

BCEOM

DAC (65). 12. 213

informations et documents

juillet 1983

42

Directeur de la publication : Janine MORICE
imprimé en France par Daniel LEPEERS S.A.R.L.
172, rue Jeanne-d'Afc - 75013 PARIS
Juillet 1983 - dépôt légal n° 42
tirage : 1 500 exemplaires

SOMMAIRE

exploitation portuaire une approche par simulation	3
par Philippe BARNIER, Ingénieur au BCEOM	
aménagement et mise en valeur des milieux lagunaires	39
par Patrick MICHEL, Ingénieur-Écologue au BCEOM	

On trouvera à la fin de chaque article les résumés en français, en anglais et en espagnol.

13739

EXPLOITATION PORTUAIRE UNE APPROCHE PAR SIMULATION

par Philippe BARNIER
Ingénieur au BCEOM

C'est sous l'impulsion de Monsieur Jean PAUTREL, Adjoint au chef du service des Ports et Voies Navigables au BCEOM, qu'on été entreprises et développées les études de simulation d'exploitation portuaire.

A ce jour, de nombreuses applications ont été effectuées, en particulier les deux études récentes qui sont à l'origine de cet article.

AVANT-PROPOS

L'application, de plus en plus fréquente, de la théorie des files d'attente permet à l'ingénieur, l'économiste, l'organisateur et le planificateur, de mieux appréhender l'impact financier des temps d'immobilisation sur les facteurs de production.

En pratique, il peut s'agir d'attente pour cause de congestion ou d'inadaptation d'une infrastructure eu égard aux besoins. Ce phénomène préoccupe les décideurs et les personnes chargées de les conseiller.

Pour mieux cerner les besoins et dimensionner les équipements selon les critères de rentabilité que toute saine organisation doit suivre, diverses méthodes sont employées. Les unes sont essentiellement analytiques, les autres font appel à la simulation.

Avec l'essor des moyens informatiques, la simulation sur ordinateur a trouvé son domaine d'application. De la sorte, en fonction des besoins ressentis et du programme d'extension proposé, la recherche de l'optimum économique qui en découle peut être engagée.

Les publications traitant de ce sujet abondent. De ce fait, cet article ne vise qu'à exposer les résultats partiels de deux études récentes effectuées au service Ports et Voies Navigables du BCEOM : la première pour le port autonome de Nantes-Saint Nazaire et la seconde pour le port de Belawan en Indonésie.

Cet article présente, de façon succincte, le but recherché, la méthodologie suivie, les définitions des éléments essentiels qui permettent de procéder à la simulation, et enfin, quelques résultats significatifs de dépouillement de statistiques portuaires et de simulation de trafic.



Encombrement du Port de Lagos - 1978 (Photo SAGA).

A. APPROCHE METHODOLOGIQUE ET OBJECTIFS

I - INTRODUCTION

L'un des objectifs essentiels d'un plan de développement portuaire est de déterminer les moyens nécessaires pour faire face dans l'avenir à un trafic supposé croissant. L'ensemble du trafic, aussi bien au chargement qu'au déchargement passe par des points obligés : les quais du port. On peut donc considérer le trafic portuaire comme un flux passant par un certain nombre d'unités : les postes à quai.

Pour faire face à un accroissement de trafic on peut, comme pour tout flux, agir sur deux facteurs :

- . le nombre d'unités que peut emprunter le flux, ici le nombre de postes à quai,
- . la vitesse du flux unitaire, ici la cadence des opérations de manutention des navires.

Ces deux facteurs, très différents, intéressent à des titres divers et parfois contradictoires plusieurs groupes d'intérêts différents dont les trois principaux sont les suivants :

1. Les armateurs ou les navires qui jugent un port sur le temps total passé au port pour une opération déterminée ; avec le coût des frais portuaires (compte d'escale), c'est ce facteur qui intervient dans la détermination des taux de frêt ;

2. Les autorités portuaires ou gouvernementales qui, assurant le financement de l'infrastructure de base, mettront l'accent sur l'utilisation de cette infrastructure. Elles sont donc particulièrement intéressées par le tonnage annuel manutentionné par poste et par le taux d'occupation des postes ;

3. Les services chargés des manutentions qui sont particulièrement intéressés par les rendements calculés par équipe de dockers, par grue et par cale.

Ces trois groupes d'intérêts peuvent être amenés à des conclusions contradictoires en cherchant à améliorer les seuls rendements qui les intéressent directement. C'est ainsi que pour diminuer les investissements, les autorités portuaires peuvent avoir tendance à limiter les nombres de postes à quai à un niveau qui certes permet d'opérer tous les navires mais au prix d'attente, alors que les armateurs souhaiteraient un accroissement du nombre de postes tel qu'ils soient assurés de n'avoir jamais d'attente. De même, les services chargés des manutentions en cherchant à atteindre le plein emploi de leur personnel et de leur matériel peuvent être amenés en cas de pointe à assurer au navire un service insuffisant. Ces considérations doivent cependant être nuancées ; c'est ainsi que l'armateur est

également intéressé par le rendement des équipes, lequel influe directement sur la durée des opérations au navire : plus ces rendements sont élevés, moins de postes à quai sont nécessaires, ce qui intéresse également les autorités portuaires ...

La détermination des caractéristiques optimales d'un port dépend donc de la minimisation des trois coûts suivants :

- *le coût des investissements* des infrastructures (dans le but d'accroître la capacité d'accueil du port) et des équipements de manutention de la zone bord à quai (dans le but d'augmenter la capacité d'un linéaire de quai donné) ;

- *le coût d'exploitation global fonction* :

. des moyens mis en oeuvre pour la desserte des navires,

. des dimensions des unités de transport maritime.

- *le coût d'immobilisation des navires* qui comprend celui de la durée d'opération à poste et celui de l'attente qu'un poste soit libéré.

L'immobilisation des navires pour attente est très onéreuse. Globalement, l'analyse des attentes fait ressortir qu'elles sont notamment dues :

. soit aux accès du port : nécessité d'attendre la marée pour engainer un chenal, interdiction de la remontée de nuit ...

. soit à la saturation des installations portuaires (quais, engins de manutention, aires de stockage), ou des moyens d'évacuation terrestre.

Dans de tels cas, les investissements auront pour objet de diminuer l'attente des navires : leur intérêt se mesurera à la *réduction des temps d'attente*.

Ces derniers peuvent être évalués de plusieurs façons :

1. dans les cas simples, à partir de modèles

mathématiques faisant appel à la théorie des files d'attente,

2. dans les autres cas, par un recours à un modèle de simulation qui pourra varier du plus simple (simulation des accès d'un port d'estuaire) au plus compliqué (simulation d'un terminal à marchandises générales, voire simulation d'un port complet).

En général, il est délicat de faire fonctionner de façon satisfaisante un modèle complet de simulation portuaire car les règles d'exploitation sont très complexes et, par conséquent, difficiles à prendre en compte.

En revanche, les modèles de simulation simples sont extrêmement pratiques et donnent la plupart du temps de très bons résultats.

Une fois les réductions d'attente déterminées, elles seront valorisées en utilisant des coûts d'immobilisation des navires. Cette dernière étape ne présente en général aucune difficulté si l'on désigne par :

C_i le coût de l'équipement portuaire,

C_a (a) le coût de l'exploitation de cet équipement,

C_N (a) le coût de la durée de séjour au port des N navires qui assurent le trafic (a),

la recherche de la solution optimale consiste, dans ce cas, à minimiser la somme de ces coûts après actualisation.

La simulation sur modèle intervient en amont de l'étude économique du projet. Elle permet, d'après les prévisions de trafic, de fixer les idées sur ce que pourraient être :

- le taux d'occupation d'un ou plusieurs postes à quai, voire du port dans son ensemble,
- le taux d'attente prévisible.

II - METHODOLOGIE

1. ETUDE DES FILES D'ATTENTE - PRINCIPES GENERAUX

Le flux de marchandises passant par les quais peut s'exprimer en fonction de différents paramètres intéressant les navires, les quais, les conditions de manutention :

- . nombre de navires entrés dans l'unité de temps,
- . volume de la cargaison, par navire, par cale,
- . temps de séjour au port des navires,
- . nombre de cales travaillées,
- . horaires de travail,
- . rendement horaire des manutentions.

Notation utilisée :

- \emptyset = le tonnage annuel
- N = le nombre annuel de navires
- T_m = la cargaison moyenne d'un navire
- r = rendement brut par escale et par navire
- T_s = le temps de séjour moyen à poste des navires
- W_q = le temps d'attente moyen des navires (Waiting queue)
- W = le temps de séjour total moyen au port des navires
- M = le nombre de postes
- ρ = le taux d'occupation des postes
- T_a = intervalle moyen séparant deux arrivées successives.

Ces paramètres sont obtenus par l'analyse de l'exploitation.

Entre ces paramètres, on a d'abord les relations évidentes :

$$W = T_s + W_q$$

$$\emptyset = N \cdot T_m = N \cdot r \cdot T_s$$

D'autre part, la théorie des files d'attente nous apprend qu'il existe une fonction :

$$\frac{W_q}{T_s} = f(M, \rho, FTS, FTa)$$

où

FTS = fonction de répartition des T_s

FTa = fonction de répartition des T_a .

Ces trois équations nous permettent donc d'établir une relation entre le nombre de postes et le temps de séjour au port des navires pour un niveau de trafic donné (marchandises et navire). L'analyse classique coût-avantages permet alors d'évaluer le nombre optimum de postes pour un trafic et des rendements donnés.

D'un autre point de vue, l'hypothèse d'un accroissement du nombre de postes à quai peut être remplacée par celle d'une amélioration des rendements.

Ces rendements pourront être appréhendés par l'analyse des temps de séjour (T_s). Les variations dans la répartition des temps de service et la valeur du temps de service moyen pourront ainsi être introduites dans les équations du paragraphe précédent.

Pour un navire, le temps de séjour T_s dépend notamment de T_r , temps réel de travail sur le navire.

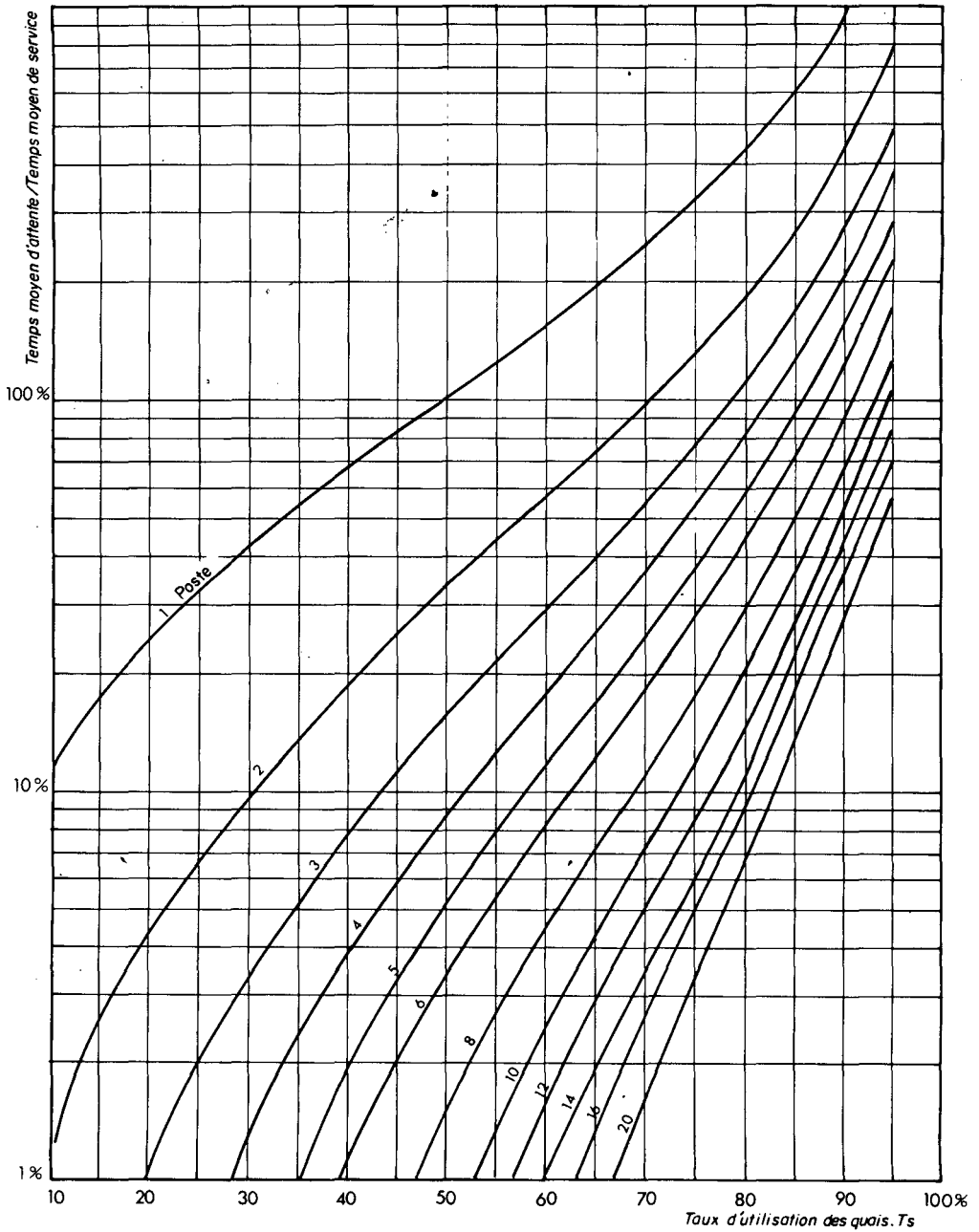
T_r est fonction :

- du nombre de cales opérées,
- du rendement unitaire des opérations de manutention par cale.

Ces principes étant définis, l'analyse d'un processus d'attente donné est à chaque fois un cas d'espèce qui doit en conséquence être traité comme tel.

ABaque I - ARRIVEES REPARTIES SUIVANT UNE LOI DE POISSON

Temps de service répartis suivant une loi exponentielle



2. CAS RESOLVABLES MATHÉMATIQUEMENT

La théorie des files d'attente montre que dans certains cas particuliers, il existe une relation mathématique relativement simple entre

$$\frac{Wq}{Ts} = \frac{\text{attente moyenne}}{\text{temps moyen de séjour à quai}}$$

et les paramètres M (nombre de postes à quai, ρ (taux d'occupation), T_s et T_a (fonctions de répartition respectivement des temps de séjour et des arrivées).

Tel est notamment le cas dans les conditions suivantes :

- postes banalisés,
- intervalles séparant deux arrivées successives réparties selon une loi exponentielle (les navires arrivent suivant un processus de Poisson),
- temps de séjour réparti selon une loi exponentielle.

Dans ce cas, la fonction

$$\frac{Wq}{Ts} = f(M, \rho, FTs, FTa)$$

est ramenée à une fonction simple de la forme

$g(M, \rho)$ dont les variations en fonction de M et de ρ font l'objet de l'abaque I ci-après.

De même, dans le cas où les temps de séjour sont constants, la fonction $\frac{Wq}{Ts}$ peut être ramenée à une fonction simple de la forme $h(M, \rho)$.

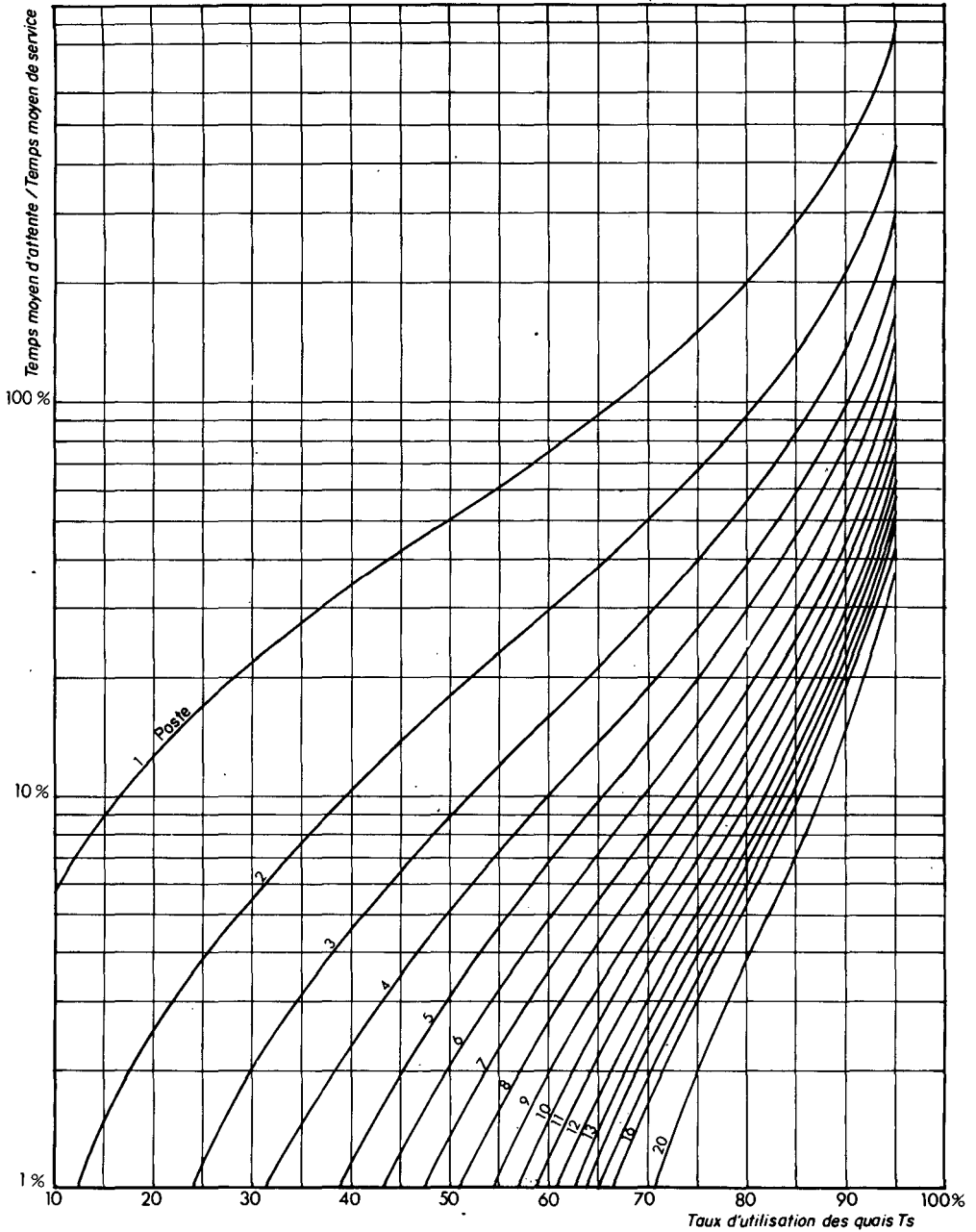
Ces variations, en fonction de M et de ρ , font l'objet de l'abaque II.

3 - CAS NON RESOLVABLES MATHÉMATIQUEMENT

Lorsque les intervalles séparant deux arrivées successives sont répartis suivant une loi différente de la loi exponentielle, ou lorsque l'analyse des temps de séjour conduit à des distributions différentes des lois exponentielle ou constante, on est en présence de cas plus complexes, difficilement résolubles par un traitement mathématique. Dans ce cas, le problème ne peut être résolu que par recours à la simulation sur modèle. C'est essentiellement ces cas et les résultats obtenus lors de plusieurs applications pratiques qui seront examinés dans la suite de cet article.

ABaque II - ARRIVEES REPARTIES SUIVANT UNE LOI DE POISSON

Temps de service répartis suivant une loi exponentielle



B. SIMULATION

MODE DE TRAITEMENT DES DONNEES SUR ORDINATEUR

I - INTRODUCTION

Les facteurs quantitatifs et qualitatifs utiles à la simulation peuvent, selon la précision recherchée, s'obtenir :

- (1) soit par estimation des caractéristiques propres à chaque catégorie de navires (lois des arrivées, lois des temps de séjour, ordre de priorité, compatibilité avec les différents postes à quai ...);
- (2) soit en procédant à une collecte de données généralement extraites de documents portuaires (time-sheet, manifestes, livre de la capitainerie).

Le dépouillement et le traitement sont effectués par un programme «STATPORT» qui calcule les distributions des intervalles d'arrivée et des temps de séjour, et en donne une représentation graphique.

Des enquêtes faites auprès des Autorités portuaires, des armateurs, des agents maritimes et des services de manutention servent à définir les besoins ressentis, souhaités ou prévus. Cela sous-entend d'analyser, de planifier et de quantifier toutes les variations des facteurs de production susceptibles d'intervenir dans les cinq ou dix prochaines années. Il peut s'agir, par exemple, d'investissements en infrastructures portuaires, de réorganisation (compatibilités, priorités) interne au port, d'évolution de la flotte, de modification du conditionnement des marchandises ou encore des variations du tonnage par type de marchandises voire du régime des shifts, etc.

Pour qu'une telle étude trouve tout son sens, il est nécessaire d'étalonner le modèle en simulant un état de référence (généralement la

situation actuelle), puis de simuler les états envisagés comprenant tout ou partie du programme d'extension portuaire. Chaque état est daté. Il lui est associé une prévision de trafic.

Cette simulation est réalisée grâce au programme «SIMULPORT» qui, pour chacun des états considérés, estime les conditions les plus probables de réception des navires. (Taux d'occupation des postes, nombre de navires ayant attendus, temps d'attente moyen ...).

II - DONNEES

Les données de base prises en compte dans le programme «SIMULPORT» sont :

1. LE NOMBRE DE CATEGORIE DE NAVIRES :

La définition des catégories est propre à chaque cas d'espèce. Il peut s'agir des caractéristiques des navires proprement dites, du conditionnement ou de la nature des marchandises opérées par telle famille de navires, ou encore de la provenance et de la destination des cargaisons.

2. LE NOMBRE DE POSTES A QUAI :

Selon l'objet de l'étude, ce nombre peut désigner un groupe particulier de quais ou l'ensemble des quais du port.

3. LA COMPATIBILITE DE CHAQUE POSTE AVEC LES DIFFERENTES CATEGORIES DE NAVIRES SELECTIONNES.

4. LES REGLES DE PRIORITE D'UNE CATEGORIE DE NAVIRE SUR LES AUTRES :

La priorité d'accostage le plus communément admise repose sur la règle «premier arrivé, premier servi». Cependant, il arrive, pour des raisons d'exploitation (temps d'escale de certains navires très courts) ou pour des raisons de coûts d'immobilisation de navires spécialisés, que l'ordre d'attribution des postes à quai fasse l'objet d'une décision des Autorités Portuaires.

Ainsi, les conditions de mise à poste peuvent par exemple suivre la règle suivante :

- priorité de premier ordre : les navires porte-conteneurs spécialisés (type cellulaire) d'une ligne régulière agréée du port,
- priorité de second ordre : les navires d'une ligne régulière agréée du port dont une partie des marchandises chargées ou déchargées est conditionnée en conteneurs,
- priorité de troisième ordre : les navires d'une ligne régulière agréée du port, dont aucune des marchandises chargées ou déchargées n'est conditionnée en conteneurs.

5. L'INTERVALLE DE TEMPS MOYEN ENTRE DEUX ARRIVEES SUCCESSIVES DE NAVIRES D'UNE MEME CATEGORIE :

La valeur de cet intervalle peut être déduite d'après un échantillon représentatif sélectionné dans les statistiques portuaires ou d'après les prévisions de trafic.

Dans le premier cas, il s'agit de la moyenne des temps séparant deux arrivées consécutives calculés d'après les heures d'arrivée en rade enregistrées par la capitainerie.

Dans le second cas, les prévisions en tonnage du trafic complétées de données telles que la cargaison moyenne des navires de chaque catégorie, l'évolution du conditionnement des marchandises entraînant une modification des catégories de navires touchant le port etc. permettent d'estimer le nombre d'escales (E) nécessaire pour assurer le trafic annuel. L'intervalle moyen entre deux arrivées successives de navires d'une même catégorie peut s'exprimer par :

$$I = \frac{8\,760 \text{ heures}}{E}$$

La loi de probabilité qui sera associée à cet intervalle précise la dispersion des arrivées par rapport à I.

6. LA LOI DES INTERVALLES ENTRE ARRIVEES PAR CATEGORIE

Les arrivées sur rade appartiennent à cet ensemble de phénomènes dans lesquels une ou plusieurs grandeurs varient au cours du temps d'une manière qui peut ne pas être prévisible.

Des études statistiques et mathématiques ont démontré que la distribution des événements n'en était pas moins soumise à des lois permettant d'attacher des probabilités aux différentes valeurs possibles des grandeurs considérées.

Parmi les lois couramment rencontrées, on trouve :

- la loi exponentielle (processus d'arrivée poissonien),
- la loi constante,
- la loi uniforme,
- les lois d'Erlang d'ordre K,
- les lois hyper-exponentielles.

**6.1. La loi exponentielle
(processus de Poisson)**

La loi exponentielle caractérise un processus d'arrivée dit poissonien. Ce processus est notamment observé lorsque les arrivées de navires sont indépendantes, le taux moyen de ces arrivées constant et le nombre d'arrivées simultanées quasiment nul.

Dans ce cas, si I_m est la valeur moyenne de l'intervalle de temps entre deux arrivées, la probabilité que l'intervalle de temps observé I_O soit supérieur à une valeur donnée I_x est déterminé par :

$$P [I_O > I_x] = e^{-\frac{I_x}{I_m}}$$

La distribution des intervalles de temps entre les arrivées est alors caractérisée par :

- moyenne (M) = I_m
- écart type (E.T.) = I_m

d'où
$$\left(\frac{E.T.}{M}\right)^2 = 1$$

6.2. La loi constante

Cette loi caractérise un processus dans lequel les intervalles entre arrivées sont constants. Elle correspond ainsi au cas où les arrivées se produisent à jour et heure fixés (car ferry quotidien à 12 h par exemple).

Dans ce cas, I_m étant la valeur moyenne de l'intervalle de temps entre deux arrivées et I_O la valeur observée, on a :

$$P [I_O = I_m] = 1$$

et
$$P [I_O \neq I_m] = 0$$

La distribution des intervalles de temps entre les arrivées est alors caractérisée par :

- moyenne (M) = I_m
- écart type (E.T.) = 0

d'où
$$\left(\frac{E.T.}{M}\right)^2 = 0$$

6.3. La loi uniforme

Cette loi caractérise un processus dans lequel les intervalles entre arrivées peuvent prendre toutes les valeurs comprises entre deux bornes avec la même probabilité. Cette loi correspond au cas d'arrivées programmées à date fixe avec des variations aléatoires de part et d'autre de la date prévue.

Dans ce cas, I_x étant une valeur donnée de l'intervalle de temps comprise entre les deux bornes A et B, et I_O l'intervalle de temps observé, la probabilité que la valeur de I_O soit supérieure à cette valeur I_x est déterminée par :

$$P [I_O > I_x] = \frac{B - I_x}{B - A}$$

La distribution des intervalles de temps entre les arrivées est alors caractérisée par :

moyenne (M) =
$$\frac{B + A}{2}$$

écart type (ET) =
$$\frac{(B - A)^2}{12}$$

d'où
$$\frac{E.T.}{M} = \frac{(B - A)^2}{36 (B + A)^2}$$

6.4. Les lois Erlang - K

Ces lois, déduites de la loi exponentielle, sont beaucoup plus complexes. En effet, elles caractérisent la distribution des intervalles de temps séparant la n_i ème arrivée de la $n + K_i$ ème, le processus d'arrivée étant un processus poissonnien.

Dans ce cas, Ikm étant la valeur moyenne de l'intervalle de temps entre la n_i ème arrivée et la $n + K_i$ ème, Iko la valeur observée, la probabilité que Iko dépasse une valeur donnée Ix est déterminée par :

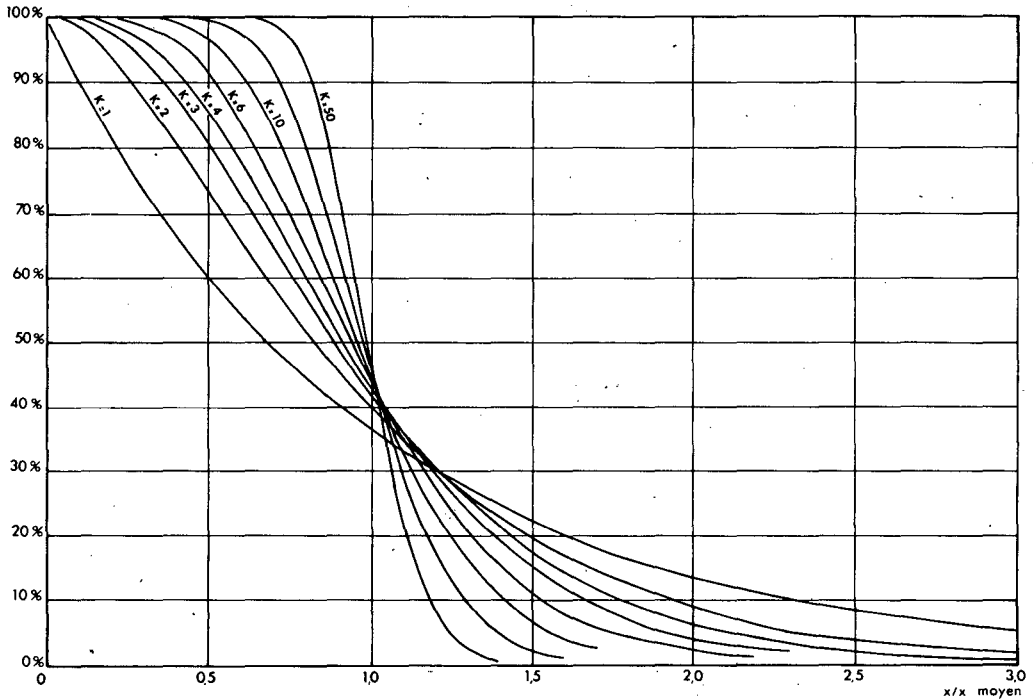
$$P \left[Iko > Ix \right] = e^{-\frac{k \cdot Ix}{Ikm}} \sum_{n=0}^{k-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{k \cdot Ix}{Ikm} \right)^n$$

La distribution de ces intervalles de temps entre arrivées est alors caractérisée par :

- moyenne (M) = Ikm
- écart type (E.T.) = $\frac{Ikm}{\sqrt{k}}$

d'où $\left(\frac{E.T.}{M} \right)^2 = \frac{1}{k}$

Le graphique suivant représente ces fonctions de répartitions pour différentes valeurs de k .



Remarque

Lorsque $k \rightarrow \infty$, la loi Erlang k , devient assimilable à la loi constante et, pour $k = 1$, elle s'identifie à la loi exponentielle.

Ainsi, sous un aspect plus pratique, on peut définir un degré de régularité mesurant la dispersion des variables. Dans ce cas, on désignerait par le degré de 1er ordre les distributions de type loi d'Erlang d'ordre 1 (processus poissonnien) et par le degré d'ordre infini les distributions constantes (dispersion nulle).

6.5. Les lois hyperexponentielles

Elles caractérisent la distribution des intervalles de temps séparant deux événements successifs, ces intervalles suivent une loi exponentielle dont la valeur du paramètre varie suivant une loi de probabilité donnée. Les expressions obtenues sont alors très complexes.

Ces lois analysent le champ des distributions non couvert par les lois décrites précédemment. En pratique, on rencontre parfois des distributions hyperexponentielles d'ordre 2 ou 3, mais rarement, si ce n'est jamais celles d'un ordre supérieur.

Pour ces distributions, on a

$$\left(\frac{\text{E.T.}}{M}\right)^2 > 1$$

En pratique, de telles lois sont notamment rencontrées dans le cas où :

1. une trop courte distance sépare le port de provenance des navires du port de destination.
2. des contraintes de courant ou de marée limitent dans le temps l'accès au port (rade intérieure).

Ces phénomènes perturbent le processus purement aléatoire qui aurait pu se produire.

6.6. Choix des lois

Le choix des lois de probabilité retenues pour la simulation peut être fondé sur l'analyse :

- soit des données statistiques propres à chaque catégorie. L'échantillon devra couvrir les périodes où le trafic varie du plus faible au plus fort et il devra permettre de dégager un nombre suffisant de navires par catégorie.
- soit du potentiel de trafic en tenant compte de l'expérience acquise sur des cas réels constatés.

Cette analyse permet de définir les paramètres des distributions observées à savoir, la moyenne (M) et l'écart type (E.T).

Le calcul du paramètre $\left(\frac{M}{\text{E.T.}}\right)^2$

permet d'estimer la loi théorique a priori la mieux adaptée pour représenter les distributions réellement constatées. En effet :

$$\text{si } \left(\frac{M}{\text{E.T.}}\right)^2 \leq 1$$

on peut envisager un ajustement par loi exponentielle ou hyperexponentielle.

$$\text{si } \left(\frac{M}{\text{E.T.}}\right)^2 = K \geq 1$$

on peut envisager un ajustement par une loi du type Erlang-k.

A posteriori, un test statistique du type χ^2 permet de vérifier le caractère acceptable de cet ajustement.

NOTA Pour une même valeur de la moyenne, la distribution Erlang - K est moins dispersée que la distribution exponentielle, tandis qu'au contraire, la distribution hyperexponentielle est plus dispersée.

7. TEMPS DE SERVICE MOYEN :

Par définition, le temps de service (temps de séjour à quai) correspond à la durée pendant laquelle le navire est resté à poste.

La valeur du temps de service moyen par catégorie (TS_i) est estimée à partir des données relatives à un échantillon représentatif. En l'absence de statistiques significatives, cette valeur peut être appréciée sur la base d'enquêtes faites auprès de professionnels portuaires.

Dans la pratique, cette appréciation se fait en essayant d'évaluer :

a) le tonnage moyen (T_i tonnes) de marchandises manutentionnées en moyenne par escale de navire de la catégorie i . T_i peut se décomposer en $T_i(j, k)$. « j » est un indice propre au conditionnement des marchandises - sacs, fûts, palettes, conteneurs, etc ... - « k » est un indice qui précise s'il s'agit de marchandises chargées (export) ou de marchandises déchargées (import ou transit) ;

b) le nombre moyen de mains (G_j) qui opèrent sur le navire par escale (ce nombre est parfois supérieur à celui des cales travaillées) ;

c) les rendements R_j (avec la même définition pour l'indice j que ci-dessus) établis par le ratio :

$$R_j = \frac{\text{Tonnage manipulé}}{(\text{h. payées}) \times (\text{nbre. moyen d'équipes})}$$

Ces rendements intègrent toutes les causes d'arrêt telles que pannes de treuils, pluie, ouverture et fermeture des panneaux de cales, attentes de documents ou de marchandises ainsi que les temps morts en fin et début de shift ;

d) un coefficient pondérateur λ , qui tient compte des temps morts entre l'arrivée du navire à poste (l'accostage) et le début du travail, entre la fin de travail et le départ du navire (l'appareillage), ainsi que ceux correspondant aux périodes non travaillées, etc...

D'où l'expression du temps de service moyen :

$$TS_i = \lambda \times \sum_j \frac{T_i(j)}{R_j \times G_j}$$

8. LOI DE SERVICE SUIVIE :

La variable aléatoire est ici celle définie par l'intervalle entre les dates et heures respectives de la mise à quai et du départ du quai.

Les lois statistiques qui peuvent régir les distributions des temps de service sont les mêmes que celles exposées pour les distributions des intervalles entre arrivées.

Il peut simplement être précisé que, le plus souvent, ce sont les lois d'Erlang qui caractérisent le mieux les phénomènes observés.

9. PÉRIODE DE MAUVAIS TEMPS :

Le programme intègre le fait qu'un ou plusieurs postes à quai soient rendus indisponibles en raison de trop fortes houles.

III - TRAITEMENT DES DONNEES

Pour simuler l'activité d'un port, donc la réalisation d'évènements tels arrivée, attente, mise à quai, etc..., on tire «au hasard» des nombres suivant les lois de probabilités sensées décrire ces évènements.

Les lois de probabilité utilisées sont celles précédemment définies, à savoir les lois des arrivées et des temps de séjour. Des sous-programmes permettent de générer respectivement une suite (u_i) associée aux arrivées de navires, et une suite (v_i) associée aux temps de séjour.

A chaque navire correspond un couple (u_i, v_i) . Les navires sont classés par ordre chronologique selon les dates et heures d'arrivées pour toutes les catégories de navires confondues.

Le programme «SIMULPORT» traite alors chacun des navires et la simulation proprement dite (mise en file d'attente, règles des priorités et contraintes des compatibilités, mise à quai, etc.) s'opère sur une période équivalente à un an de trafic, en prenant en compte les différentes catégories de navires. Après la 1ère itération, le programme obtient une valeur pour chacun des différents indicateurs d'exploitation retenus par le modèle (nombre de navires servis, temps d'attente, temps de séjour, etc.). Le programme conserve l'état des files d'attente, et, après avoir généré une nouvelle série de couples (u_i, v_i) , effectue une seconde itération sur une période équivalente également à un an de trafic. Les valeurs obtenues sont cumulées avec les précédentes.

Le processus d'itération est répété un certain nombre de fois, les moyennes des valeurs obtenues donnant une estimation des valeurs véritables des indicateurs d'exploitation en régime permanent. En effet, ces moyennes convergent vers les valeurs réelles, la fiabilité de l'estimation pouvant être mesurée par l'amplitude de l'intervalle de confiance à 95 % encadrant les moyennes obtenues (plus cet intervalle est réduit, plus les résultats sont

significatifs).

L'ensemble de ce traitement effectué par «SIMULPORT» peut être résumé par l'organigramme simplifié ci-après.

IV - LES RESULTATS ET LEUR PRESENTATION

1. LES DIFFERENTES SITUATION SIMULEES

Les simulations effectuées peuvent considérer plusieurs hypothèses :

- le maintien du port en l'état,
- la mise en service de nouvelles infrastructures,
- la mise en service d'installations bord à quai spécialisées,
- la modification de l'organisation du port.

En outre, différentes hypothèses de trafic (hautes, basses) peuvent être à la base de plusieurs simulations.

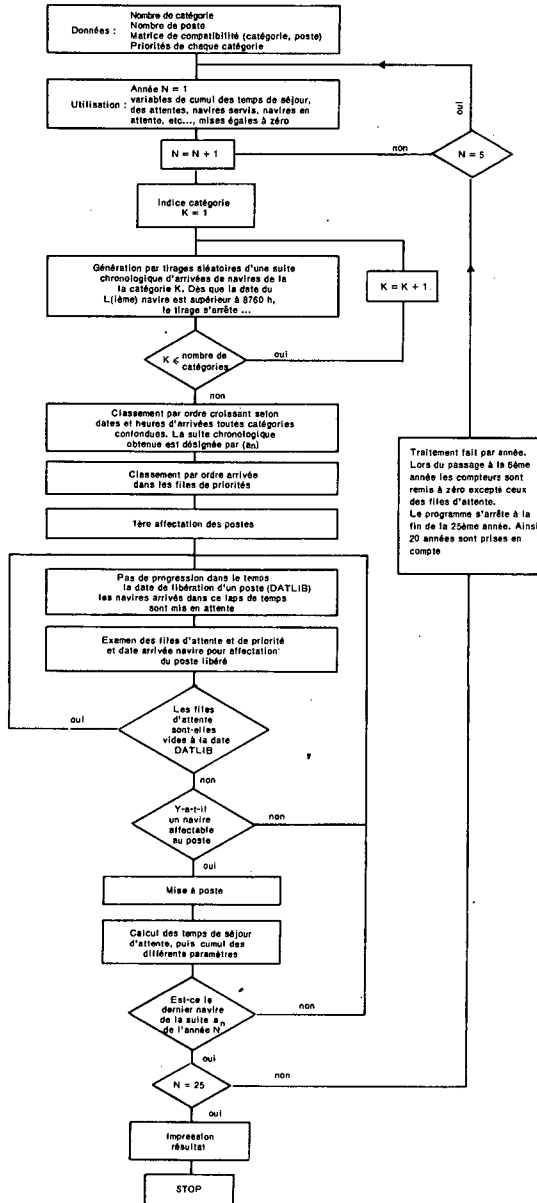
Les résultats obtenus après modification des paramètres (intervalle d'arrivée, temps de séjour, catégorie de navires ou quais supplémentaires, etc.), permettent, par comparaison avec ceux obtenus dans la solution de référence, d'étudier la rentabilité interne du projet et de prévoir l'impact sur l'ensemble de l'activité du port.

2. LES RESULTATS OBTENUS

Le programme «SIMULPORT» fournit donc, pour chacune des hypothèses de simulation retenues, une estimation de plusieurs indicateurs d'exploitation.

Il rappelle tout d'abord les données du modèle, à savoir :

- le nombre de catégories de navires,
- le nombre de postes à quai,



- la compatibilité entre les postes et les catégories,
- les règles de priorités relatives à chaque catégorie,
- les caractéristiques des lois d'arrivée,
- les caractéristiques des temps de service.

Pour les dernières itérations, il présente la chronique des conditions de traitement des navires au cours d'une année de trafic. Il donne ainsi :

- la numérotation des navires,
- leur catégorie,
- le jour et l'heure d'arrivée,
- le jour et l'heure de mise à poste,
- le poste affecté,
- le jour et l'heure de départ,
- la durée de service,
- la durée de l'attente pour quai,
- la durée du séjour au port.

Enfin, il présente pour chacune des

catégories de navires et chacun des postes à quai, les estimations des indicateurs d'exploitation suivants :

- le nombre de navires servis,
- le temps de séjour total des navires de la catégorie,
- le temps de séjour moyen,
- le nombre de navires ayant attendu,
- le total des attentes en heures,
- la durée moyenne des attentes ramenées à l'ensemble des navires servis,
- le taux d'occupation,
- le taux d'attente.

En outre, il est précisé pour chacune des catégories :

- le nombre de navires ayant attendu,
- le pourcentage de navires ayant attendu,
- la moyenne des temps d'attente ramenée aux seuls navires ayant attendu,
- l'écart type des temps d'attente,
- l'intervalle de confiance à 95 %.

C - APPLICATIONS ET ILLUSTRATIONS

I - ETUDE D'UNE SIMULATION DE FILE D'ATTENTE SIMPLE

Il s'agit d'une étude effectuée par le BCEOM pour le compte du Port Autonome de Nantes-St-Nazaire.

Cette étude portait sur un trafic assuré par quatre catégories de navires et reçu sur un poste à quai spécialisé. La question se posait de savoir si un second poste à quai pouvait économiquement se justifier.

Toutes les données utiles à la simulation furent fournies par les Autorités Portuaires.

Quatorze scénarios furent définis. Ils ont tous fait l'objet d'une simulation.

Les principaux résultats ont été reportés sur des tableaux (dont deux d'entre eux sont joints) et synthétisés sur un graphique (présenté ci-après).

Les résultats peuvent être comparés avec ceux obtenus en supposant a priori que les lois d'arrivées et de temps de séjour soient telles que le problème soit résolvable mathématiquement (hypothèse simplificatrice).

Ainsi, sur le graphique, ont été tracées les courbes pour 1 et 2 postes relatives aux cas théoriques suivants :

- courbe supérieure : les intervalles entre les arrivées et les temps de service sont distribués selon une loi exponentielle ;

PORT AUTONOME DE NANTES-SAINT-NAZAIRE

RESULTATS RECAPITULATIFS DE 2 SIMULATIONS SUR 14

ETUDE : TERMINAL DE MONTOIR

(Cas 224)

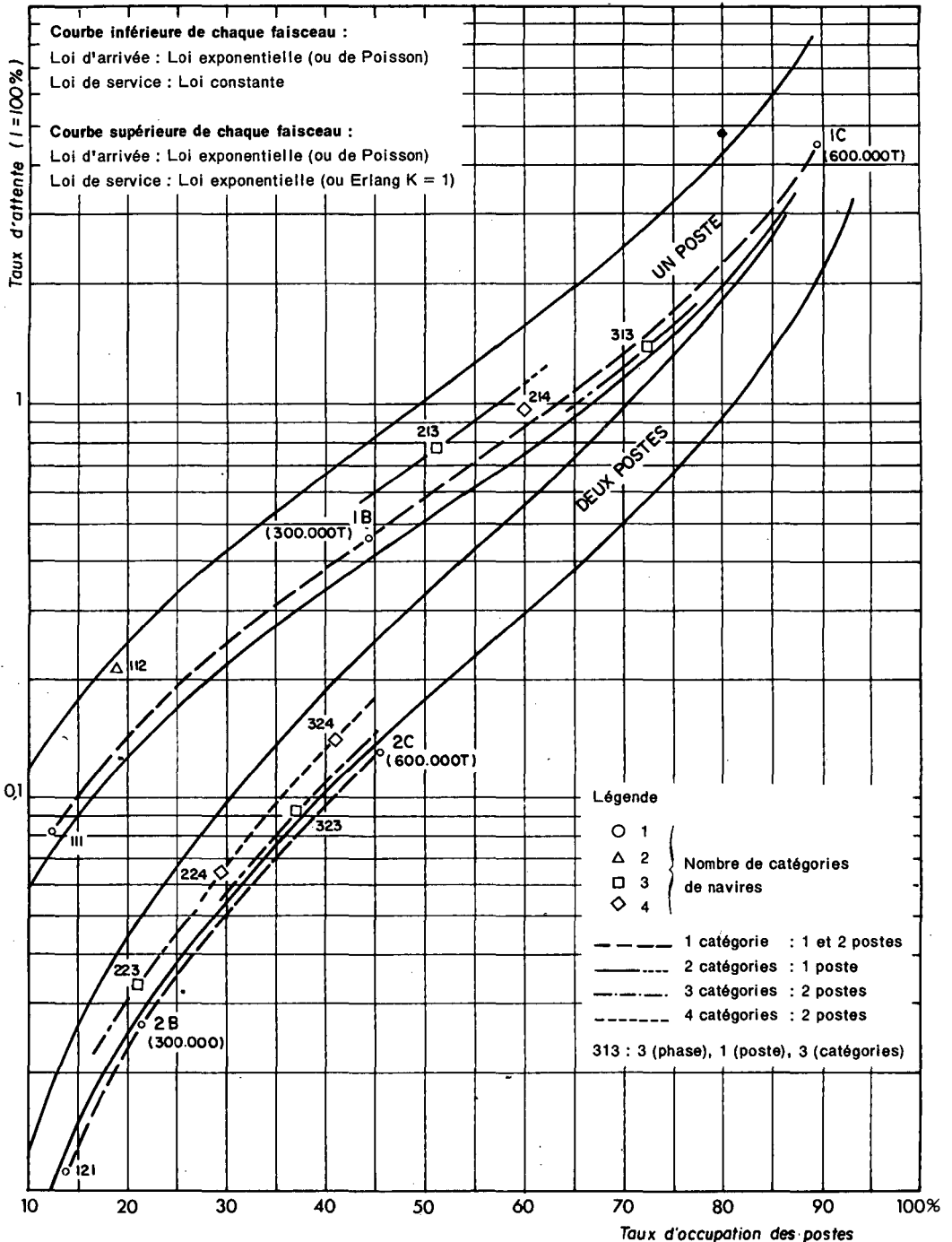
NAVIRES					
Phase 2 2 postes	Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 4	Catégorie 3	Toutes catégories confondues
Priorité	2	3	1	3	
<u>Lois d'arrivée</u>					
Intervalle moyen	73	1 460	168	438	
Type de loi	Erlang 1	Erlang 3	Erlang 1	Erlang 1	
Caractéristique	73	843	168	438	
<u>Lois de service</u>					
Intervalle moyen	23,2	129	12	48	
Type de loi	Erlang 2	uniforme	Erlang 2	uniforme	
Caractéristique	16,4	12	8,5	24	
. Proportion de navires ayant attendu (en %)	11,6	5,8	11,9	11,9	12
. Attente moyenne (en h)	2	1	1	2	2
. Taux occupation (en %)	16	4,45	3,5	5,9	29,88
. Taux d'attente (en %)	7	0,6	11,64	4,5	6,12
. Moyenne des attentes pour les navires ayant attendus (en h)	13,8	13,3	11,4	18,13	13,6

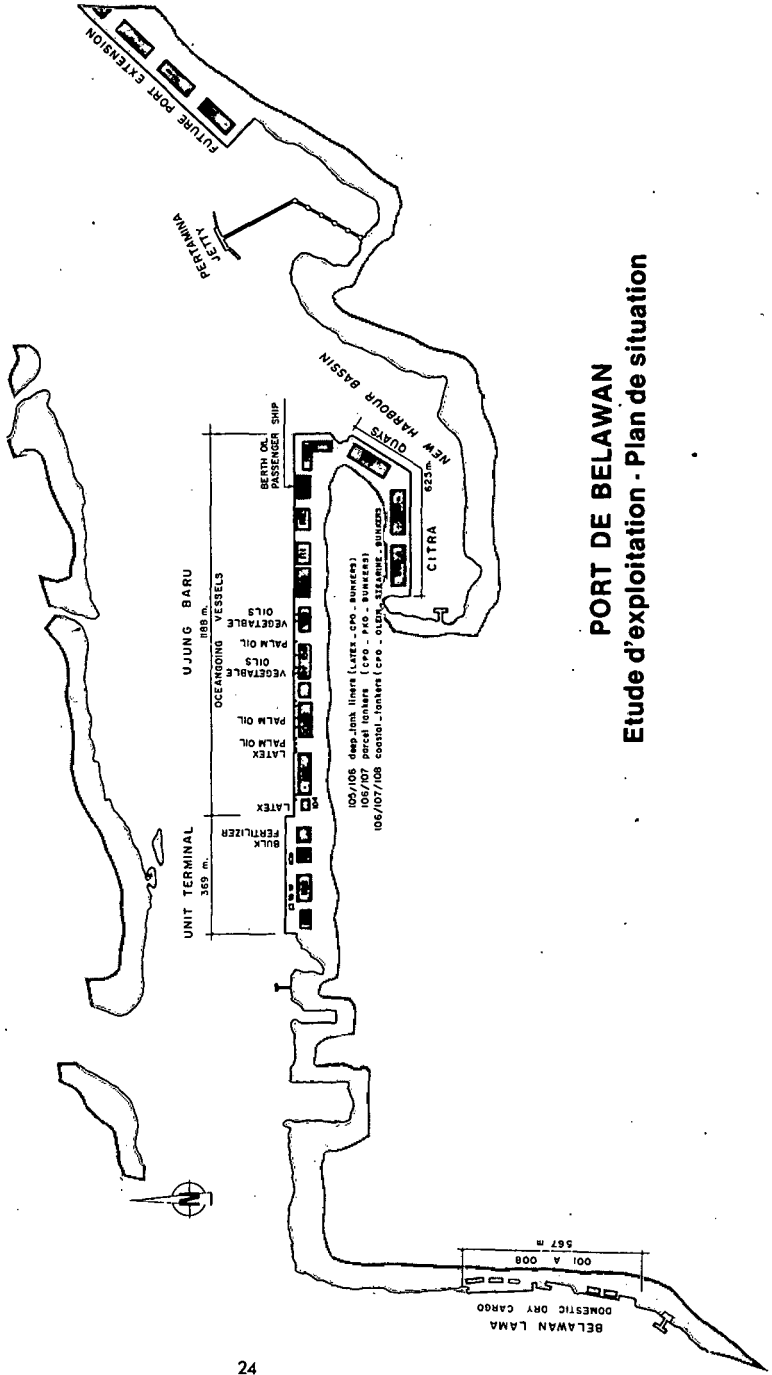
(Cas 324)

NAVIRES					
Phase 3 2 postes	Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 4	Catégorie 3	Toutes catégories confondues
Priorité	2	3	1	3	
<u>Lois d'arrivée</u>					
Intervalle moyen	58	626	84	292	
Type de loi	Erlang 1	Erlang 3	Erlang 1	Erlang 1	
Caractéristique	58	361	84	292	
<u>Lois de service</u>					
Intervalle moyen	20,7	129	8	48	
Type de loi	Erlang 2	uniforme	Erlang 2	uniforme	
Caractéristique	14,6	12	5,7	24	
. Proportion de navires ayant attendu, (en %)	20,7	14,96	23,5	22,4	21,6
. Attente moyenne (en h)	3	2	3	5	3
. Taux occupation (en %)	18,4	10,1	4,95	8,63	42
. Taux d'attente (en %)	16,95	1,62	37,5	10,87	14,4
. Moyenne des attentes pour les navires ayant attendus (en h)	16,6	13,9	12,5	23,3	15,8

PORT AUTONOME DE NANTES-SAINTE NAZAIRE

Résultats de 14 essais de simulation





PORT DE BELAWAN
Etude d'exploitation - Plan de situation

- courbe inférieure : les intervalles entre les arrivées sont distribués selon une loi exponentielle et les temps de service selon une loi constante.

Les résultats de la simulation s'inscrivent à l'intérieur ou au voisinage des courbes correspondant au nombre de postes à quai étudié. En effet, l'expérience montre, en général, que ces courbes représentent des limites extrêmes sous réserve que les lois des intervalles entre les arrivées soient toutes exponentielles et les postes tous compatibles avec les différentes catégories de navires.

Dans les autres cas, notamment loi des intervalles entre les arrivées différente de la loi exponentielle pour certaines catégories, compatibilité des postes trop restrictive, il convient de chercher à décomposer l'activité du port autant que faire se peut. Aucun rapprochement avec les cas théoriques ne pourra être fait. C'est l'objet du cas suivant (voir II).

II - ETUDE D'UNE SIMULATION DE FILE D'ATTENTE COMPLEXE

Le processus d'approche exposé ci-dessous est illustré par quelques résultats extraits de l'étude effectuée par le BCEOM sur le Port de Belawan (Indonésie).

1 - RECUEIL DES DONNEES DE BASE

Les documents de base consultés furent :

- . les «time-sheets»,
- . les «manifestes»,
- . le »livre de la capitainerie».

NOTA : La collecte des données est toujours très longue. Elle est parfois même rendue impossible par le fait que les documents sont ou trop dispersés ou perdus. Dans ce cas on procède par estimation calée sur les données existantes.

A Belawan, bien que cette tâche fût considérablement facilitée par l'existence de statistiques portuaires, il s'est avéré nécessaire de reprendre les documents de base puis de cocher, de corriger, voire de compléter les renseignements fournis.

L'échantillon sélectionné portait sur sept mois consécutifs et comprenait plus de 1 200 navires.

L'étude demandée avait pour objectif l'amélioration de l'exploitation du port. Il s'est avéré opportun de recueillir les données portant sur des paramètres significatifs suivants :

- a) les caractéristiques physiques des navires : longueur, tirant d'eau, port en lourd,
- b) les caractéristiques des mouvements : heures d'arrivée en rade, de mise à quai, de shifting, d'appareillage,
- c) les caractéristiques du trafic : le tonnage, la nature et le conditionnement des marchandises débarquées et embarquées,
- d) les caractéristiques relatives à l'exploitation : la durée de séjour à poste ; le temps de travail brut (exprimé en heures/équipes défini par la somme des heures travaillées pour chacune des équipes ayant opéré sur le navire) ; le temps de travail net (égal au précédent, diminué des attentes et des arrêts de travail divers).

2 - DEPOUILLEMENT ET TRAITEMENT DES DONNEES

Il s'effectue en utilisant le programme «STATPORT».

Le traitement des données met en évidence les disparités des zones d'activités spécialisées ou non. Les résultats partiels ou globaux obtenus sont à la base de l'étalonnage du modèle.

ECHANTILLON SÉLECTIONNÉ : 15 JANVIER AU 15 AOÛT 1982

ANNEEMENT NET DE MANUTENTION DES MARCHANDISES CHARGÉES OU DÉCHARGÉES
 (RAPPORT DU TONNAGE MANIPULÉ AU TEMPS RELEVEMENT TRAVAILLÉ) (TONNES/HEURE/ÉQUIPE)

CAT /QUAIS	110	109	108	107	106	105	104	103	102	101	100 A 104	*S/S TOTAL I*
COASTAL TANKERS	94.	143.	141.	132.	245.	196.	0.	0.	64.	0.	155.0	
DEEP TANK LINERS	21.	25.	43.	14.	9.	18.	13.	8.	0.	0.	19.2	
PARCEL TANKERS	197.	..	231.	211.	166.	0.	0.	1.	0.	0.	211.2	
BARGES LASH	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.0	
DOMES. DRY CARGO	0.	..	5.	22.	0.	0.	0.	0.	16.	9.	17.2	
PASSENGER SHIP	0.	1.	0.	..	0.	0.	0.	0.	10.	7.	9.7	
BULK FERTIL.SHIP	0.	0.	21.	10.	17.	12.	0.	0.	0.	12.	13.0	
CEMENT SHIP	22.	20.	22.	20.	0.	28.	31.	21.	27.	23.	25.2	
DOMES. BAG CARGO	16.	0.	5.	3.	0.	0.	0.	23.	0.	0.	13.1	
BAG CARGO LINERS	21.	17.	15.	14.	21.	21.	19.	12.	15.	26.	18.2	
DRY CARGO LINERS	32.	32.	15.	38.	17.	29.	15.	17.	25.	24.	22.3	
RUBBER EXP. SHIP	10.	11.	17.	..	39.	34.	14.	13.	14.	16.	19.1	
TOTAL	26.2	52.7	74.9	109.5	26.3	19.7	16.8	14.4	19.7	9.4	35.2	

CAT /QUAIS	*S/S TOTAL II*	201 A 203	202	203	*S/S TOTAL III*	101	102	103	*S/S TOTAL IV*	TOTAL
COASTAL TANKERS	45.7	29.0	23.8	71.5	57.5	47.6	47.5	52.2	50.2	97.1
DEEP TANK LINERS	11.1	0.0	13.2	12.4	12.6	22.2	24.5	25.3	23.9	18.6
PARCEL TANKERS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	211.2
BARGES LASH	0.0	26.3	0.0	0.0	26.3	0.0	0.0	0.0	0.0	26.3
DOMES. DRY CARGO	13.2	14.2	13.0	9.9	12.1	7.0	0.0	20.9	11.5	13.1
PASSENGER SHIP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.7
BULK FERTIL.SHIP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	151.4	151.4	29.1
CEMENT SHIP	33.3	0.0	21.9	0.0	21.9	32.1	0.0	30.8	32.5	27.2
DOMES. BAG CARGO	21.2	15.7	16.8	17.1	17.2	30.5	32.2	22.1	28.4	21.8
BAG CARGO LINERS	13.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.4
DRY CARGO LINERS	13.5	19.2	0.0	0.0	16.1	22.5	21.8	22.9	22.3	22.2
RUBBER EXP. SHIP	7.4	17.2	0.0	0.0	17.0	11.5	0.0	0.0	11.4	18.9
TOTAL	21.6	17.1	14.0	20.3	17.2	25.6	27.2	42.2	31.6	27.5

L'analyse de l'exploitation et de l'organisation du port, faite d'après l'échantillon représentatif, a donné lieu à une étude critique comparative.

La productivité des quais peut être analysée en effectuant, par exemple, une *ventilation par poste à quai et par catégorie complétée par un cumul par catégorie et par groupe de quai* :

- . du nombre de navires, de leur longueur moyenne, de leur tirant d'eau moyen, du port en lourd moyen,
- . du tonnage chargé, du tonnage déchargé et du tonnage total manipulé, en moyenne par navire puis au total par l'ensemble des navires,
- . du nombre moyen d'équipes ayant opéré sur les navires,
- . des temps de service, des temps d'attentes avant la mise à poste répertoriés par nature (attente de poste, de marchandises, de documents, pour entretien et réparations, diverses), des arrêts de travail moyens et totaux en cours de shift,
- . des rendements nets et bruts exprimés en tonnes/heure/équipe et en tonnes/shift/équipe et en tonnes/jour/navire, voire en tonnes/jour/poste à quai,
- . des taux d'occupation des postes, des taux d'occupation du linéaire de quai, des taux d'attentes (rapport des temps d'attente de quai au temps de service).

Application :

Dans le cadre de l'étude du Port de Belawan, 40 indicateurs mesurant l'activité du Port ont été mis en évidence. Deux d'entre eux sont proposés ici à titre d'exemple. Il s'agit :

- du rendement net/heure.équipe
- du taux d'attente (Wq/Ts).

Les résultats ont tous été présentés sous forme de tableau à double entrées avec :

- en ligne, les différentes catégories répertoriées (voir ci-dessous),
- en colonne, les numéros des postes à quai.

Catégorie 1 : Coastal tankers qui n'opèrent quasi-exclusivement que le trafic interinsulaire en «liquid cargo» (Palm oil et dérivés).

Catégorie 2 : Deep tank liners : ce sont des navires de lignes à «Deep tank» qui font à la fois du «liquid in bulk» et du «dry cargo». Ils assurent en grande partie le trafic de «molasses» et «latex» - liquid cargo à rendement peu élevé.

Catégorie 3 : Parcel tankers : ce sont des navires de ligne qui ne font que du Liquid cargo (CPO, OLEIN, etc...).

Catégorie 4 : Barges lash : bien que faisant à 97 % du chargement de caoutchouc (Rubber), ce mode de chargement est marginal eu égard aux navires polyvalents chargeant du caoutchouc. De plus, cette catégorie a un poste qui lui est réservé.

Catégorie 5 : Domestic Dry Cargo : ce sont des navires dont le conditionnement de la cargaison est à plus de 50 % constitué par des marchandises diverses non «unitisées». Il s'agit par exemple de fer à béton, débités, véhicules, cartons divers, etc. Cette catégorie n'inclut que les navires assurant le trafic interinsulaire.

Catégorie 6 : Passenger Ship : il s'agit du ferry-boat qui dessert Belawan une fois par semaine. Ce navire transporte des marchandises diverses (en plus des bagages des passagers).

Catégorie 7 : Bulk Fertilizer Ship : Il s'agit d'un trafic exclusivement interinsulaire. Le déchargement s'effectue soit à l'aide d'un

• PORT DE BELAWAN (INDONESIE) •

STATISTIQUES PORTUAIRES DE BELAWAN

ECHANTILLON SELECTIONNE : 15 JANVIER AU 15 AOUT 1982

TAUX D'ATTENTE (RAPPORT DU TEMPS D'ATTENTE POUR QUAI SUR TEMPS DE SEJOUR A QUAI) (%)

CAT /QUAIS	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	+S/S TOTAL I*
											105 A 114 *
COASTAL TANKERS	3.	34.	24.	77.	6.	0.	0.	3.	0.	0.	29.6
DEEP TANK LINERS	27.	61.	159.	51.	69.	12.	10.	20.	0.	0.	47.6
PARCEL TANKERS	0.	0.	240.	39.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	55.8
BARGES LASH	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.0
DOMES. DRY CARGO	0.	0.	0.	1.	0.	0.	0.	0.	6.	31.	11.7
PASSENGER SHIP	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.0
BULK FERTIL.SHIP	0.	0.	9.	3.	23.	13.	0.	0.	0.	9.	12.4
CEMENT SHIP	47.	49.	11.	29.	0.	12.	21.	26.	17.	55.	31.3
DOMES. BAG CARGO	2.	1.	0.	1.	0.	0.	0.	1540.	0.	0.	66.2
BAG CARGO LINERS	00.	31.	17.	0.	22.	28.	18.	22.	3.	19.	23.7
DRY CARGO LINERS	70.	67.	81.	51.	51.	38.	23.	19.	22.	231.	46.5
RUBBER EXP.SHIP	66.	38.	41.	0.	44.	62.	70.	8.	0.	0.	31.6
TOTAL	44.6	43.7	31.6	24.6	24.9	19.3	24.4	25.6	8.6	30.0	30.0

CAT /QUAIS	+S/S TOTAL II*	201	212	203	+S/S TOTAL III*	201 A 203	101	102	103	+S/S TOTAL IV*	TOTAL
	G01 A G08 *									101 A 103	I+II+III+IV
COASTAL TANKERS	7.1	9.5	0.0	29.0	24.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.2
DEEP TANK LINERS	9.5	0.0	0.0	18.0	9.7	0.0	3.0	6.4	1.0	0.0	24.4
PARCEL TANKERS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	55.8
BARGES LASH	0.0	1.3	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3
DOMES. DRY CARGO	15.6	15.6	19.3	19.4	18.2	0.0	2.0	4.2	1.2	0.0	16.7
PASSENGER SHIP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BULK FERTIL.SHIP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.5	33.5	0.0	15.9
CEMENT SHIP	59.2	0.0	41.6	0.0	41.6	71.4	0.0	29.0	30.4	0.0	36.7
DOMES. BAG CARGO	7.9	1.2	33.2	23.4	24.3	16.2	3.2	7.0	9.0	0.0	14.5
BAG CARGO LINERS	24.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.7
DRY CARGO LINERS	10.8	36.3	1.0	0.0	36.3	1.4	1.5	31.1	7.4	0.0	23.1
RUBBER EXP.SHIP	0.0	2.4	0.0	0.0	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.1
TOTAL	14.9	10.7	23.2	22.3	18.2	6.9	1.8	16.4	9.0	0.0	20.8

convoyeur (près du magasin 103), soit à la benne, soit après une mise en sac en cale.

Catégorie 8 : Cement Ship : ces navires transportent actuellement du ciment en sac. Avec l'implantation d'une usine de transformation, un poste à quai a été réalisé afin de réceptionner tous les navires de cette catégorie. Ce nouveau poste à quai devrait être opérationnel dans les mois à venir. Le ciment sera alors en vrac.

Catégorie 9 : Domestic bag cargo : Il s'agit du trafic interinsulaire de marchandises ensachées (on retrouve ici tous les navires dont la cargaison se composait de plus de 65 % de sacs).

Catégorie 10 : Bag Cargo Liners : il s'agit du trafic des navires de ligne dont la cargaison était composée de plus de 65 % de marchandises ensachées.

Catégorie 11 : Dry Cargo Liners : même définition que la catégorie 5 mais pour le trafic des navires de ligne.

Catégorie 12 : Rubber Export Ship : il s'agit des navires qui ne chargeaient quasi-exclusivement que du caoutchouc.

Catégorie 13 : Container Ship : il s'agit des full container Ships et semi-container Ships dont le chargement comprend 80 à 200 containers, avec une moyenne de 150 containers manipulés par escale.

Sur cet exemple, on peut apprécier la diversification possible dans le choix des catégories.

3 - IDENTIFICATION DES LOIS STATISTIQUES

Le programme STATPORT permet de rechercher par catégorie de navires les éléments caractéristiques des lois des intervalles entre les arrivées et des temps de séjour.

Pour chacune des catégories étudiées, les distributions des intervalles entre deux arrivées successives sont assimilables à celles définies par la loi exponentielle - à l'exception des «Passenger Ships» qui suivent une loi constante (1 arrivée chaque semaine à intervalle régulier).

En revanche, les distributions des temps de service sont très variables d'une catégorie à l'autre. Comme cela fut souligné dans le paragraphe «choix des catégories» ; cela correspond au fait que les temps de service sont liés au conditionnement des marchandises et/ou aux caractères spécifiques des navires (Passenger Ship, navires spécialisés ou non, etc.).

Quelques exemples sont présentés ci-après.

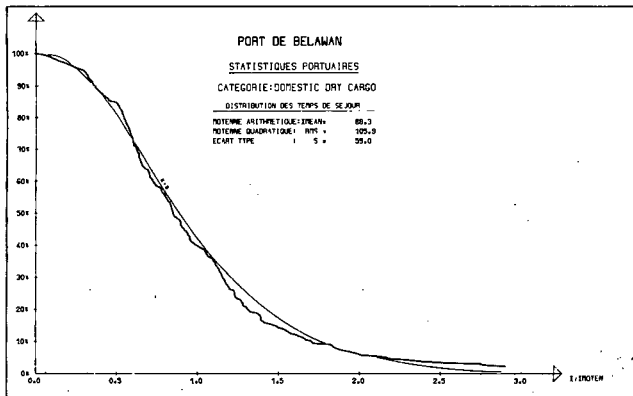
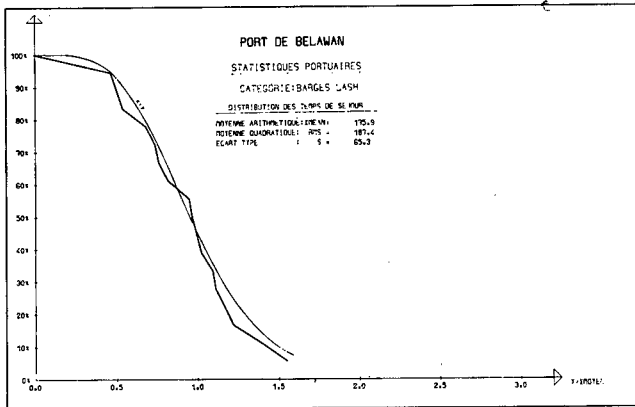
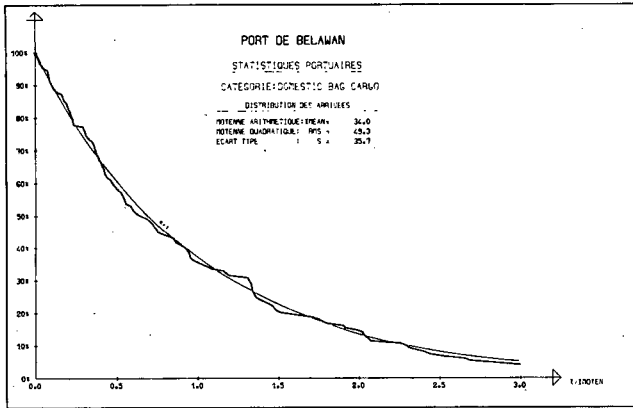
4 - SIMULATION

Cette simulation a été menée à partir des prévisions de trafic, établies lors de l'étude économique, pour les années 1982, 1985 et 1988.

Les tonnages estimés pour chaque type de marchandises ont été ventilés entre les 13 catégories de navires définis précédemment.

Le modèle de simulation, appelé STATBLW 1, a été alors étalonné à partir des valeurs déterminées par «STATPORT»

EXEMPLES D'IDENTIFICATION DES LOIS STATISTIQUES



notamment en ce qui concerne les taux d'occupation et les temps d'attente. En outre, l'identification des zones d'activité d'après STATPORT a servi à représenter la matrice des compatibilités entre postes à quai et catégories de navires.

L'activité du port de Belawan a ensuite été simulée pour les années 1985 et 1988 selon les différents scénarios de développement portuaire. Ceux-ci comprenaient notamment :

- la mise en service de 5 postes à quai supplémentaires en 1985,
- l'amélioration progressive des rendements bruts (étonnement faible par rapport aux rendements nets).

Cette simulation a permis de dresser des plans de réorganisation du port, de proposer des schémas d'amélioration de l'exploitation, et également d'envisager des extensions à court et moyen terme et d'étudier la rentabilité des investissements.

RESULTATS PARTIELS DE LA SIMULATION PORTUAIRE

* PORT DE BELAWAN (INDONESIE) *

RECAPITULATION DES RESULTATS

LE NOMBRE D'ITERATIONS EST LE 110

ENSEMBLE DU PORT : VENTILATION DES RESULTATS PAR CATEGORIE DE NAVIRES

SIMULATION DE LA PHASE 1

CATEGORIE	NOMBRE DE NAVIRES SERVIS	TS (HEURES)	MOYENNE (HEURES)	INTERVALLE (HEURES)	NOMBRE DE NAVIRES AYANT ATTENDU	TOTAL ATTENTES (HEURES)	MOYENNE ATTENTES (HEURES)	Taux d'OCCUPATION (%)	Taux LG/TS (%)
1	2327	189600	81.6	22.0	1870	45577	11.0	36.08	24.04
2	1341	95600	71.3	65.1	823	23642	18.0	24.28	27.80
3	333	12266	36.9	265.5	210	3794	11.0	4.59	31.45
4	344	61459	178.7	254.7	11	482	1.0	35.14	1.78
5	4776	414474	86.8	18.3	2166	75775	16.0	59.19	16.27
6	521	17457	33.5	163.1	0	0	0.0	5.97	7.00
7	262	57737	220.4	336.9	140	8312	32.0	21.97	14.40
8	1263	162440	128.7	69.4	635	28124	25.0	30.95	14.75
9	2642	194497	73.7	33.2	861	13811	5.0	37.34	7.09
10	1751	236714	135.2	48.9	1185	64486	36.0	67.41	27.33
11	7561	327415	43.3	11.6	2752	43604	6.0	46.72	13.38
12	856	69456	81.2	132.3	374	14250	17.0	39.66	21.51
TOTAL	25673	1821762	71.0	3.4	11036	326069	13.0	74.07	17.90

LE TAUX D'OCCUPATION DES QUAIS EST ICI LE TAUX MOYEN D'UTILISATION DES POSTES A QUAI COMPATIBLES AVEC LA CATEGORIE DESIGNEE

* PORT DE BELAWAN (INDONESIE) *

RECAPITULATION DES RESULTATS

ENSEMBLE DU PORT : VENTILATION DES RESULTATS PAR CATEGORIE DE NAVIRES

SIMULATION DE LA PHASE 2

CATEGORIE	NOMBRE DE NAVIRES SERVIS	TS (HEURES)	MOYENNE (HEURES)	INTERVALLE (HEURES)	NOMBRE DE NAVIRES AYANT ATTENDU	TOTAL ATTENTES (HEURES)	MOYENNE ATTENTES (HEURES)	Taux d'OCCUPATION (%)	Taux LG/TS (%)
1	3161	150325	47.6	27.7	997	21552	7.0	28.60	14.34
2	2251	144251	64.1	38.9	1311	41696	19.0	41.17	22.91
3	514	18757	37.2	173.8	285	4653	10.0	7.14	25.87
4	435	76236	175.5	201.4	39	2172	5.0	43.57	2.84
5	6992	696411	86.7	12.5	3997	157197	22.0	69.22	25.92
6	521	16439	31.6	163.1	0	0	0.0	5.96	7.00
7	416	89439	215.0	210.6	196	12977	31.0	34.19	14.45
8	1742	70119	40.5	59.3	1252	85621	49.0	80.50	121.42
9	2282	168417	73.8	38.4	839	14101	6.0	32.64	8.31
10	1279	158767	124.3	72.5	612	16945	14.0	45.31	10.67
11	7532	325611	43.3	11.6	2434	46674	6.0	46.50	14.32
12	1171	97172	83.0	74.8	663	33254	28.0	55.46	24.23
13	594	10404	17.5	96.0	375	6672	7.0	2.39	63.63
TOTAL	25120	1927576	66.2	3.0	13600	443625	15.0	75.88	23.01

LE TAUX D'OCCUPATION DES QUAIS EST ICI LE TAUX MOYEN D'UTILISATION DES POSTES A QUAI COMPATIBLES AVEC LA CATEGORIE DESIGNEE

• PORT DE BELAWAN (INDONESIE) •

RECAPITULATION DES RESULTATS

ENSEMBLE DU PORT : VENTILATION DES RESULTATS PAR CATEGORIE DE NAVIRES

SIMULATION DE LA PHASE 3

CATEGORIE	! NOMBRE DE NAVIRES SERVIS	! TS ! TEMPS.SERV ! (HEURES)	! MOYENNE ! TEMPS.SERV ! (HEURES)	! INTERVALLE ! C*ARRIVES ! (HEURES)	! NOMBRE DE NAVIRES ! AYANT ATTENDU	! TOTAL ! ATTENTES ! (HEURES)	! MOYENNE ! ATTENTES ! (HEURES)	! TAUX ! D'OCCUPATION ! (%)	! TAUX ! LG/TS ! (%)	
1	3121	149277	47.9	28.1	1570	26962	9	24.36	16.05	
2	2684	170583	63.7	32.6	1579	33528	11	32.53	17.85	
3	792	29745	37.6	110.6	487	7361	9	8.49	24.75	
4	511	88132	172.3	171.4	244	9576	19	50.25	10.88	
5	9597	786410	86.8	9.7	3093	66522	7	42.75	2.46	
6	521	10128	15.9	168.1	0	3	0	5.93	0.02	
7	422	89159	211.8	207.6	284	7646	18	25.50	8.56	
8	2169	67252	32.2	41.4	1374	66524	32	76.77	94.92	
9	3270	240773	73.6	26.8	1125	24127	7	13.74	10.02	
10	1501	201596	134.0	58.4	707	11792	8	38.26	5.86	
11	11342	491168	42.3	7.7	6081	94590	8	46.72	15.26	
12	1126	92235	81.9	77.8	825	24356	22	35.10	26.41	
13	1299	15150	11.7	67.4	127	1774	1	8.65	7.09	
TOTAL	13	37735	2431968	64.4	2.3	17496	371059	10	81.65	15.26

LE TAUX D'OCCUPATION DES QUAIS EST ICI LE TAUX MOYEN D'UTILISATION DES POSTES A QUAI COMPATIBLES AVEC LA CATEGORIE DESIGNEE

BIBLIOGRAPHIE

ETUDES DE REFERENCES RECENTES DU BCEOM

Côte d'Ivoire

- Port d'Abidjan
- Port de San Pedro.

Sénégal

- Terminal minéralier de Dakar

Indonésie

- Port de Belawan

France

- Port autonome de Nantes

Madagascar

- Ports malgaches

OUVRAGES ET RAPPORT

- Morse «Files d'attente et d'entretien» - Solution Methods for waiting line problems (Port of New-York).
- Les phénomènes d'attente par A. Kaufmann et R. Cruon (Dunod - 1961).
- Les files d'attentes : théorie et applications par A.M. Lee (Dunod - 1970).
- Etude des extensions des quais à divers du Port d'Abidjan par J. Pautrel (1962).

RESUME

Exploitation portuaire Une approche par simulation

La réduction des temps d'attente des navires constitue l'un des objectifs essentiels de la plupart des projets portuaires tels la réalisation de nouvelles infrastructures, l'acquisition d'équipements supplémentaires, ou simplement la réorganisation des conditions d'exploitation.

L'évaluation de la réduction des temps d'attente liée à un projet donné peut s'effectuer à partir de modèles mathématiques fondés sur la théorie des files d'attente lorsque les conditions suivantes sont réalisées : postes à quai banalisés, répartition des intervalles séparant deux arrivées successives de navires selon une loi exponentielle, répartition des temps de séjour à quai selon soit une loi exponentielle, soit une loi constante.

Si de telles conditions ne peuvent être réunies (même de manière approximative) il est nécessaire de recourir à une simulation de l'activité du port (pour un groupe de quais ou pour l'ensemble du port), : arrivées des navires, affectation aux quais compte tenu des règles de priorité et des règles de compatibilités entre navires (d'une catégorie donnée) et postes à quai ; temps de séjour à quai.

Après avoir rappelé les principes généraux de la théorie des files d'attente, l'auteur de cet article présente le programme de simulation (SIMULPORT) élaboré par le service Ports et Voies Navigables du BCEOM.

Le programme fournit pour chacun des projets envisagés une évaluation des principaux indicateurs d'exploitation tels par exemple, le taux d'occupation des quais (ventilés par poste à quai) et pour chacune des catégories de navires étudiées, le taux d'attente (rapport du temps d'attente au temps de séjour à quai) ; la durée moyenne des attentes pour l'ensemble des navires servis d'une part, et pour les seuls navires ayant attendu d'autre part ; le ratio du nombre de navires ayant attendu au nombre de navires servis.

A titre d'illustration les résultats les plus significatifs de deux études récentes sont présentés. La première est une étude d'une simulation de file d'attente simple (1 à 2 postes à quai), la seconde est une étude de simulation de file d'attente complexe (28 à 34 postes à quai).

SUMMARY

Port operation : a simulative approach

The reduction of ship queueing time constitutes one of the basic objectives of most port projects such as : construction of new infrastructures, procurement of additional equipment, or simply the reorganization of operating methods.

The evaluation of the reduction of project-related ship queueing time may be effected from a mathematical model based on the queueing theory when the following conditions are present : berths for general cargo, data on breakdown of intervals between two successive ship arrivals in accordance with an exponential law, and on breakdown of time at berth according to either an exponential law or a constant law.

If these conditions are not available (even approximately), it is necessary to resort to a simulation of port activities (for a set of berths or for the entire port) : ship arrivals, berth assignments according to priority rules and compatibility rules between ships (of a given category) and berths ; time at berth.

After recalling the general principles of the queueing theory, the author of the article presents the simulation program (SIMULPORT) developed by the Ports and Navigable Waterways Division of BCEOM.

For each project under consideration, the program provides an evaluation of the major indicators of operations such as, for example, the berth occupancy ratio (broken down per berth, and for each category of ships under study), the queueing ratio (relation of queueing time to time at berth) ; average queueing duration for all ships served, on the one hand, and only for ships that queued, on the other, ratio of the number of ships that queued to the number of ships served.

For illustrative purposes, the most significant findings of two recent studies are presented. The first one is a simulation study of simple queueing (1 to 2 berths), and the second is a simulation study of complex queueing (28 to 34 berths).

RESUMEN

La simulación de operaciones portuarias

La reducción de los tiempos de espera de los buques es uno de los principales objetivos perseguidos por la gran mayoría de los proyectos portuarios tales como la realización de nuevas infraestructuras, la adquisición de equipos complementarios, o simplemente la reorganización de las condiciones de operación.

Puede evaluarse la reducción de los tiempos de espera relacionada con tal o cual proyecto, utilizando un modelo matemático diseñado en base a la teoría de las filas de espera cuando las siguientes condiciones están reunidas : atraques abiertos a todas las campañas, distribución de los intervalos que separan dos llegadas sucesivas de buques según una ley exponencial, distribución de los tiempos de estancia en los atraques aplicando ya sea una ley exponencial, o bien una ley constante.

Cuando estas condiciones no pueden conseguirse aún de manera aproximada, conviene utilizar una simulación de la actividad del puerto (cubriendo algunos atraques o la totalidad del puerto) : llegadas de buques, asignación a los atraques de conformidad con las reglas de prioridad y de compatibilidad entre los buques de una categoría determinada y los atraques, tiempos de estancia en los atraques.

Después de recordar los grandes principios de la teoría de las filas de espera, el autor del artículo presenta el programa de simulación SIMULPORT concebido por la División de Puertos y Vías Navegables del BCEOM.

Para cada uno de los proyectos considerados, este programa proporciona una evaluación de los principales indicadores entre los cuales constan, por ejemplo, la tasa de ocupación de los muelles (con un desglose por atraque y tipo de buque), la tasa de espera (obtenida dividiendo el tiempo de estancia en el atraque por el tiempo de espera), la duración promedio de las esperas para el conjunto de los buques servidos, por una parte y para aquellos que tuvieron que esperar por otra ; por último, la razón del número de buques que tuvieron que esperar al número de buques servidos.

En concepto de ilustración, se dan los resultados más significativos de dos estudios recientes. El primero es un estudio de simulación de filas de espera sencillo (1 ó 2 atraques) y el segundo es un estudio de simulación de filas de espera complejo (28 a 34 atraques).