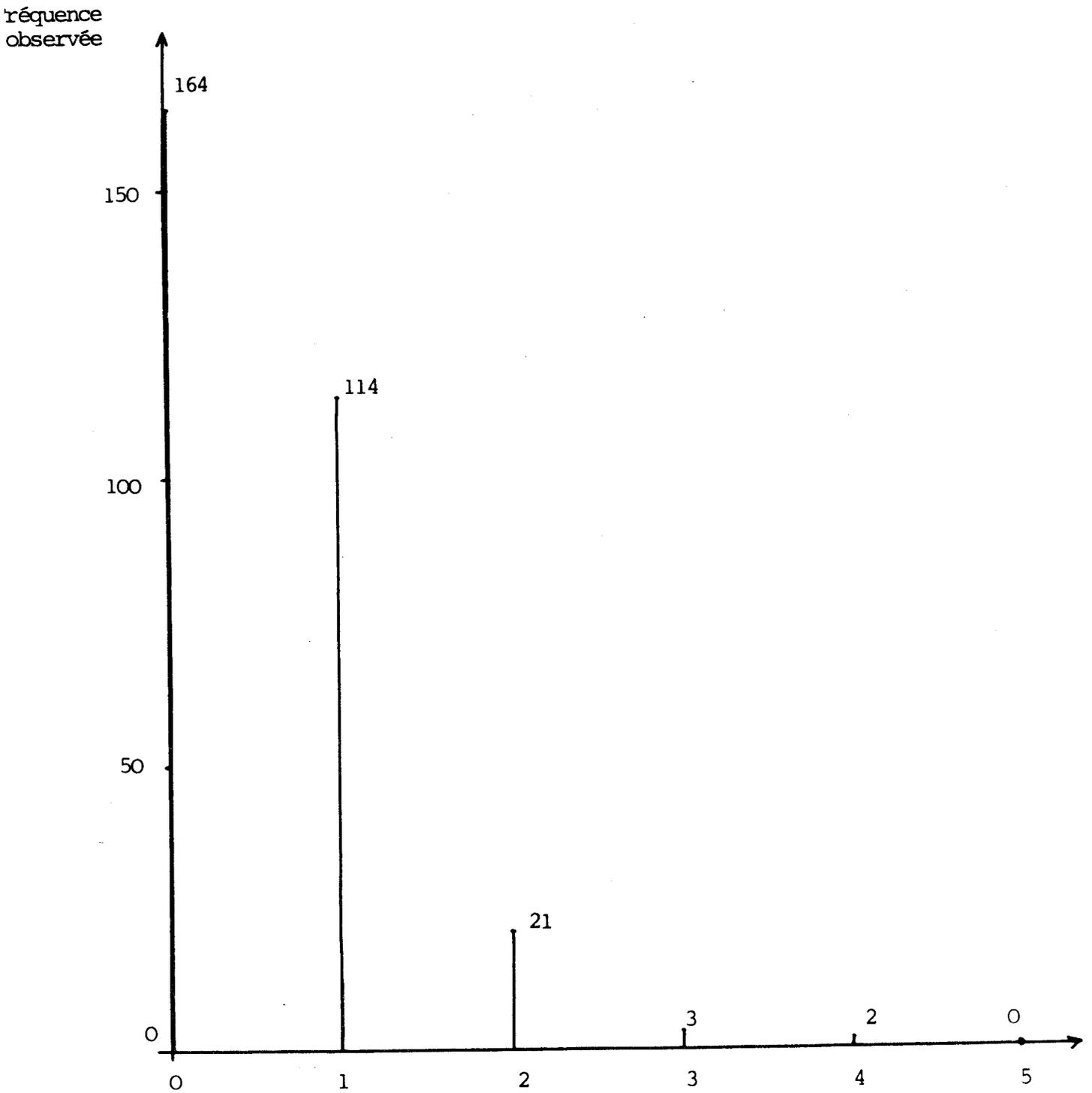


Figure IV - 4.5.4.



Histogramme des navires à quai  
(cas d'un trafic d'environ 40 000 conteneurs par an)  
3 portiques étant disponibles

Nbre de  
navires à  
quai

Figure IV - 4.5.5.



IV - 5. UTILISATION DU MODELE POUR LE PORT RAPIDE DE DUNKERQUE-OUEST

IV - 5.1. Caractéristiques du port rapide

Le Port Autonome de Dunkerque envisage d'utiliser le modèle qui a été construit afin de tester les possibilités du terminal à conteneurs du port rapide installé depuis quelques années avec d'autres équipements portuaires et ayant pour accès le nouvel avant-port ouest.

Ce complexe portuaire permet l'accueil de navires allant jusqu'à 450 000 tonnes et ayant un tirant d'eau de 22 mètres. Ces possibilités sont respectées aux heures de marée les plus basses.

Un plan de ce port rapide est joint à cette description (Figure IV - 5.1.1.).

Vu la situation géographique de Dunkerque, le port rapide a de nombreux débouchés aussi bien vers les pays étrangers (Angleterre, Allemagne, Luxembourg, Belgique ...) que vers les régions Nord, Picardie, Lorraine, Alsace et même pour partie la région parisienne.

Les communications routières et ferroviaires sont nombreuses et permettent un accès facile et rapide au terminal à conteneurs (voir cartes des routes et voies ferrées). (figures IV - 5.1.2. et IV - 5.1.3.).

En 1976, le trafic des marchandises diverses (conteneurisées ou conteneurisables) a été estimé à :

- 2,5 millions de tonnes à l'entrée
- 5,5 millions de tonnes à la sortie.

Le port rapide de Dunkerque-Ouest comporte 2 quais :

- le quai de Lorraine ayant lui-même :
  - . 260 mètres de quai de profondeur 7,4 mètres pour les petits navires.
  - . 500 mètres de quai de profondeur 13,7 mètres
- le quai de Flandre de 400 mètres de longueur de profondeur 13,7 m.

Remarquons toutefois que toute cette longueur de quai n'est pas réservée uniquement aux navires porte-conteneurs. En effet, à l'angle du quai de Flandre et du quai de Lorraine ont été aménagées des rampes pour navires RO/RO (roll-on - roll-off) ainsi qu'à l'extrémité sud du quai de Flandre.

Du point de vue matériel de manutention, le quai de Lorraine dispose d'un portique de quai Liebherr pour effectuer la manutention des petits navires accostant sur la partie est et d'un portique Caillard (adapté aux porte-conteneurs de 3ème génération) pour sa partie ouest.

Le quai de Flandre dispose également d'un portique Caillard.

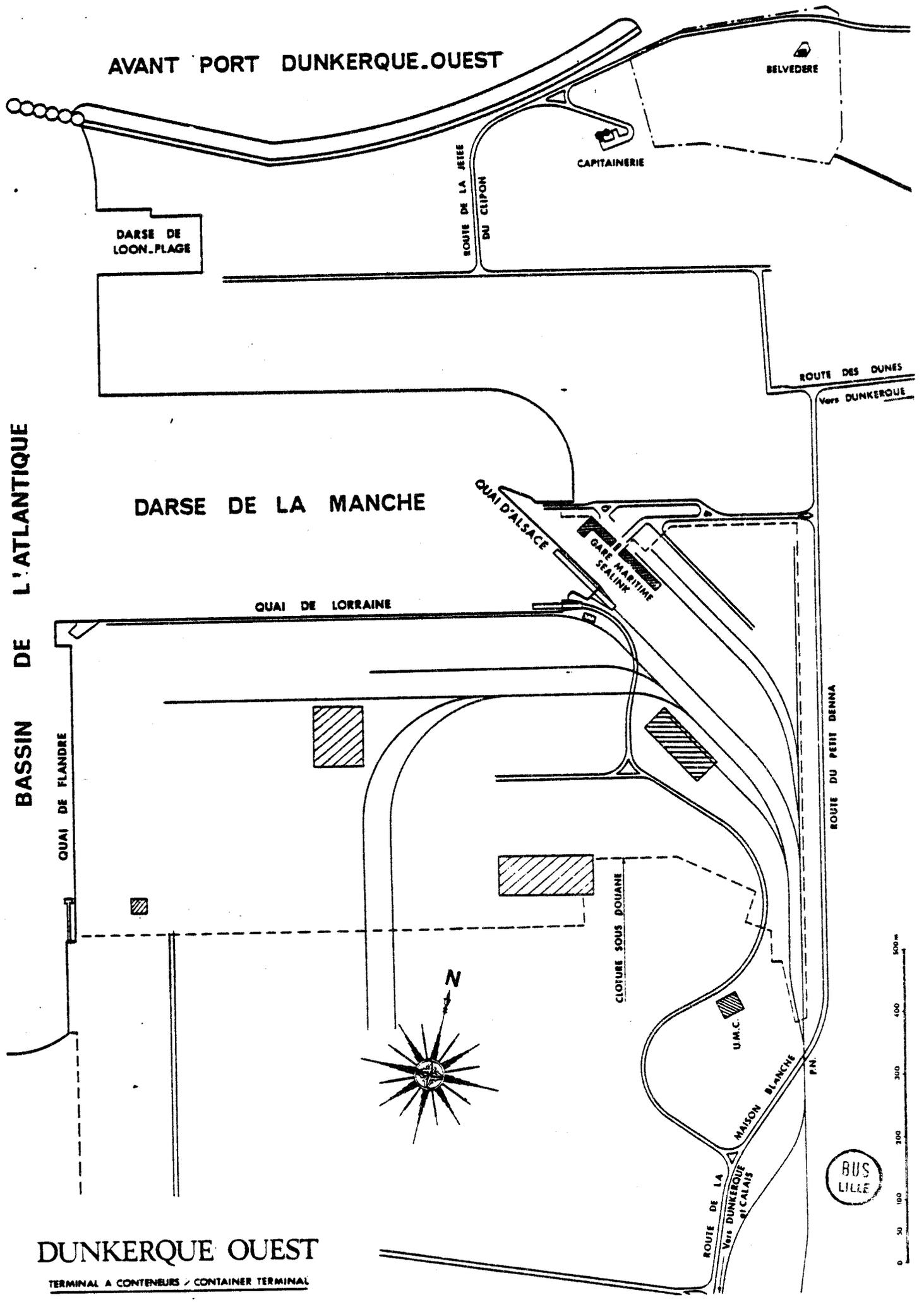
L'équipement du Port rapide est complété d'un portique Peiner pouvant desservir les deux quais puisqu'il tourne à angle droit. Enfin, si cela s'avère nécessaire, le port rapide peut également disposer de deux grues mobiles Gottwald utilisables pour la manutention des conteneurs.

L'équipement de parc est formé d'un ensemble de chariots élévateurs, de tracteurs et de remorques.

La surface de stockage disponible pour le terminal à conteneurs est de 40 hectares dont 20 revêtus et éclairés.

Signalons enfin la possibilité de travail de 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7.

# AVANT PORT DUNKERQUE. OUEST



# DUNKERQUE OUEST

TERMINAL A CONTENEURS / CONTAINER TERMINAL

Figure IV. 5.1.1.

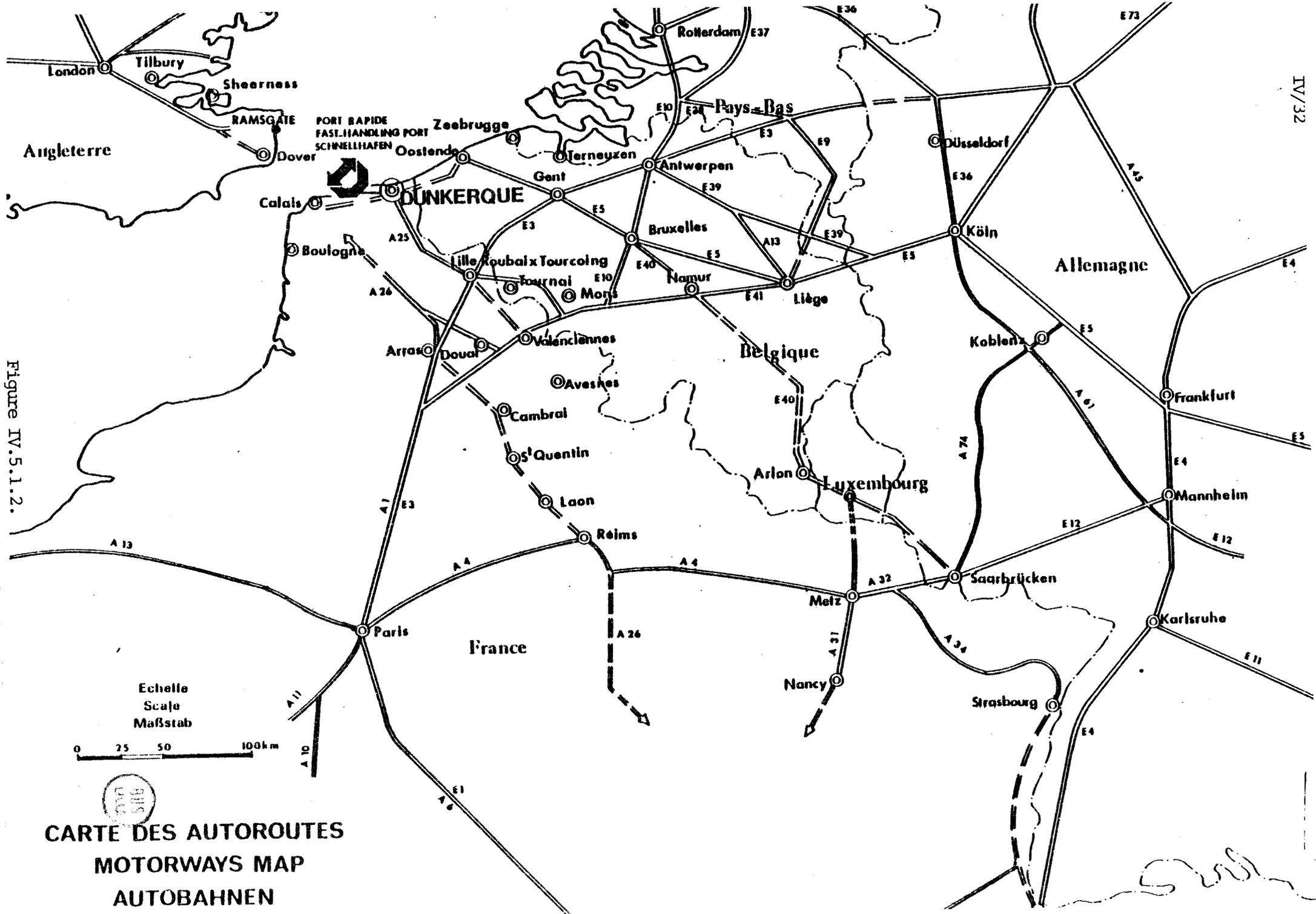


Figure IV.5.1.2.

905  
 CARTE DES AUTOROUTES  
 MOTORWAYS MAP  
 AUTOBAHNEN

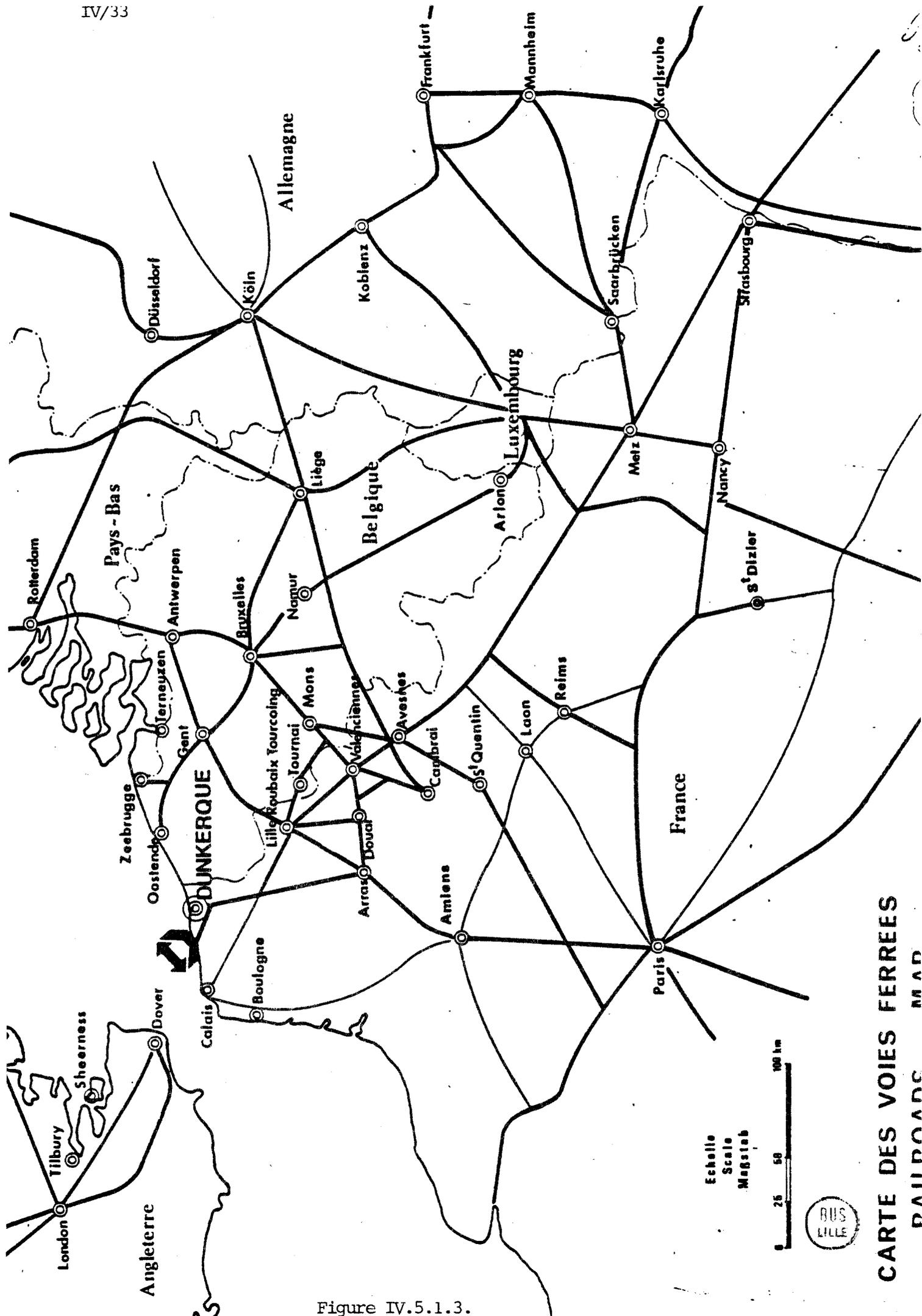


Figure IV.5.1.3.

CARTE DES VOIES FERRES  
RAILROADS MAP

*IV - 5.2. - Représentation du port rapide par le modèle*  
-----

Dans le but de représenter la vie d'un terminal à conteneurs tel que celui du port Ouest de Dunkerque, nous avons, dans un premier temps, mis 4 portiques de quai à la disposition des navires.

Voulant simuler un trafic d'environ 160 000 conteneurs par an, il n'a plus été possible de ne représenter que 3 conteneurs par une seule transaction du modèle. Nous avons choisi la représentation de 20 conteneurs du même type par une seule transaction.

Sur les figures IV - 5.2.1. et IV - 5.2.2., nous considérons un terminal ayant 3 shifts de 6 heures d'activité par jour.

Dans le premier cas (figure IV - 5.2.1.), l'arrivée d'un navire a lieu en moyenne tous les deux jours et les portiques de quai ont une cadence commerciale de 20 conteneurs par heure. Au vu des courbes, il est évident que l'on ne peut être satisfait des performances que nous donne le modèle.

Tout d'abord, il y a quasiment la moitié du temps total d'escale qui est perdue en attente de place à quai et en attente de portique et, d'autre part, un trafic de 160 000 conteneurs par an correspond environ à une moyenne de 900 mouvements par navire d'où un temps de manutention important.

Dans le deuxième cas (figure IV - 5.2.2.), l'intervalle entre 2 arrivées consécutives de navire est de 1 journée, ce qui en moyenne divise le nombre de mouvements par navire par 2, soit 450 mouvements. Les résultats, bien que meilleurs, ne sont toujours pas acceptables vu les temps d'attente des navires.

Remarquons que nous n'avons pas effectué l'essai avec la politique de mise en service des portiques  $AFFEC = 0$ . Ceci se justifie par le fait que, vue la disposition des quais du port Ouest de Dunkerque, cette politique n'est pas utilisable (Un seul portique pouvant se déplacer d'un quai à un autre).

Sans modifier la loi d'arrivée des navires et les performances des engins de manutention, la figure IV - 5.2.3. fait apparaître l'amélioration des performances quand le terminal est en activité 24 heures sur 24. Dans les essais qui suivront, on considère toujours cette activité de 24 heures par jour étant donné qu'elle est possible au port rapide.

Afin d'améliorer les performances du terminal nous considérons maintenant que les portiques de quai sont capables d'atteindre une cadence commerciale de 30 conteneurs par heure. La figure IV - 5.2.4. nous met en évidence la nette amélioration des performances et on constate également qu'il n'y a pratiquement plus d'attente du navire. Ceci signifie que pour une moyenne de 450 mouvements par navire, les performances des portiques de quai sont suffisantes pour qu'il n'y ait :

- pas d'attente de portique
- pas d'attente de place à quai.

Si on peut adopter la politique d'effectuer les mouvements de type import et de type export, cale par cale (pas de contraintes horaires pour l'import), on arrive à diminuer légèrement le temps d'escale moyen des navires (figure IV - 5.2.5.).

Sur cette figure IV.5.2.5., dans le meilleur des cas (POLIT = 0), le temps d'escale des plus gros navires atteint néanmoins 2 000 minutes soit environ 33 heures.

Un des buts du Port Autonome de Dunkerque est de ne pas immobiliser un navire plus de 24 heures. Pour cela, nous allons tenir compte du fait qu'il est possible d'utiliser 2 grues supplémentaires. Comme les deux politiques de mise en service des portiques possibles telles que nous les avons définies sont AFFEC = 1 et AFFEC = 2, nous avons modifié le modèle de telle sorte que l'affectation, soit d'au maximum 3 portiques et grues sur un même navire.

Afin de compenser la cadence des grues par celle des portiques, nous adoptons une cadence commerciale moyenne de 24 conteneurs par heure.

La différence d'efficacité selon la politique de mise en service des portiques et grues adoptée apparaît sur la figure IV - 5.2.6.

Si on est obligé d'effectuer tous les mouvements import avant les mouvements export, l'aide apportée par les grues nous permet de diminuer d'environ 6 heures 30 minutes le temps d'escale des plus gros navires (figure IV - 5.2.7.).

La figure IV - 5.2.8 nous montre enfin les performances globales du terminal dans les meilleures conditions de travail :

- 6 engins de manutention disponibles
- mouvements import et export simultanément.

Le temps d'escale des plus gros navires varie de 28 à 29 heures. D'après les résultats statistiques du modèle, il y aurait possibilité d'améliorer encore légèrement ces performances si le terminal disposait d'un plus grand nombre d'engins de parc.

En effet, dans les derniers essais que nous avons effectués, on voit apparaître des attentes d'engins de parc pour la transition du quai vers le parc et vice-versa.

TRAFIC DE 160 000 CONTENEURS PAR AN  
 4 PORTIQUES CADENCE : 20 CONT./H

INT1 = 2 880 (2 jours)

- AFPEC = 2
- AFPEC = 1
- AFPEC = 0

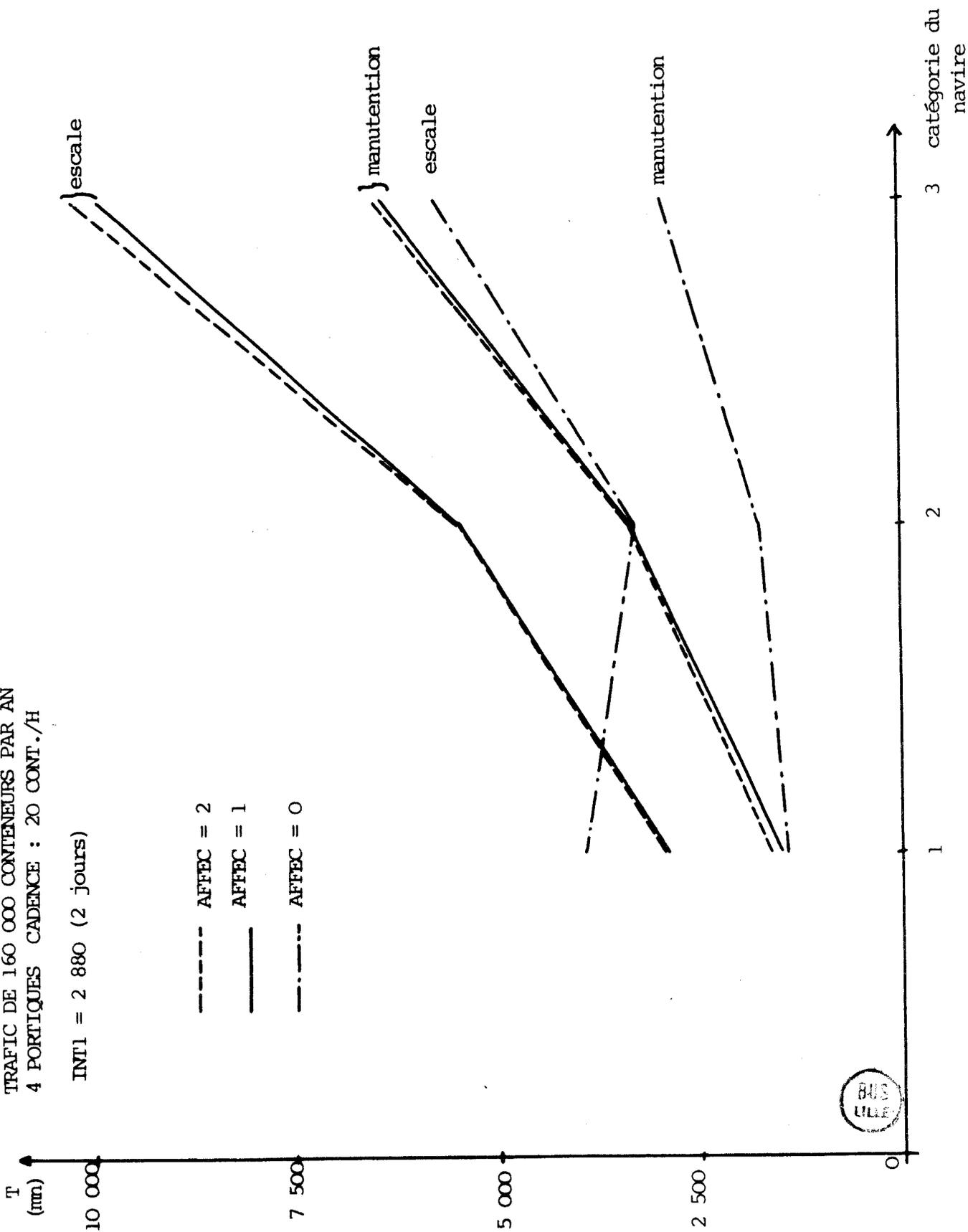


Figure IV - 5.2.1.

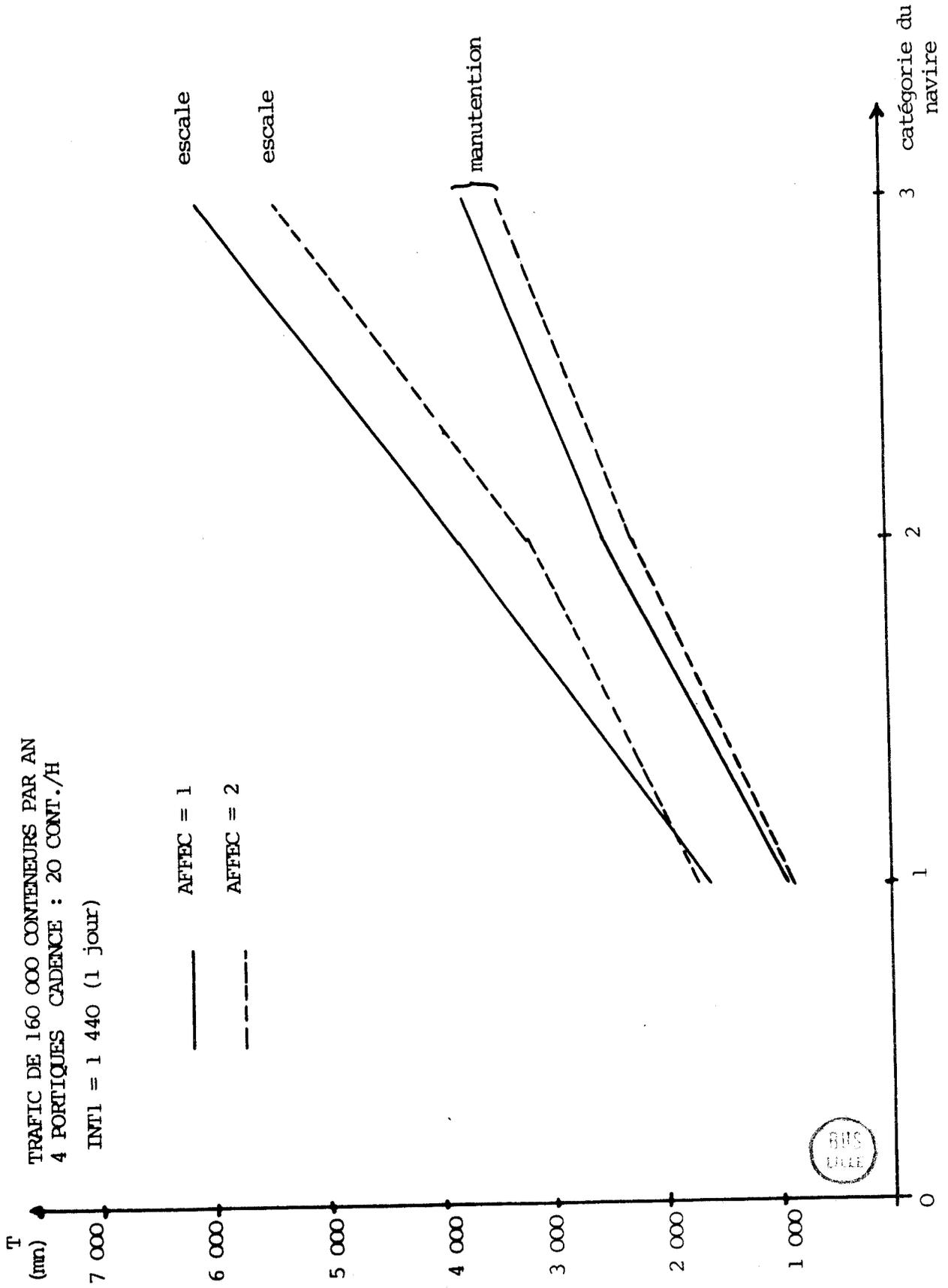


Figure IV - 5.2.2.

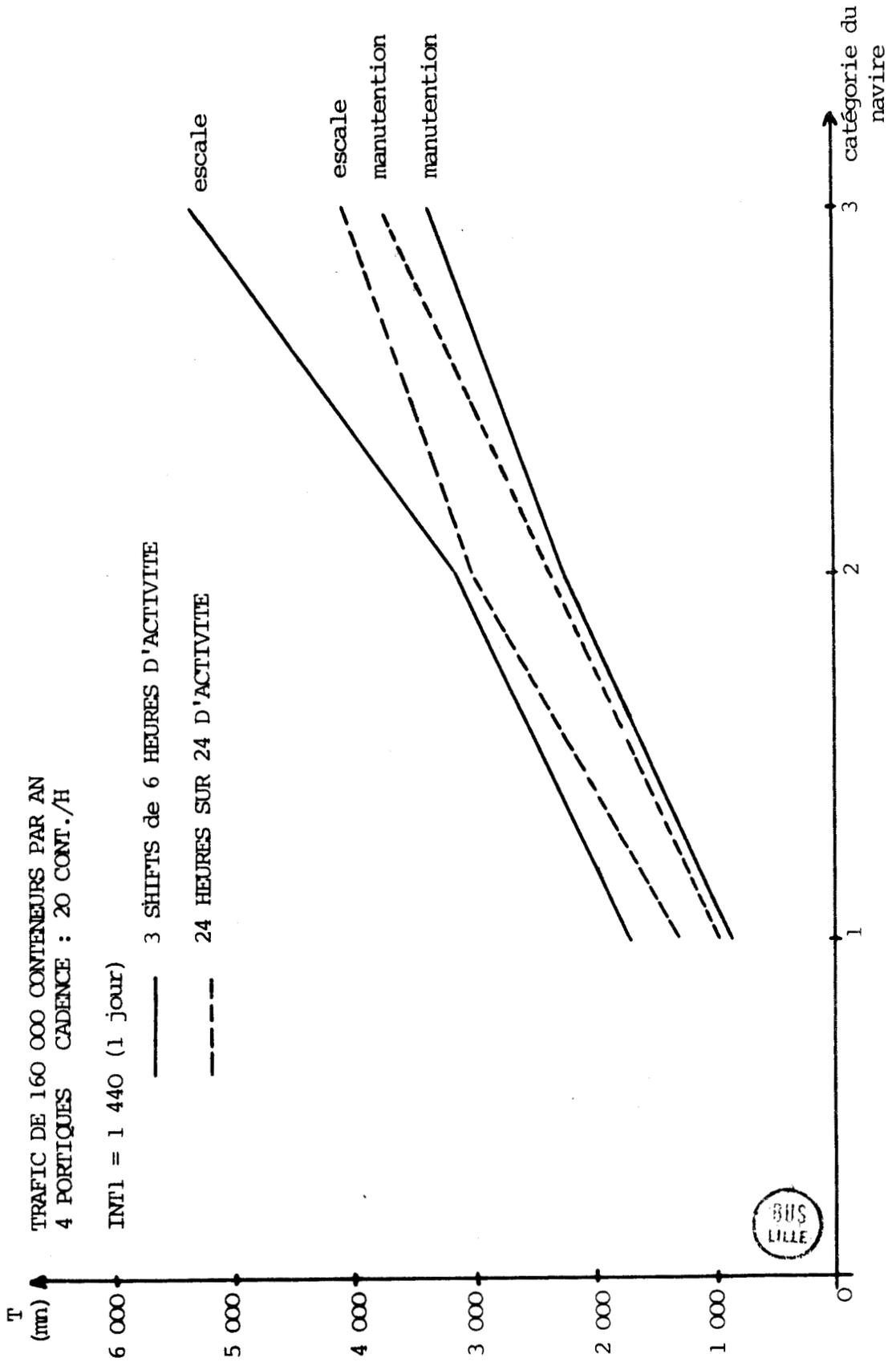


Figure IV - 5.2.3.

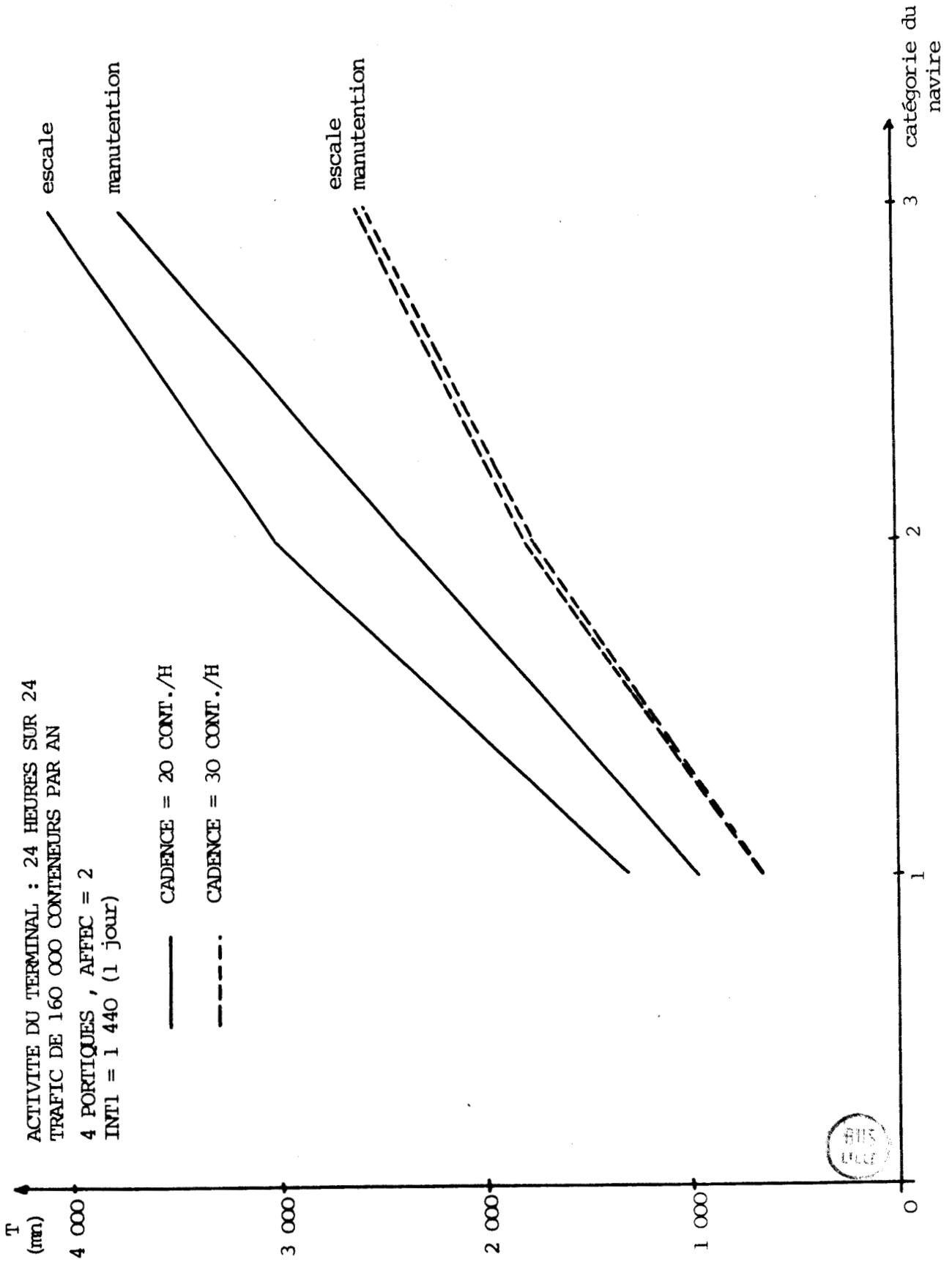


Figure IV - 5.2.4.

ACTIVITE DU TERMINAL : 24 HEURES SUR 24  
TRAFIC DE 160 000 CONTENEURS PAR AN  
4 PORTIQUES = CADENCE : 30 CONT./H, AFPEC = 2  
INT1 = 1 440 (1 jour)

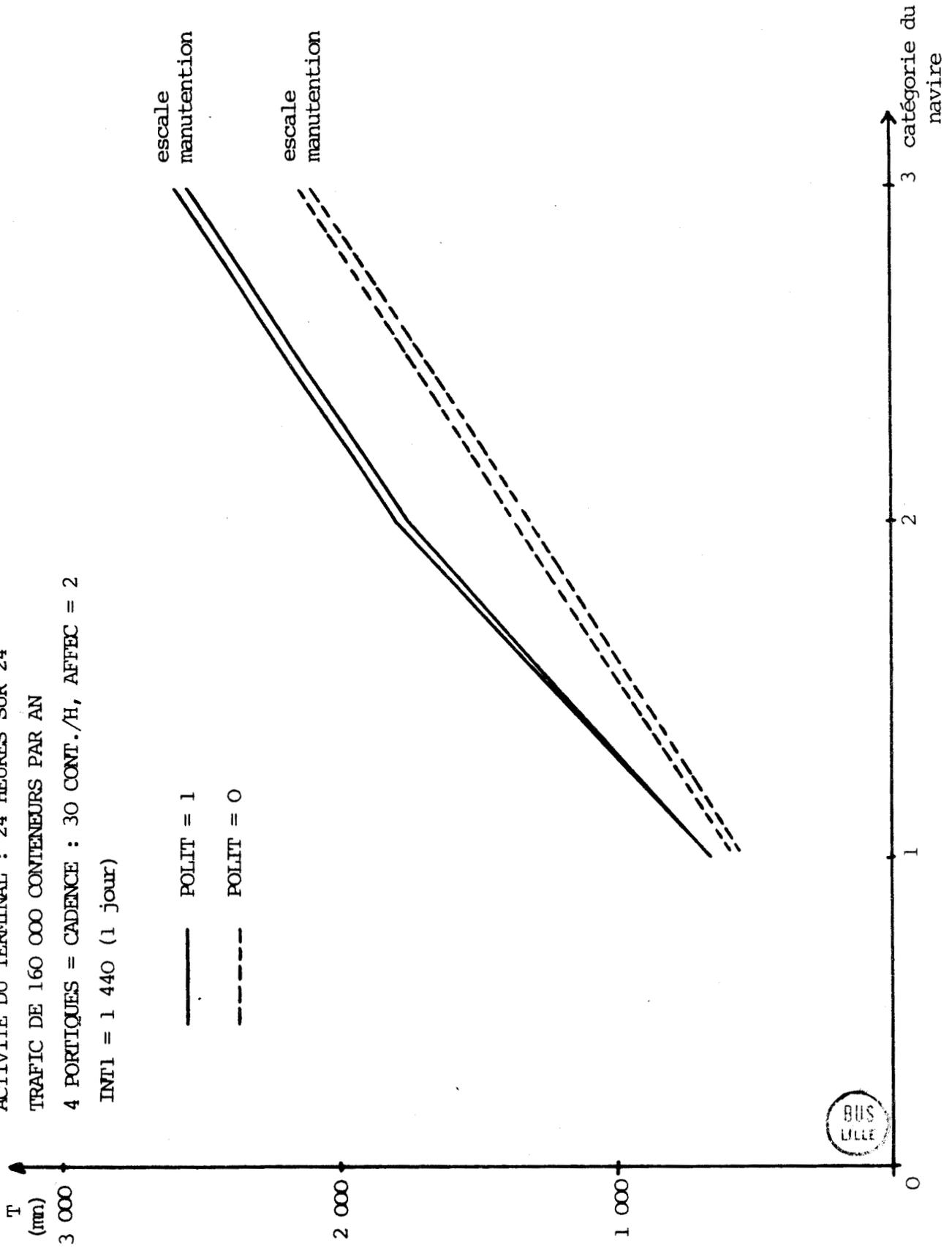


Figure IV - 5.2.5.

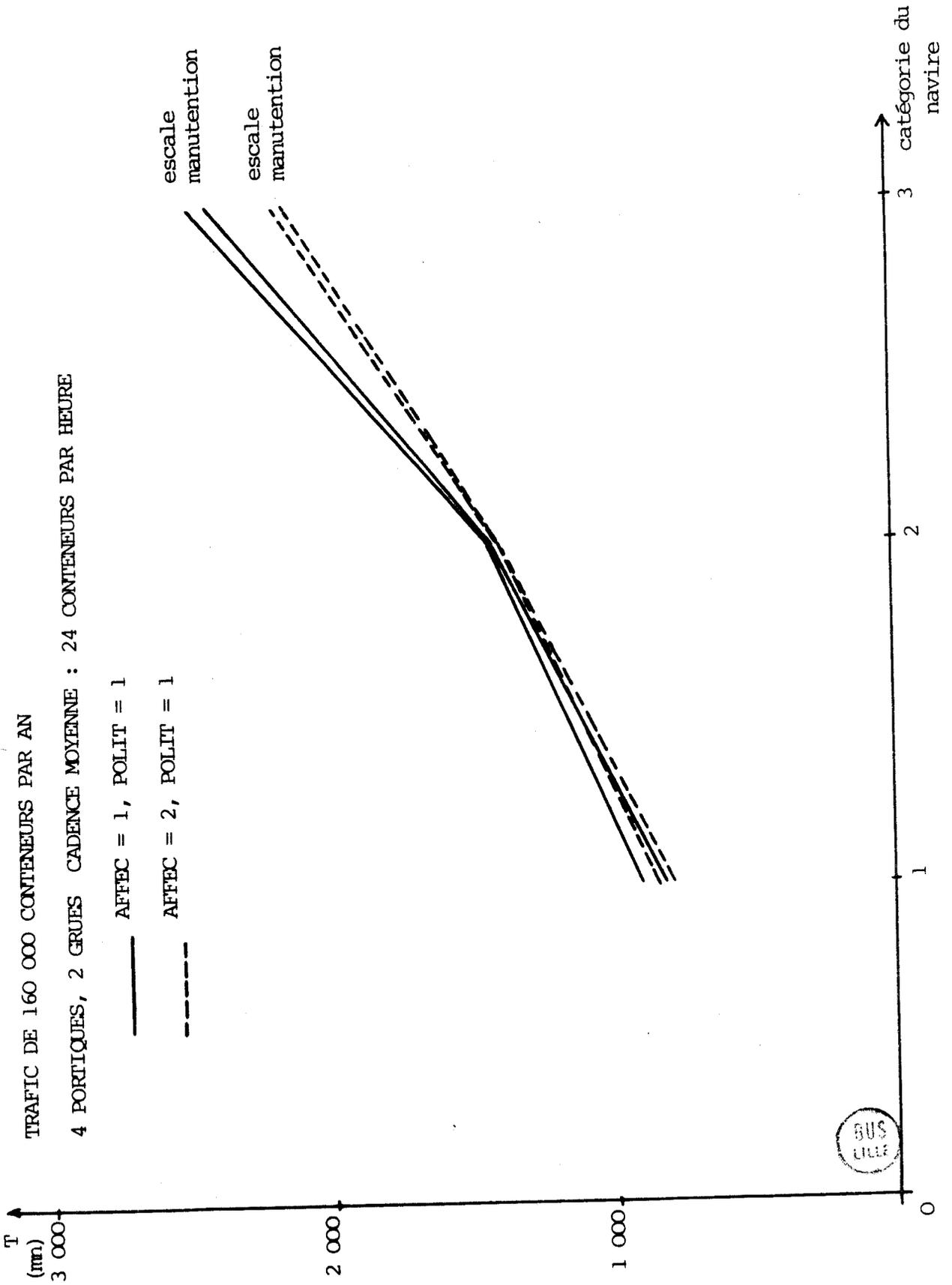


Figure IV - 5.2.6.

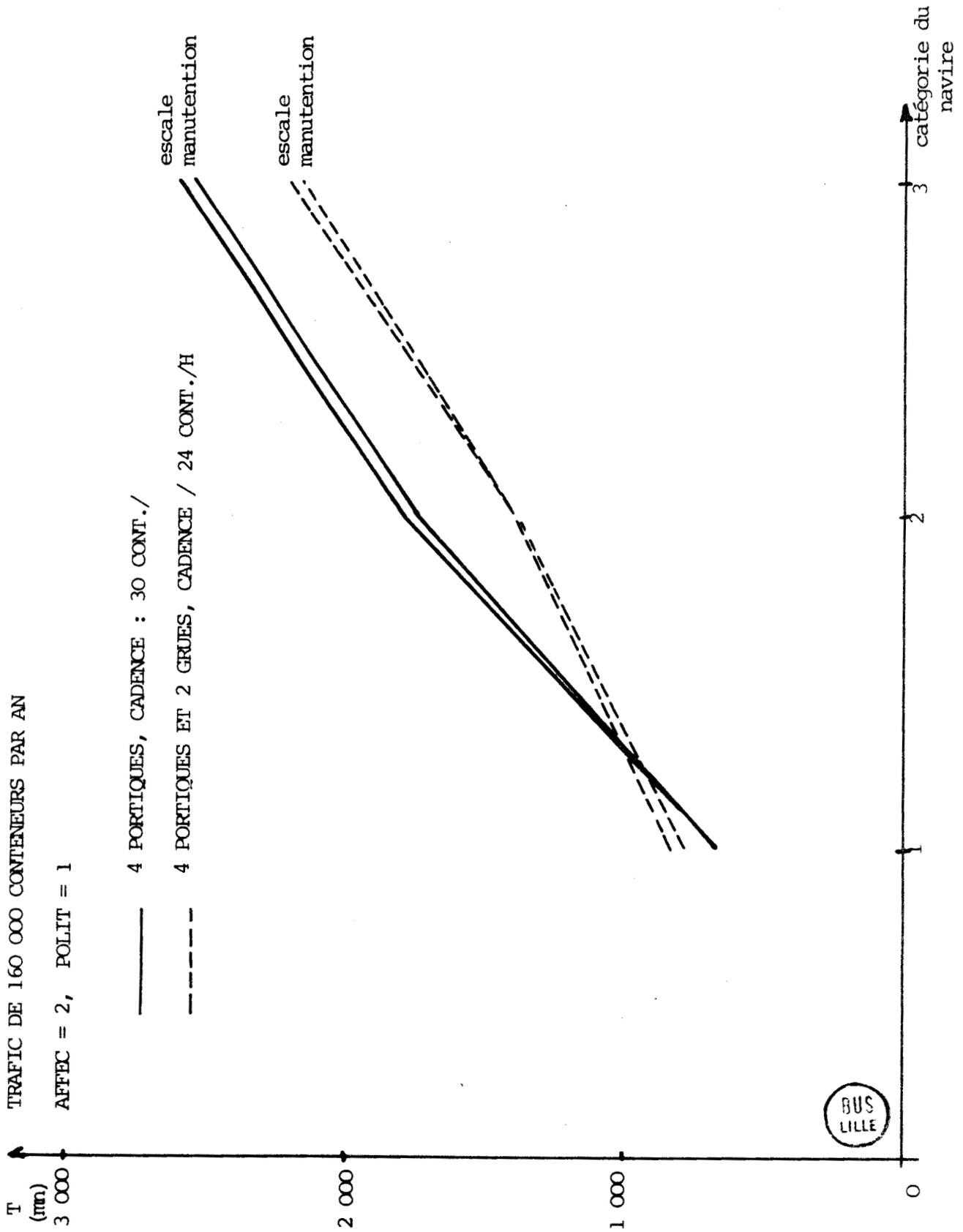


Figure IV - 5.2.7.

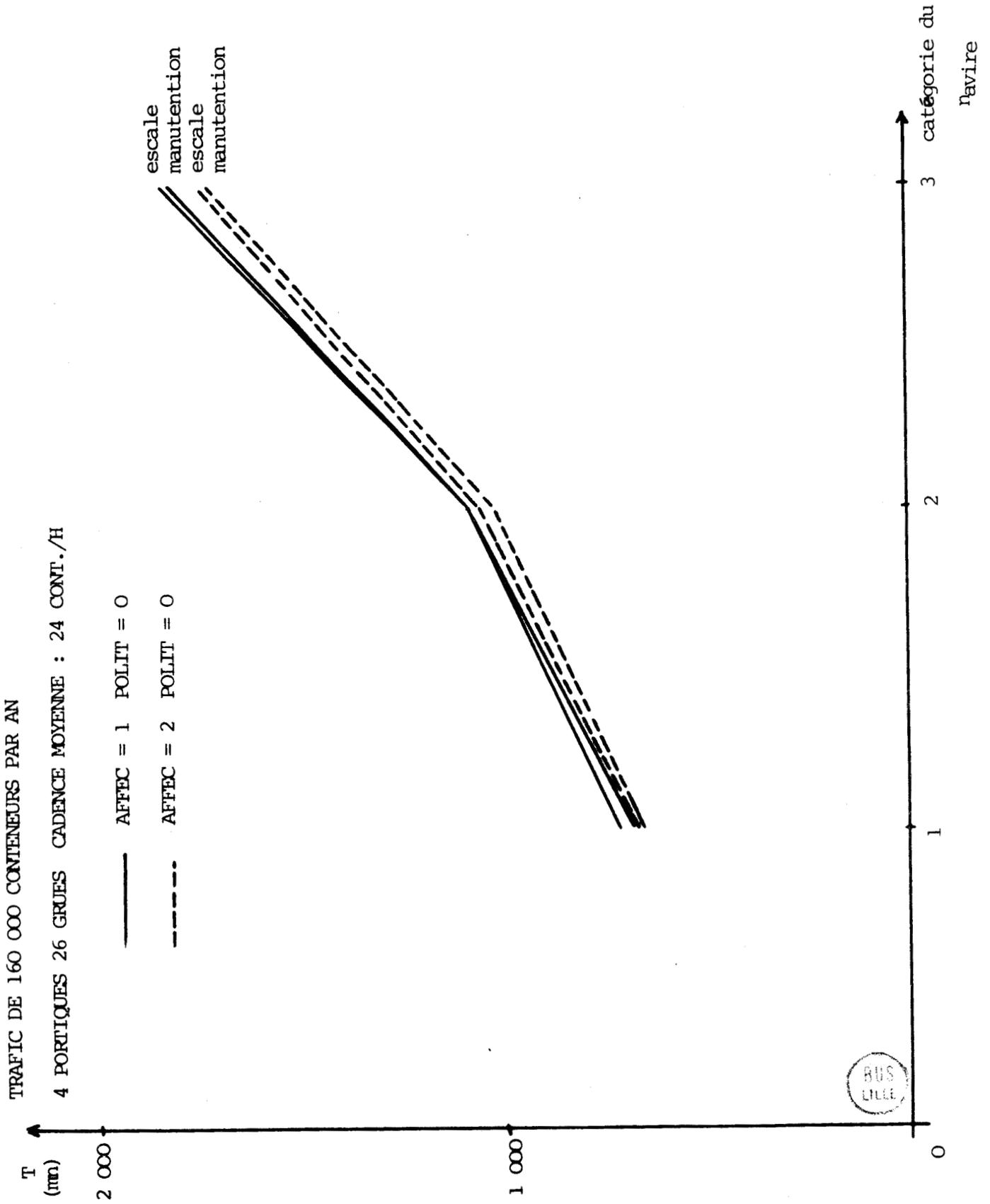
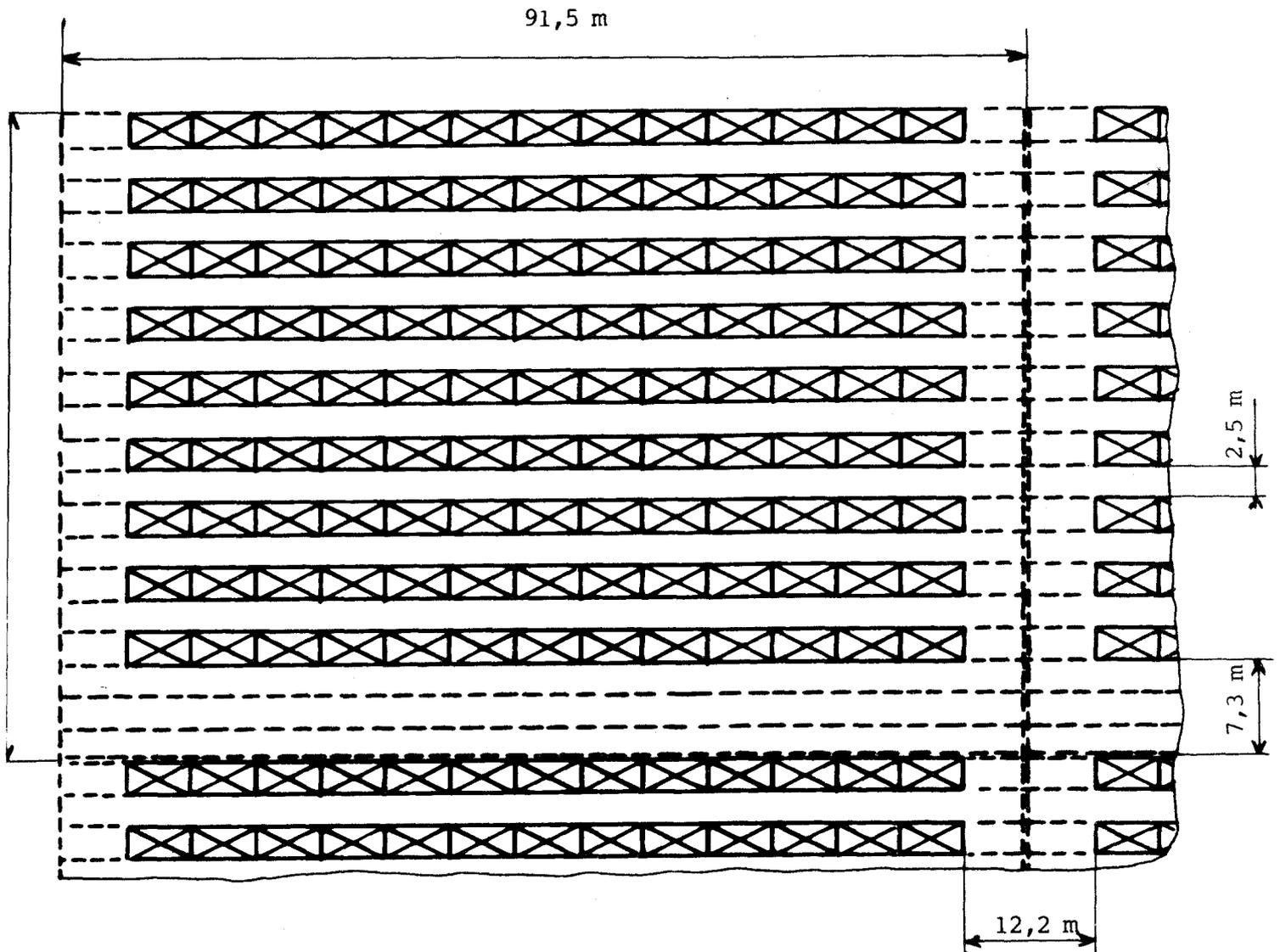


Figure IV - 5.2.8.

Surface de stockage nécessaire

Reprenons d'abord la configuration de chaque bloc de conteneurs tels que nous les avons définis pour le parc de stockage.

Cette disposition est adaptée aux engins de manutention existants au Port Autonome de Dunkerque.



On obtient ainsi des allées de circulation principales :

- "verticales" de largeur 12,2 mètres
- "horizontales" de largeur 7,3 mètres



Des allées secondaires seront "horizontales" et de la largeur d'un conteneur soit environ 2,5 mètres.

Sur un bloc de ce type, on peut stocker sans gerbage 13 x 9 conteneurs de 20 pieds, soit 117 conteneurs.

Chaque bloc occupe une superficie d'environ 4 460 m<sup>2</sup>.

Dans le cas le plus défavorable parmi ceux que nous avons envisagés pour le port rapide de Dunkerque-Ouest, nous avons observé au cours de la période simulée, un maximum de 5 200 conteneurs sur le parc. Il faut pour cela une surface de stockage d'environ 200 000 m<sup>2</sup>, soit 20 hectares.

Il n'y aura donc pas de problème de superficie de stockage au port rapide de Dunkerque-Ouest, pour un trafic atteignant 160 000 conteneurs par an.

#### Utilisation des engins de manutention

Selon les données que nous avons adoptées pour les portiques et les grues de quai, on obtient une cadence commerciale moyenne de 24 conteneurs par heure. Si on tient compte des pannes de ces engins de manutention, le modèle nous donne une cadence effective légèrement supérieure à 18 conteneurs par heure.

A la cadence théorique de 24 conteneurs par heure, on devra assurer 6 451 heures de manutention par an. Dans l'essai effectué avec les deux grues supplémentaires, la manutention dans notre modèle a été assurée comme suit :

- 1 365 heures par portique et par an
- 495 heures par grue et par an.

D'autre part, l'ensemble des engins de parc devra assurer :

- un total d'environ 15 000 heures de fonctionnement en ce qui concerne les engins de préhension
- un total d'environ 13 000 heures pour les engins de transport.

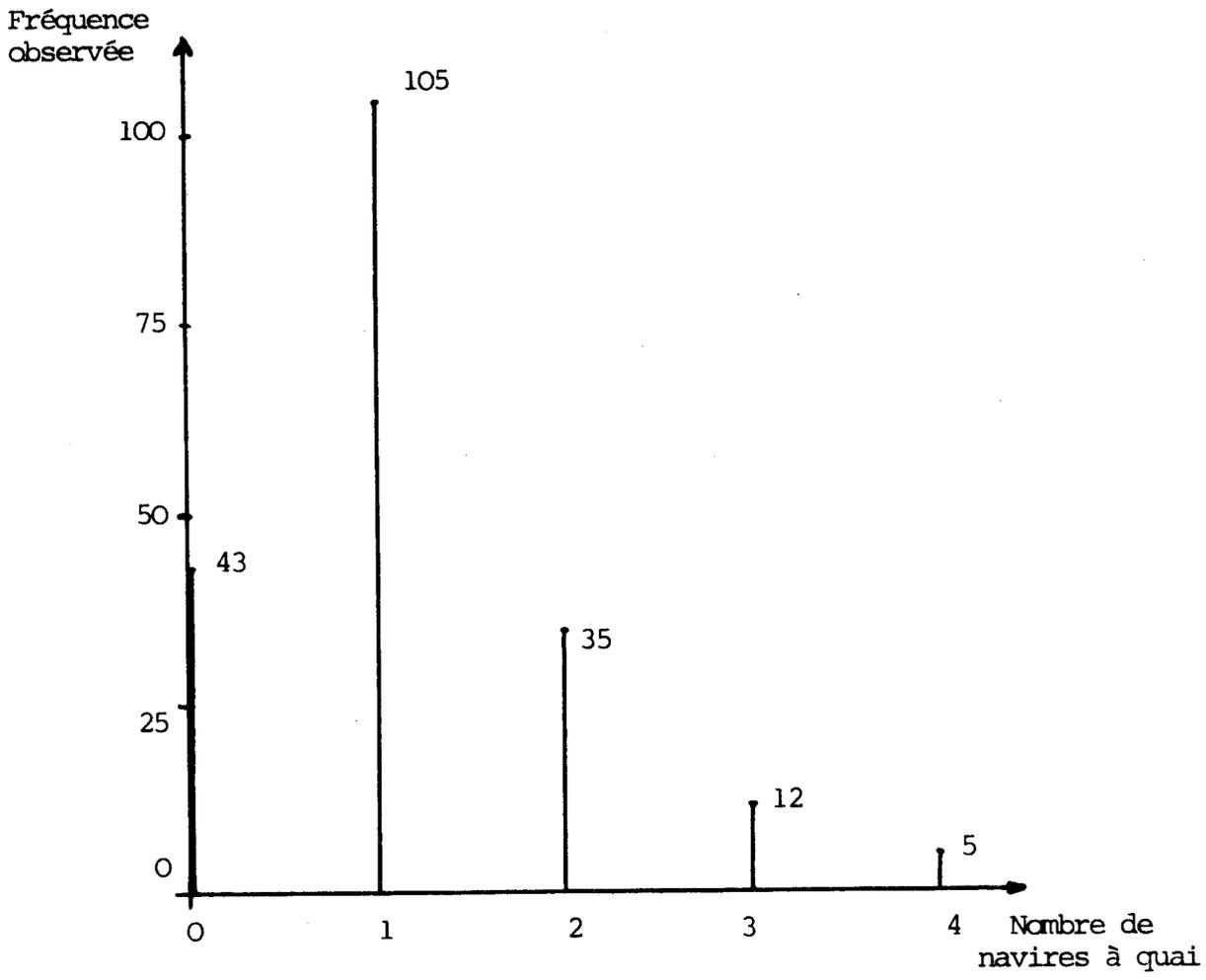
Utilisation du quai

A partir des résultats que nous donne le modèle, nous avons déduit manuellement le tableau IV - 5.2.9. suivant, représentant la longueur de quai utilisée en fonction du nombre de navires à quai à différents instants donnés.

Longueur utilisée en mètres	Nb. de nav. à quai			
	1	2	3	4
95	17			
155	43			
190		2		
215	45			
250		8		
310		7		
370		11		
430		7		
465			3	
525			7	
645			2	
680				1
740				4

Tableau IV - 5.2.9.





HISTOGRAMME DES NAVIRES A QUAI

Cas du trafic de 160 000 conteneurs par an

Figure IV - 5.2.10



Attente de portique de quai

Ce calcul a été réalisé sur des essais effectués dans les conditions suivantes :

- Les deux politiques de mise en service des portiques ont été envisagées (AFSEC = 1 et AFSEC = 2)
- Les mouvements import et export sont effectués cale par cale
- L'intervalle moyen d'arrivée des navires est de une journée
- Le terminal peut être en activité 24 heures sur 24.

Le tableau récapitulatif par catégorie de navire est établi à partir d'un total de 343 navires venus au terminal.

(1)	(2)
95	94,3 %
155	96,9 %
215	96,5 %

- . colonne (1) : catégorie des navires représentés par leur longueur
- . colonne (2) : pourcentage des navires ayant pu débiter leur manutention dès leur arrivée à quai.

Si la politique de manutention est d'effectuer tous les mouvements de type import par navire avant les mouvements de type export, on voit apparaître une augmentation, pour l'ensemble des navires, de 1 % à 1,5 % de ceux-ci qui attendent la mise en service d'un premier portique.

Dans le cas d'une attente de portique, la durée maximum que nous avons observée est : 7 heures 30 minutes.

IV - 6. CONCLUSION

Le modèle est actuellement en cours d'exploitation en ce qui concerne les perspectives d'avenir du port rapide. Quelques résultats déjà obtenus sont présentés en annexe.

Les grandeurs d'entrée que nous avons fait intervenir ont été décidées suite à une analyse "sur le terrain" effectuée sur une période de vie du terminal de 6 mois.

Au vu des résultats de cette analyse, il nous a également fallu modifier quelque peu la représentation des infrastructures du terminal (par exemple le quai : une partie de celui-ci s'est avérée être inutilisable pour les porte-conteneurs).

## C O N C L U S I O N   G E N E R A L E

o0o

L'étude réalisée a permis de mettre en évidence le fonctionnement interne d'un terminal à conteneurs ainsi que l'ensemble des problèmes liés aux mouvements des navires et des conteneurs.

Au vu des nombreuses configurations que peut prendre un tel système, nous avons choisi une méthode de modélisation par simulation numérique. Cette méthode est un outil puissant au profit de la recherche opérationnelle, mais diffère des méthodes analytiques classiques par le fait que l'objectif à atteindre n'est pas la recherche d'une solution optimale. En fait, notre but est de fournir des résultats capables de juger de la qualité de service d'un terminal, à partir des hypothèses et des règles de décision que l'utilisateur s'est fixées.

Afin de compléter l'étude que nous avons réalisée, il est nécessaire que l'utilisateur d'un tel modèle apporte les éléments économiques prépondérants qui décideront de l'orientation à donner au modèle.

La structure modulaire qui a été adoptée permet d'apporter des modifications et/ou des compléments par l'adjonction d'un ou de plusieurs modules, à condition, toutefois, de respecter les règles logiques du fonctionnement du modèle.

Dans un premier temps, les résultats fournis par les différentes simulations effectuées, semblent répondre aux besoins qui se font sentir au port rapide de Dunkerque.

Toutes les possibilités du modèle ne sont pas utilisées dans l'exploitation que nous avons présentée. D'autres types de moyens de manutention peuvent être envisagés en vue d'une extension à d'autres terminaux à conteneurs. La possibilité de stockage étant quelconque, l'importance du trafic n'est pas une limitation du modèle et ceci nous permet de tester des perspectives d'avenir en fonction de l'évolution du trafic de marchandises conteneurisées.

Un des facteurs prépondérants mesurant la qualité de service d'un terminal est le prix de la manutention d'un conteneur. Une deuxième extension de l'étude est envisageable avec des données économiques précises.

Ayant divisé le parcours de chaque conteneur en étapes élémentaires, il est possible de faire prendre en compte par le modèle, les investissements en matériel et les coûts d'utilisation des engins, afin d'en déduire un coût de passage moyen par type de conteneur.

Si la méthode de modélisation employée est adaptée aux systèmes complexes du type du terminal à conteneurs, elle est à éviter pour des problèmes de plus petites dimensions pouvant être traités par des méthodes plus classiques car elle nécessite une mise au point souvent très longue et représente donc, par elle-même, un coût d'utilisation non négligeable.

B I B L I O G R A P H I E

00000

- /AGA/ AGARD J, ALTABER F, FORTET R, KAUFMANN A.  
"Les méthodes de simulation" dans : Monographie de Recherche Opération-  
nelle pp. 1-30, 87 - 106.  
Association Française d'Informatique et de Recherche Opérationnelle  
Dunod 1968.
- /AFC/ Groupe de travail de l'AFCEP.  
"Simulation dans les transports" dans : Automatismes tome XXIII n° 5-6  
Mai-Juin 1978 (pp. 108 - 112, -124 - 132)
- /BEN/ BENEDETTI M.  
"Etude d'une bande de roulement réservée aux autobus". Etablissement  
d'un modèle prévisionnel de simulation" dans : Revue Française d'Informa-  
tique et de Recherche Opérationnelle (RIRO) - 3ème année n° IV-1 (1969)  
pp. 3 - 16
- /BOB/ BOBILLIER P.A.  
"Langages de simulation" dans : Traité pratique d'informatique - Volume  
H2 (H2960).
- /CHU/ CHURCHMAN C.W., ACKOFF R.I., ARNOFF E.L.  
Eléments de recherche opérationnelle (pp. 359 - 377)  
Paris Dunod 1961
- /CRE/ CRETON J.M.  
An approach to the optimal design of a container terminal - Master of  
Science at Massachusetts Institute of Technologie (JUNE 1973)
- /CRU/ CRUON R.  
"Simulation" dans, Traité pratique d'informatique - Volume H3 (H 7640).

- /DEK/ DEKINF H., GRIFFE P.  
"Simulation d'une ligne d'autobus" dans : IFAC-IFIP, 1er symposium international sur la régulation du trafic (1970).  
Préprint n° 6 (pp. 5a 55 - 5a 63)
- /DOR/ DORAS M.J.L.  
"Compte rendu sur la conférence d'hiver 1976 sur la simulation" dans :  
Automatisme - tome XXII n° 5 Mai 1977 (pp. 145 - 148)
- /ENC/ Encyclopédie Universelle. Simulation  
Vol. 14 (pp. 1043 - 1045)
- /FEU/ FEUVRIER C.V.  
La simulation des systèmes.  
Thèse de Sciences mathématiques - Paris 1970 (Dunod Université 1977)
- /GEN/ General Purpose Simulation System V (User's manual) I.B.M. Program  
Product SH 20.0851.1.
- /IEE/ I.E.E.E. Transaction on System Science and Cybernetic SS4 n° 4 Nov. 68.  
The application of simulation languages.
- /KAR/ KARPLUS W.J.  
"The spectrum of mathematical modelling and systems simulation" dans :  
Mathematics and computers in simulation - Vol. XIX (1977) (pp. 3 - 10)
- /KAU-1/ KAUFMANN A.  
"Phénomènes d'attente" dans : Méthodes et modèles de la recherche opérationnelle (tome 1) Paris Dunod 1972 - 1974
- /KAU-2/ KAUFMANN A., CRUON R.  
Les phénomènes d'attente. Dunod 1961.
- /KIV/ KIVIAT P.J., MARKOWITZ H.M., VILLANUEVA R.  
The simscript program language  
Rand Corporation R.460. PR (OCT.1968)

- /LER/ LEROUDIER J., RENAULT D., RENAULT M.  
Etude de la gestion des évènements dans une simulation à évènements discrets.  
IRIA rapport de recherche n° 246 ( Août 1977).
- /MOR/ MORSE P.M.  
"Analysis techniques for operations/research" dans : Systems Concepts.  
Edition : Ralph F. MILES, Jr. (1973)
- /OCK/ OCKENE A.  
Industrial Engineering Handbook (3ème édition 1971) - chapitre 6 :  
System Simulation (pp. 9.84 - 9.105)
- /PER/ PERRIN J.P., ODEN M., DACLIN E.  
"Etude de simulation de la marche des trains sur une ligne de métro" dans :  
IFAC-IFIP. 1er symposium international sur la régulation du trafic (1970).  
Préprint n° 6 (pp. 5a 17 - 5a 25)
- /SIM/ SIMPL/I - Program Reference Manual SH 19 - 5060 I.B.M. Centre de distribution.
- /THE/ THEYSSIER J.  
Adaptation d'une méthode de simulation à l'étude économique de problèmes ferroviaires.  
Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Paris VI (Juin 1973).
- /UNI/ UNIVAC  
Simula Programmer's Reference Manual UP-7556 (1967)
- /VEE/ VEERQUADIAN M., RAMANI S.  
"Simulation of a metropolitan bus system" dans : SCS Simulation Vol. 24  
n° 6 (Juin 1975) (pp. 133 - 136).

A N N E X E A

Nous allons tout d'abord récapituler les grandeurs réelles du port rapide de Dunkerque-Ouest que nous avons fait intervenir dans nos simulations.

1.- Infrastructures du terminal

- . accès au quai pour les porte-conteneurs
  - partie sud du quai de Flandre
  - partie centrale du quai de Lorraine

Ceci représente la possibilité de l'accès simultané de 2 porte-conteneurs de troisième génération.

- . parc de stockage.

Possibilité de stocker 1 600 conteneurs si on accepte un niveau de gerbage de 2.

2.- Moyens de manutention

- . à quai :
  - un portique au quai de Flandre
  - un portique au quai de Lorraine
  - un portique pouvant desservir les deux quais.

Après analyse statistique on constate que la cadence moyenne des portiques est de 20 conteneurs par heure, si on ne tient pas compte de l'influence des grandeurs extérieures.

- . sur le parc.

Pour la liaison du quai au parc, lors de la manutention des conteneurs d'un navire, les autorités du port allouent 3 ensembles tracteur-remorque et un engin de préhension par portique en service.



Il a été nécessaire de faire intervenir ces pannes dans le modèle de simulation.

Les autres arrêts sont dûs à des attentes d'engins de parc et autres problèmes indépendants des portiques eux-mêmes.

#### 5.- Trafic conteneurisé

Le Port de Dunkerque reçoit actuellement, pour ce qui est des marchandises conteneurisées, deux lignes régulières (C.G.M. et S.N.C.D.V.). Le trafic assuré par ces deux compagnies est le suivant :

- C.G.M. : Rotation de 4 navires sur une période de 40 jours soit une moyenne d'un navire tous les 10 jours.

#### *Caractéristiques des navires*

-----

- . environ 180 mètres de long
- . environ 500 conteneurs à manutentionner par escale à raison de :
  - 50 % de conteneurs de type import
  - 50 % de conteneurs de type export.

- S.N.C.D.V. : Rotation de 3 navires sur une période de 30 jours.

Les navires ont les mêmes caractéristiques que ceux de la C.G.M., mais ils n'ont que 300 conteneurs à manutentionner par escale également répartis entre les conteneurs de type import et de type export.

#### 6.- Simulation du port rapide

Nous faisons apparaître dans les tableaux et figure ci-après, les résultats que nous donne le modèle de simulation au vu des caractéristiques décrites précédemment :

	Temps d'escale moyen	Temps de manutention moyen
C.G.M. (500 cont./nav.)	1 994 u.d.t. 33 heures	1 907 u.d.t. 32 heures
S.N.C.D.V. (300 c./nav.)	1 389 " 23 "	1 219 " 20 "

N.B. : u.d.t = unité de temps du modèle = 1 minute.

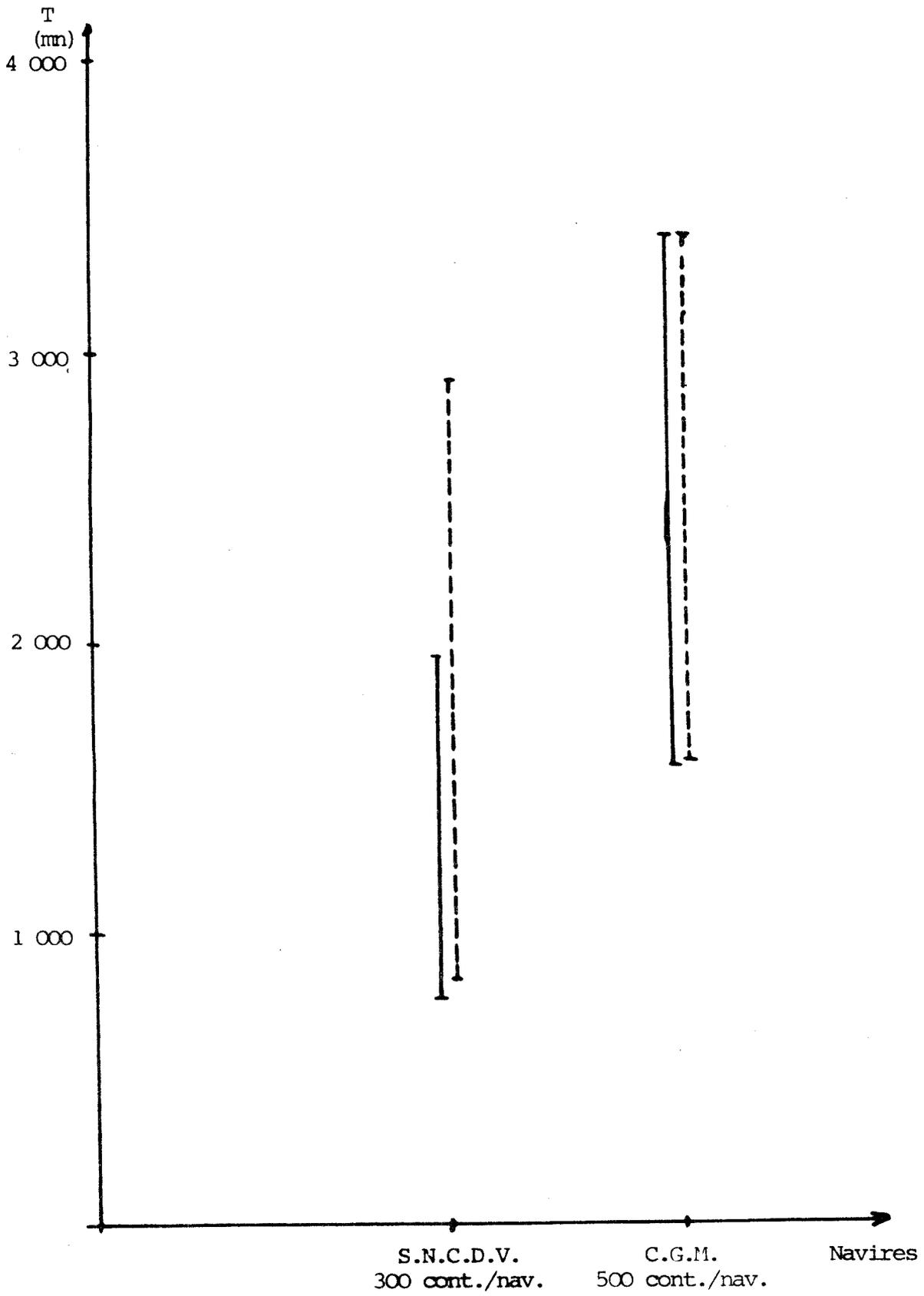
	Cadence de manutention par rapport au temps d'escale		
	Minimum	Moyenne	Maximum
C.G.M. (500 cont./nav.)	8,5 cont./heure	14 cont. / heure	18 cont./heure
S.N.C.D.V. (300 cont/H)	6 " "	12 " "	121 " "

Au point de vue des performances globales du terminal, on obtient une cadence moyenne comparée au temps d'escale des navires de 13 conteneurs par heure avec un temps d'escale moyen d'environ 29 heures et un temps de manutention moyen de 27 heures.

Ce trafic nécessite une activité approximative de 480 heures par portique et par année.

La figure ci-dessous représente les extrêmes des temps d'escale et de manutention que nous avons observés dans les résultats du modèle de simulation.

----- escale  
———— manutention



7.- Perspectives d'avenir au port rapide :

Le premier objectif que s'est fixé le port de Dunkerque est de prendre en charge l'accueil d'une troisième compagnie.

Du fait qu'une partie du quai n'est pas utilisable pour les porte-conteneurs, le problème le plus important est de savoir si la venue régulière des navires d'une troisième ligne ne va pas créer des attentes de place à quai trop grandes.

En second lieu, il paraît intéressant d'analyser l'incidence de cette augmentation de trafic sur les temps d'escale et de manutention des navires, en tenant compte du fait qu'on ne modifie en rien les possibilités des engins.

Dans les simulations que nous avons réalisées et dont les résultats apparaissent ci-dessous, nous avons introduit une troisième ligne dont les caractéristiques sont les suivantes :

- longueur des navires : 180 mètres
- intervalle moyen entre deux arrivées consécutives : 10 jours
- nombre de conteneurs à manutentionner 400 (moitié import  
(moitié export.

Sur une période simulée de 100 jours on a constaté deux attentes de place à quai respectivement de 20 heures et de 29 heures.

D'autre part, les deux tableaux ci-après nous montrent les différences des performances globales du système.

	Temps d'escale moyen	Temps de manutention moyen
C.G.M. (500 cont./nav.)	2 216 u.d.t. 37 heures	1 946 u.d.t. 32 H 30
3ème ligne (400 c./nav.)	1 829 " 30 h 30	1 722 " 28 h 40
S.N.C.D.V. (900 c./nav.)	1 530 " 25 h 30	1 478 " 24 h 30

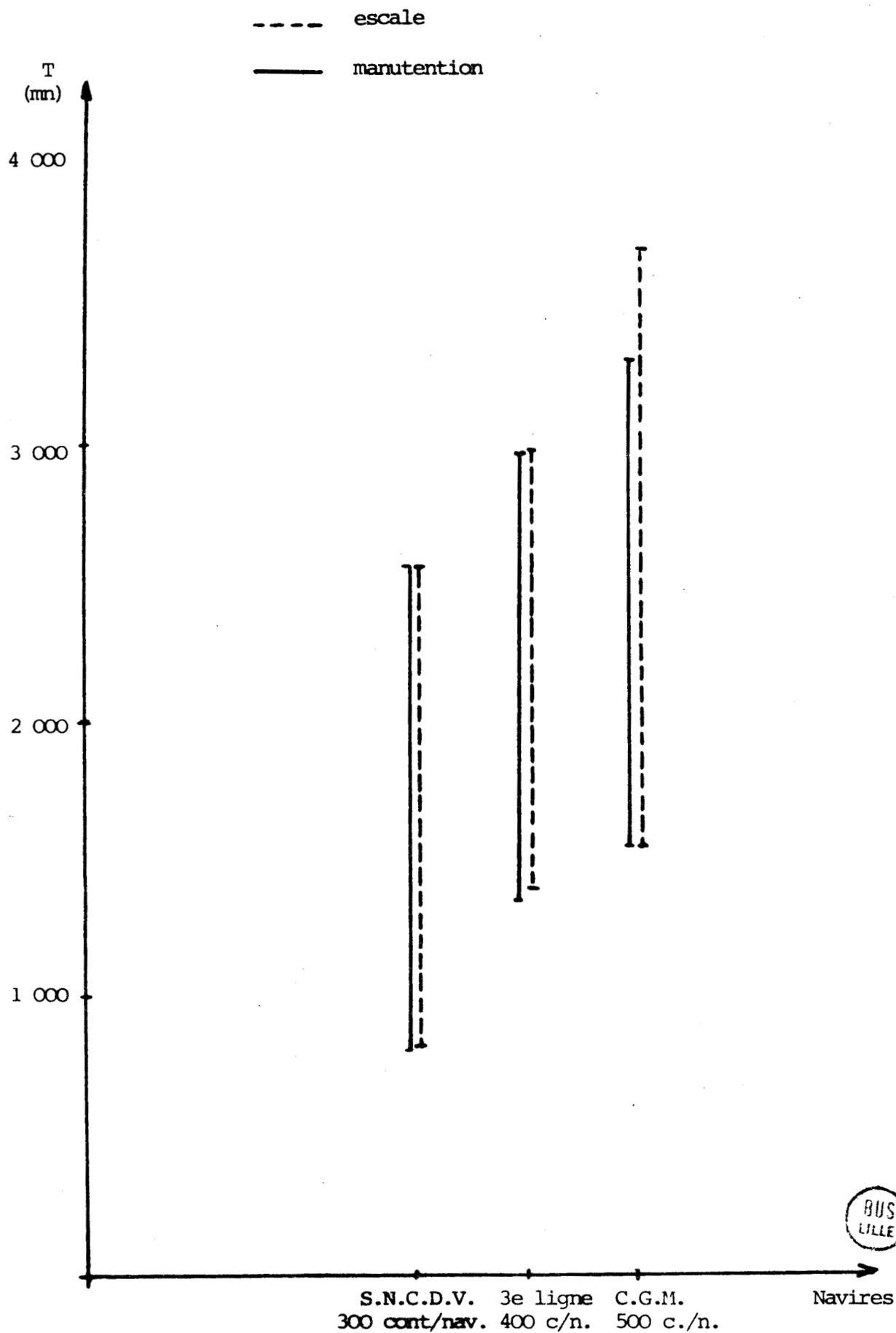
! Cadence de manutention par rapport au temps d'escale !			
!	! Minimum !	! Moyenne !	! Maximum !
!C.G.M. (500 cont./nav.) !	! 7,7 cont. /heure !	! 13 cont. / heure !	! 18,1 cont./Hre !
!3ème ligne (400 c./nav.) !	! 8 " " !	! 13,1 " " !	! 17 " " !
!S.N.C.D.V. (300 c./nav.) !	! 6,5 " " !	! 11 " " !	! 20,4 " " !

Avec les trois lignes confondues, on obtient un temps d'escale moyen de 31 heures et un temps de manutention moyen de 28 heures 40, ceci à raison d'une cadence de manutention de 12,4 conteneurs par heure.

Ces performances du terminal nécessitent 680 heures de fonctionnement par Portique et par an.

De même que dans le cas de deux lignes, nous avons fait apparaître sur la figure ci-dessous, les extrêmes des temps d'escale et de manutention pour les navires des trois lignes.

Remarque : Au vu des premiers résultats que nous donne le modèle, le fait que la cadence de manutention soit relativement faible (entre 12 et 13 conteneurs par heure), est dû principalement aux attentes d'engins de parc de la part des portiques et plus particulièrement aux attentes d'engins de préhension.



## A N N E X E B

Suite à la remarque que nous avons faite dans l'annexe A, nous avons voulu tester l'influence sur les performances globales du terminal, d'un plus grand nombre d'engins de préhension à la disposition des portiques en service.

Rappelons tout d'abord, que dans le cas précédent, on affectait trois ensemble tracteur-remorque et 1 engin de préhension par portique. Dans les résultats que nous faisons apparaître ci-après (2ème cas), chaque portique dispose, dans la mesure des ressources disponibles, de trois ensembles tracteur-remorque et de deux engins de préhension.

Tous les engins utilisés (aussi bien sur parc que sur quai) ont les mêmes performances techniques que dans les essais précédents. Les lois d'arrivée des navires et des conteneurs et la loi de séjour des conteneurs sont identiques.

Dans un premier temps nous tenons compte de deux lignes régulières et la période simulée est de 5 mois.

		Temps d'escale moyen	Temps de manutention moyen
1 engin de préhension	500 cont./ nav.	33 heures	32 heures
	300 cont./ nav.	25 "	24 "
2 engins de préhension	500 cont./ nav.	30 "	29 "
	300 cont./ nav.	25 "	23 "

		Cadence de manutention par rapport au temps d'escale		
		Minimum	Moyenne	Maximum
1 engin de préhension	500 cont./ nav.	18,7 cont./Hre	14,3 cont./Hre	18,3 cont./Hre
	300 cont./ nav.	15,9 " "	11,2 " "	21 " "
2 engins de préhension	500 " "	19,1 " "	15,9 " "	18,8 " "
	300 " "	18,6 " "	14 " "	22,9 " "

Sur le parc on constate un encombrement moindre des zones de stockage. En effet, dans le cas d'un seul engin de préhension par portique en service, on a observé un maximum de 1 900 conteneurs sur le parc, alors que dans le 2ème cas (2 engins de préhension) ce maximum n'a été que de 1 700 conteneurs.

Les attentes d'engins de préhension de la part des portiques sont données dans le tableau ci-dessous.

	Nombre d'attentes sur 6 000 mouvements	Temps moyen d'attente
1 engin de préhension	4 990	6 minutes
2 engins de préhension	3 370	3 mn 40 s.

Voyons maintenant l'évolution de ces performances si on considère que le terminal accueille une troisième ligne à 400 conteneurs par escale. Dans ce cas là, la période simulée a été réduite à 3 mois et demi.

		Temps d'escale moyen	Temps de manutention moyen
1 engin de préhension	500 cont./nav.	37 heures	32 heures 30
	400 " "	30 heures 30	28 heures 40
	300 " "	25 heures 30	24 heures 30
2 engins de préhension	500 " "	31 heures	31 heures
	400 " "	26 heures	26 heures
	300 " "	23 heures	22 heures

		Cadence de manutention par rapport au temps d'escale		
		Minimum	Moyenne	Maximum
1 engin de préhension	500 cont./nav.	7,7 cont./Hre	13 cont./Hre	18,1 cont./Hre
	400 " "	8 " "	13,1 " "	17 " "
	300 " "	6,5 " "	11 " "	20,4 " "
2 engins de préhension	500 cont./nav.	9 " "	15,1 " "	19,4 " "
	400 " "	8,5 " "	15,3 " "	17,1 " "
	300 " "	7,2 " "	12 " "	21,6 " "

Le nombre de conteneurs maximum observé sur le parc est le suivant.:

- 1 engin de préhension par portique : 2 050
- 2 engins de préhension par portique : 1 800



Sur le même nombre de mouvements par portique, les attentes d'engins de préhension sont quasiment les mêmes que dans le cas de deux lignes régulières.