

# Modélisation en aide à la décision pour une gestion optimale de stockage dans les terminaux à conteneurs

**HALIM Kaoutar<sup>a</sup>, DKHIL Hamdi<sup>b</sup>, MCHICH Rachid<sup>a</sup>, YASSINE Adnan<sup>b,c</sup>**

<sup>a</sup> National School of Management, Abdelmalek Essaadi University, Tangier 90000, Morocco

<sup>b</sup> Normandie Univ. UNIHAVRE, LMAH, FR-CNRS-3335, ISCN. Le Havre 76600, France

<sup>c</sup> Normandie Université, UNIHAVRE, ISEL. Le Havre 76600, France

**Résumé.** Dans cet article, nous nous intéressons à déterminer les paramètres et les contraintes relatives à l'allocation des emplacements pour le stockage des conteneurs au sein du Port Tanger-Med, s'appuyant sur un modèle de stockage générique. La conception de ce modèle se base sur une étude pointue de la littérature et diverses observations des opérations de stockage dans différents ports maritimes.

Nous avons alors effectué une étude qualitative, sous forme d'étude de cas portant sur le terminal EUROGATE Tanger, un des terminaux à conteneurs du Port Tanger-Med. Le but étant de finir par traité un cas réel en tenant compte des caractéristiques et des spécificités de ce port et d'aider à la prise de décision dans le dit terminal.

**Mots clés.** *Stockage de Conteneurs, Modélisation Mathématique, Optimisation, Processus de Stockage, Aide à la Décision.*

## I. Introduction

Le transport joue un rôle crucial dans la chaîne logistique globale. Il apparaît comme une partie du système logistique qui assure la liaison entre les différents nœuds des chaînes de transport. En général, il existe plusieurs modes de transport, entre autres : Aérien, Maritime, Ferroviaire, Terrestre, Multimodal... Selon les origines et les destinations, plusieurs contraintes entrent dans le choix d'un ou plusieurs modes de transport, à savoir : des contraintes liées à la nature ou le type de produits, au parcours à réaliser, à la sécurité et aux différents coûts. D'autres critères sont pris en compte tels que la géographie et le climat qui favorisent l'utilisation d'un mode de transport par rapport à un autre.

Sur le plan économique, le transport maritime est considéré comme le mode de transport le plus utilisé au niveau mondial. Selon des statistiques de l'OMI, 90% des échanges mondiaux de marchandises passent par voie maritime<sup>1</sup>.

A cet égard, le développement des infrastructures portuaires et l'amélioration des opérations dans les ports maritimes semblent nécessaires afin de faire face à l'évolution des échanges internationaux, énergétiques et environnementaux du secteur du transport maritime.

Dans le contexte actuel, les ports maritimes sont considérés comme « des poumons de l'économie mondiale », notamment après l'apparition et le développement de la conteneurisation. L'usage de cette technique a permis de faciliter le transfert des marchandises d'un mode de transport à l'autre. Parmi ces points de transfert, les terminaux portuaires à conteneurs qui constituent un maillon très important au sein du réseau de transport international.

En termes de gestion, les terminaux à conteneurs font l'objet de l'attention de la communauté scientifique et des professionnels du domaine portuaire, qui ont essayé de proposer des actions d'amélioration et d'exploitation des espaces de stockage afin d'améliorer la performance des terminaux portuaires et de faire face à l'augmentation du trafic de conteneurs dans les ports.

Notre problématique est axée sur l'amélioration du processus de stockage, et cela dans un contexte évolutif et dynamique. Elle s'oriente vers la proposition d'une stratégie de stockage de conteneurs dans les hubs maritimes. Nous étudions en particulier le cas du Hub de Transbordement Tanger-Med. Notre objectif est de proposer une stratégie optimale pour les opérations de stockage dans la cour. Cette stratégie tient compte des contraintes opérationnelles de stockage et de passage portuaire. Selon l'architecture, les équipements utilisés et l'opérateur du terminal, le mode opératoire et ses contraintes changent d'un terminal à l'autre. Pour cette raison, nous étudions dans un premier lieu une problématique généralisée avec des contraintes communément utilisées dans l'ensemble des terminaux à conteneurs. Dans un second lieu, nous intéressons à

---

<sup>1</sup> Selon des statistiques de l'OMI (Organisation Maritime Internationale), publié sur "Euractiv 2015"

l'adaptation de l'étude générale au cas du terminal EUROGATE Tanger, un des terminaux à conteneurs du Port Tanger-Med.

De nombreux travaux de recherche scientifiques ont recouru aux outils de gestion tels que les méthodes d'optimisation combinatoire qui sont appliquées dans des situations complexes de prise de décision.

Notre approche se base sur la modélisation mathématique et les méthodes de recherche opérationnelle guidée par une étude qualitative. C'est dans cette perspective que nous proposons un modèle mathématique générique pour le problème traité et un modèle adapté pour notre cas d'étude. L'adaptation du modèle générique à notre étude de cas est basée sur une approche qualitative. Dans cet article, nous allons nous focaliser sur la phase de conception du modèle générique et les résultats de l'étude qualitative. A ce niveau, les questions qui se posent sont les suivantes :

- Comment peut-on modéliser le processus organisationnel dans l'espace de stockage au sein des terminaux portuaires à conteneurs ?
- Quels sont les critères qui organisent le processus de stockage de conteneurs au sein de notre cas d'étude ?

Afin de répondre à notre problématique, nous présenterons, dans la section 1, un cadre théorique de la planification de stockage au sein des terminaux portuaires à conteneurs. Nous proposerons notre modèle de stockage, ses hypothèses générales et opérationnelles dans la section 2. Puis, nous présenterons la méthodologie de l'exploration qualitative dans la section 3. Enfin, nous présenterons, dans une dernière section, les résultats de l'étude qualitative.

## **II. Planification De Stockage Au Sein Des Terminaux Á Conteneurs**

En général, le pilotage de la chaîne des terminaux portuaires à conteneurs de l'amont à l'aval a pour objectif de prendre des décisions pour l'intérêt de tous les acteurs concernés (autorités, concessionnaires, armateurs et compagnies maritimes de lignes régulières) [1]. A cet égard, les décisions prises sont classées en quatre niveaux classiques : niveau stratégique, niveau tactique, niveau opérationnel et niveau en temps réel.

D'un point de vue empirique, le département chargé de la planification des opérations, au sein d'un terminal à conteneurs, a des fonctions primordiales dans l'optimisation de la performance et des services rendus aux clients. La planification vise à déterminer les ressources nécessaires à la réalisation des tâches dans les zones du terminal. Elle met l'accent sur les ressources clés en considérant les exigences et les instructions des clients, afin de planifier la position de chaque conteneur à bord du navire, les opérations de chargements et de déchargements, le transport entre les quais et les piles de stockage et la stratégie d'entreposage de conteneurs dans l'enceinte de la cour. Rappelons que dans cet article, nous nous focalisons surtout sur la planification des mouvements des conteneurs dans la cour de stockage.

Dans le cas général, la cour est une zone stratégique qui permet de stocker les conteneurs en attente de les transférer. La gestion optimale du fonctionnement de la zone de stockage et la bonne utilisation des ressources disponibles ont des conséquences directes sur la productivité globale du terminal. Ainsi, la planification de la cour comporte deux principaux problèmes de décision : l'ordonnancement des équipements dans la cour et l'empilement de conteneurs.

A. Ordonnancement des équipements de manutention des conteneurs dans la cour

Plusieurs véhicules sont utilisés pour fluidifier les opérations de manutention dans la cour ainsi qu'assurer le transfert optimal des conteneurs, à savoir : grues de cour, chariots cavaliers (cavaliers gerbeurs), camions, véhicules automatisés, véhicules de levage automatique, etc. Le choix de ces engins dépend du besoin et de type d'organisation de la cour de stockage.

Dans ce cadre, plusieurs recherches ont été menées, dans les terminaux portuaires à conteneurs, afin de :

- déterminer le nombre des équipements affectés par bloc [2] ;
- déterminer le nombre de mouvements des grues [3] ;
- minimiser la distance parcourue des cavaliers en mission [4] ;

- déterminer l'emplacement de stockage pour chaque conteneur déchargé et assurer le routage des cavaliers afin de minimiser le temps global pour servir un ensemble de navires [5] ;
- minimiser le temps d'accostage d'un navire au terminal [6] ;
- minimiser le temps de chargement et de déchargement des conteneurs d'un navire en utilisant un nombre fixe de cavaliers [7] ;
- minimiser le temps des grues de cour nécessaires à la réalisation des travaux de transfert et d'affectation des conteneurs aux blocs de stockage [8] ;

B. Empilement/dépilement de conteneurs dans la cour

Dans l'enceinte de la cour, le choix des emplacements de stockage doit s'effectuer de manière à minimiser les mouvements improductifs provoqués par un mauvais empilement de conteneurs. Or, ceci a un impact considérable sur les durées d'escales des navires au terminal qui affecte directement le niveau de service offert.

Les espaces de stockage sont généralement limités par les contraintes de capacité [9]. Il est alors primordial d'exploiter de manière rationnelle et optimale les ressources disponibles et de bien gérer l'allocation des conteneurs dans les blocs. Dès lors, plusieurs études basées sur des modèles d'optimisation ont été réalisées afin d'aider à la prise de décision ([10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], etc.). L'ensemble des modèles de stockage développés ont été efficacement résolus par des algorithmes adaptés.

### III. Approches Proposées Pour Le Modèle Générique

En positionnant notre recherche dans la théorie d'aide à la décision, nous élaborons un modèle de stockage générique. Ce modèle prend en compte un certain nombre d'hypothèses, de données, de contraintes et d'objectifs à optimiser.

A. Les hypothèses du modèle

Dans le modèle générique que nous allons présenter ci-dessous, nous considérons un certain nombre d'hypothèses et, qui sont à l'ordre de cinq :

- hypothèse liée à la configuration des blocs ;
- hypothèses liées à l'empilement des conteneurs dans la zone de stockage ;

- hypothèses liées aux dimensions des conteneurs ;
- hypothèse sur le gerbage de conteneurs ;
- hypothèse sur la durée de séjour de conteneurs.

*B. Modèle mathématique générique*

En littérature, les auteurs ont considéré la démarche de planification de stockage de conteneurs comme un problème de décision difficile à résoudre. Ce problème est classé dans la liste des problèmes difficiles. Il est désigné par l'acronyme « PSC : Problème de Stockage de Conteneurs ».

Le modèle générique que nous proposerons, dans ce papier, prend en considérations les caractéristiques principales du problème y compris les hypothèses citées dans la section précédente. Il est basée sur des contraintes opérationnelles qui sont étroitement liées au processus de stockage. De même, ce modèle présente trois objectifs à optimiser définis ci-après. Les paramètres utilisés dans notre modèle générique sont décrits dans le tableau 1.

P	L'ensemble de piles
B	L'ensemble de baies
C	L'ensemble de conteneurs
$C_1$	L'ensemble de conteneurs à transférer en priorité vers le prochain transporteur
$C_2$	L'ensemble de conteneurs à séjourner au terminal
$C(i)$	L'ensemble de conteneurs ayant le même armateur ou/et la même date de livraison
$W(p)$	capacité de la pile
$d_i$	La date de livraison du conteneur $i$ à son usager
$e_i$	L'entrée du conteneur $i$
$s_i$	La sortie du conteneur $i$
$L_i$	Longueur du conteneur $i$
$O_i$	Ordre de traitement du conteneur $i$ par le véhicule de transport interne
type ( $i$ )	Le type du conteneur $i$ (dangereux, inflammable, fragile, liquide, etc.)
$D_{A,B}$	La distance de sécurité minimale entre deux conteneurs de types A et B
$d_p$	La date de livraison du dernier conteneur empilé dans la pile $p$
$d_{b_1,b_2}$	la distance entre les baies $b_1$ et $b_2$ , si $b_1 \neq b_2$ s, si $b_1 = b_2$
$D_{e(i),p}$	La distance entre l'entrée du conteneur $i$ et la pile $p$
$\Delta_{p,s(i)}$	La distance entre l'emplacement de stockage $p$ et la sortie du conteneur $i$
G	Un nombre suffisamment grand

**Tableau 1. Données du modèle**

Notre modèle est conçu en se basant sur les trois variables de décision suivants.

$$P_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si les deux conteneurs } i \text{ et } j \text{ sont empilés dans la même pile et en plus le} \\ & \text{conteneur } j \text{ est stocké au dessus du conteneur } i \text{ directement ou indirectement.} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Notons que la variable  $P_{i,j}$  est définie uniquement si la longueur du conteneur  $j$  a une dimension inférieure ou égale à la longueur du conteneur  $i$ .

$$X_{i,p} = \begin{cases} 1 & \text{si la pile } p \text{ est affectée au conteneur } i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Notons que la variable  $X_{i,p}$  est définie uniquement si la longueur du conteneur  $j$  a une dimension inférieure ou égale à la longueur du dernier conteneur déposé dans la pile  $p$ .

$$F_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{si les conteneurs } i \text{ et } j \text{ n'appartiennent pas au même prochain transporteur} \\ d_{b_1,b_2} & \text{si } i \text{ et } j \text{ appartiennent au même prochain transporteur, } i \text{ est stocké dans la} \\ & \text{baie } b_1 \text{ et } j \text{ dans la baie } b_2 \end{cases}$$

Présentation du modèle mathématique

$$\text{Minimiser} = \begin{pmatrix} \sum_{i \in C} \sum_{\substack{j \in C \setminus \{i\} \\ L_j \leq L_i \\ d_j > d_i}} P_{i,j} + \sum_{i \in C} \sum_{\substack{L_p \leq L_i \\ d_j > d_p}} X_{i,p} \\ \sum_{i \in C} \sum_{j \in C(i)} F_{i,j} \\ \sum_{i \in C_2} \sum_{\substack{p \in P \\ L_p \leq L_i}} D_{e,p} X_{i,p} + \sum_{i \in C_1} \sum_{\substack{p \in P \\ L_p \leq L_i}} \Delta_{p,s_i} X_{i,p} \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \text{(A.1)} \\ \text{(A.2)} \\ \text{(A.3)} \end{matrix}$$

### Contrainte logique

$$\forall i \in C: \sum_{\substack{p \in P \\ L_p \leq L_i}} X_{i,p} = 1 \quad (1)$$

### Contrainte de capacité

$$\forall p \in P: \sum_{\substack{i \in C \\ L_p \leq L_i}} X_{i,p} \leq w_p \quad (2)$$

### Contraintes de succession

$$\forall (i,j,k) \in C^3, i \neq j \neq k, L_k \leq L_j \leq L_i, O_k > O_j > O_i : P_{i,k} \geq P_{i,j} + P_{j,k} - 1 \quad (3)$$

$$\forall (i,j) \in C^2, i \neq j, O_j > O_i, \forall p \in P, L_j \leq L_i \leq L_p : P_{i,j} \geq 1 - G(2 - X_{i,p} - X_{j,p}) \quad (4)$$

### Contrainte de coûts

$$\forall i \in C, j \in C(i), \forall (b_1, b_2) \in B^2: F_{i,j} \geq f_{i,j,b_1,b_2} - G(2 - \sum_{p \in b_1, L_i \leq L_p} X_{i,p} - \sum_{l \in b_2, L_j \leq L_p} X_{j,l}) \quad (5)$$

### Contraintes précisant la nature des variables

$$\forall i \in C, \forall p \in P, L_i \leq L_p: X_{i,p} \in \{0,1\} \quad (6)$$

$$\forall i \in C, \forall j \in C, O_j > O_i, L_j \leq L_i: P_{i,j} \in \{0,1\} \quad (7)$$

$$\forall i \in C, \forall j \in C: F_{i,j} \in \mathbb{R}^+ \quad (8)$$

La fonction objectif du modèle mathématique que nous proposons comprend trois composantes. La composante (A.1) de la fonction objectif sert à minimiser le nombre de reniements, autrement dit, elle minimise le nombre de mouvements improductifs provoqués lors des déplacements inutiles des conteneurs dans l'enceinte de la cour ainsi que lors de leurs transferts vers leurs moyens de transport. La composante (A.2) assure la minimisation des distances entre les emplacements de stockage des conteneurs appartenant au même prochain transporteur. La composante (A.3) permet de minimiser les distances à parcourir par les équipements de transport internes, c'est-à-dire, la distance entre l'endroit de déchargement et l'endroit de stockage et la distance entre les emplacements de stockage et les sorties des conteneurs.

La contrainte logique (1) assure que chaque conteneur  $i$  est affecté à une et une seule pile  $p$ . La contrainte de capacité (2) assure que le nombre de conteneurs affecté dans chaque pile est inférieur ou égal à sa capacité initiale. Les contraintes de succession (3) et (4) permettent de déterminer l'ordre de stockage des conteneurs empilés dans la même pile. En effet, la contrainte (3) garantit que si le conteneur  $j$  est stocké sur le conteneur  $i$  et le conteneur  $k$  est stocké sur  $j$ , alors  $k$  est stocké sur  $i$ , autrement dit, c'est une contrainte qui assure la transitivité de la relation de succession exprimée par la variable  $P_{i,j}$ . La contrainte (4) précise que les conteneurs  $i$  et  $j$  sont stockés l'un sur l'autre, si et seulement si ils sont stockés dans la même pile. La contrainte (5) permet de borner inférieurement le coût de stockage élémentaire  $F_{i,j}$  par la valeur fixe  $f_{i,j,b_1,b_2}$ , ce qui permet de borner inférieurement le coût de stockage  $F_{i,j}$  (seulement pour les conteneurs  $i$  et  $j$ ). Les contraintes (6), (7) et (8) précisent que nos variables de décisions sont des variables binaires.



#### IV. Méthodologie De L'exploration Qualitative

Dans notre cas, l'analyse de la littérature et l'observation n'étant pas apparues suffisantes pour proposer un modèle qui tient compte des contraintes réelles et qui reflète bien un cas précis : les spécificités du système portuaire considéré et ses caractéristiques. Toutefois, il faut adapter le modèle selon les besoins des décideurs en tenant compte des spécificités de chaque cas. Dans cet article, nous avons opté pour une étude de cas portant sur le terminal EUROGATE Tanger.

##### A. Echantillon d'étude

Dans ce cadre, six entretiens individuels ont été organisés auprès des cibles suivantes :

- Deux entretiens ont été organisés auprès des chefs des services du département chargé de la planification des opérations au sein du terminal, à savoir : le planificateur de navires (en anglais : Ship Planner) et le planificateur du yard.
- Un entretien a été réalisé auprès du responsable de la chambre du contrôle.
- Un entretien a été réalisé auprès du directeur des opérations adjoint.
- Un entretien a été réalisé auprès du responsable QHSSE.
- Un entretien a été organisé auprès du responsable des études statistiques et de reporting.

En ce qui concerne le critère de sélection des interrogés, nous avons tenu compte de l'ancienneté et du poste occupé dans l'entreprise pour retrouver des personnes bien placées qui connaissent bien l'activité et l'organisation du terminal.

##### B. Collecte de données

Notre étude exploratoire a notamment pour objectif d'ajuster et d'adapter les paramètres et les contraintes du modèle générique à notre cas d'étude. En effet, la méthode de l'entretien semi-directif nous a semblé être la méthode la plus appropriée. Notre choix a été motivé par le fait que cette méthode repose sur une expression libre de l'interrogé, ce qui nous permet de concilier l'exploration des thèmes proposés et l'émergence des nouveaux concepts qui peuvent se révéler utile pour une modélisation plus réaliste en termes de paramètres, de contraintes, d'objectifs à optimiser et de priorité entre ces objectifs.

Selon Thiétart [24], l'entretien semi-directif, à questions ouvertes, permet au répondant de s'exprimer spontanément. Chose qui contribue positivement à la richesse et à la qualité des informations recueillies.

Cependant, nous cherchons, par les différents thèmes du guide, à comprendre le fonctionnement du terminal et à faire une étude de la stratégie de gestion des conteneurs, notamment ceux en transbordement. Nous cherchons également à identifier les critères de stockage propres du terminal et à déterminer les mesures de sécurité adoptées par l'Organisation Maritime Internationale, ainsi qu'à expliquer les contraintes et les paramètres qui déterminent la hauteur de stockage des conteneurs de différents types et à évoquer la question de la répartition des équipements de manutention dans deux zones du terminal : zone à quai et zone de cour. Enfin, nous nous intéressons à avoir l'avis de chaque interviewé sur la priorité entre les objectifs considérés dans notre modèle de départ (voir la section précédente).

Ainsi, ces questions sont reformulées de manière à en faciliter la compréhension. Avant son utilisation, nous avons présenté une première version du guide à trois enseignants-chercheurs pour accueillir leurs commentaires. Les conseils donnés nous ont permis d'apporter un certain nombre de modifications qui ont été grandement favorables à l'amélioration de cette version et donc à l'élaboration d'une deuxième version. La version améliorée a été soumise à un pré-test afin de repérer quelques erreurs et de les corriger.

Afin d'éviter toute ambiguïté de compréhension et de répétition en termes des questions, nous avons modifié notre guide une deuxième fois.

### C. La conduite des entretiens

Les entretiens individuels ont eu lieu au sein de l'entreprise EUROGATE Tanger S.A. pendant deux mois de stage : Janvier et février 2017. Les personnes ont été interrogées en face-à-face. La durée de chaque entretien était d'une heure environ auprès de la cible. Tous les entretiens ont été enregistrés sur un support audio, après l'accord des personnes interrogées.

#### D. Processus de l'analyse des données

A l'issue des entretiens, et en respectant le critère de saturation<sup>2</sup> [25], nous avons procédé à la retranscription et à la saisie des données d'entretiens avant de passer à l'analyse. La méthode utilisée est celle de l'analyse de contenu<sup>3</sup> dans le traitement « manuel » de données recueillies.

Les résultats de ces analyses permettent d'adapter les paramètres et contraintes du modèle préétabli à notre cas d'étude.

### V. Résultats Et Discussion

#### A. Caractéristiques de la stratégie de stockage

La cour de stockage du terminal est divisée en trois principales zones : Import/export, conteneurs vides transbordés et conteneurs pleins transbordés *« le parc du terminal est réparti par activité. L'activité de transbordement représente 96% de l'activité globale. Cette activité est répartie aussi par ligne maritime, par service, par activité et par statut de conteneurs (vides ou pleins) »* (A.Z, Responsable des Etudes Statistiques et de Reporting).

Pour la stratégie de stockage du terminal, les personnes interrogées déclarent que leur entreprise adopte une stratégie globale qui touche les trois activités : importation, exportation et transbordement. De même, cette stratégie consiste à répartir les blocs par catégorie *« réservé un tel bloc pour une telle activité »* (A.L, Planificateur du yard), et par statut des conteneurs. Dans le cas des conteneurs pleins transbordés, la stratégie adoptée par l'entreprise peut être changée pour des contraintes particulières *« [...] ex. changement de berth window et de taux d'occupation du YARD qui dépend du nombre de conteneurs à séjourner »* (A.E, Planificateur des navires).

En outre, le planificateur du YARD déclare que *« [...] on applique une stratégie nommée housekeeping, pour les trois activités, afin de réorganiser la cour de stockage. L'intérêt de cette action est de corriger les erreurs d'inattention (ou d'autres exprès) faites au moment de planification pour se retrouver à une situation normale en respectant les critères de stockage, dans le but de mieux servir les clients »*. Avec cette technique, l'énergie liée à la manutention peut être augmenté, ce qui nuit à l'environnement.

---

<sup>2</sup>On parle de ce critère lorsqu'il n'est plus possible de trouver de données nouvelles aux concepts recherchés.

<sup>3</sup>Un ensemble de méthodes d'analyse qui ont été développées en vue d'opérationnaliser et de systématiser le contenu des énoncés afin d'aboutir à un schéma d'analyse.

En revenant un peu en arrière, les responsables confirment que la première stratégie appliquée, au sein du terminal, a été axée sur les opérateurs majoritaires (ex. CMA-CGM). Cependant, le nombre d'alliance entre les opérateurs maritimes a conduit les décideurs à changer cette stratégie *« vu le nombre d'alliance entre les opérateurs maritimes [...], on a élaboré une nouvelle stratégie qui prend en compte le port de déchargement et le service chargeant »* (déclare A.E, cadre planificateur).

Toutefois, l'analyse de la stratégie de la cour nous a permis d'évaluer et de mesurer l'efficacité du plan de stockage existant, notamment pour la catégorie de conteneurs considérés dans cette étude.

Cette évaluation porte sur l'efficacité opérationnelle, les normes de sûreté, de sécurité et sur l'impact de la consommation d'énergie sur l'environnement (aspect environnemental).

#### *B. L'analyse des ressources*

Au sein des terminaux à conteneurs, les engins de manutention sont extrêmement chers et constituent des ressources limitées. Pour les interrogés, le terminal dispose de 21 portiques de stockage sur pneus, 6 chariots élévateurs, 1 chariot manipulateur des conteneurs vides, 8 portiques à quai et 43 trucks.

Pour eux, une répartition de ces engins est nécessaire afin d'améliorer la productivité *« la répartition des équipements dans la cour se fait selon la technique de 'GANG'. Cette dernière regroupe théoriquement : un portique – deux RTG – trois trucks (et demi). Pratiquement, on associe chaque portique à trois RTG et à quatre ou à cinq trucks, afin d'améliorer la productivité »* (N.C, le directeur des opérations adjoint) *« Dans certains cas, les services des opérations proposent à la compagnie maritime le nombre des grues nécessaires pour le chargement et le déchargement des navires, le nombre des trucks et des RTG qui y sont associés et, c'est à la compagnie maritime d'accepter ou de changer ce nombre »* (responsable de la chambre du contrôle).

#### *C. Distances et nombre de mouvements des conteneurs dans la cour*

Trois critères sont importants dans la détermination d'une bonne stratégie de stockage : le nombre de mouvements des conteneurs, les distances parcourues et la distance entre deux conteneurs apparentant au même usager.

- Nombre optimal de mouvements des conteneurs dans la cour *«la planification des mouvements des conteneurs dans le terminal en général, dans la cour en particulier, est notre principal souci. Bien évidemment, ces mouvements ont un caractère improductif, sauf dans certains cas où on les considère comme des mouvements de réorganisation de la cour »* (A.L, Planificateur du yard) *«Afin d'éviter les mouvements parasites, on cherche à stocker les conteneurs de telle sorte à optimiser à la fois l'entrée et la sortie de chacun [...]»* (N.C, le directeur des opérations adjoint). Toutefois, *« du point de vue de la planification, les conteneurs de chaque ligne doivent être posés ensemble dans le YARD. Ensuite, nous ajoutons des spécificités relatives aux types de conteneurs, aux services, aux ports de déchargement et aux poids de conteneurs »* (A.L, Cadre planificateur).
- Distance entre l'endroit de déchargement et l'emplacement de stockage et inversement *« Certes, la considération de la distance parcourue, au moment de stockage, permet d'optimiser les flux des camions en interne du terminal »* (N.C, le directeur des opérations adjoint). Toutefois, il semble que la considération de ce critère diffère selon le temps de transit des conteneurs (dwell time) *« pour les conteneurs pleins, on préfère les décharger dans les blocs les proches du quai, notamment s'ils ont un temps de séjours réduits par rapport aux conteneurs vides. Au sein de notre terminal, le temps moyen de transit des conteneurs pleins est de 3 jours et plus que 15 jours pour les conteneurs vides. Donc, on choisit les blocs (proche du quai ou loin du quai) en fonction du temps de transit des conteneurs et du navire chargeant »* (A.L, Cadre planificateur).
- Distance prévue entre les conteneurs appartenant au même armateur. Pour les personnes interrogées, la minimisation de la distance entre les conteneurs appartenant au même armateur est l'une des critères à prendre en compte dans l'opération de stockage. Ce critère nécessite de connaître des informations sur la distribution des conteneurs sur un navire *« par exemple, on peut décharger les conteneurs, ayant la même destination et le même poids, dans des zones plus proches du quai, si on sait qu'ils vont être transférés dans la même baie du navire »* déclare un cadre planificateur.

D. Autres paramètres/variables déterminant la stratégie de stockage

- **Catégorie des conteneurs** : nous distinguons trois catégories de conteneurs : import, export et transbordement. Dans cette étude, notre choix s'est porté sur la catégorie des conteneurs transitant *« [...] L'activité de transbordement représente 96% de l'activité*

*globale. [...]» (A.Z, Responsable des Etudes Statistiques et de Reporting) « Comme vous savez, notre activité principale c'est le transbordement (à hauteur de 96% – 97%), la grande partie de notre parc de stockage est dédiée aux conteneurs qui sont en transit... » (N.C, Directeur des Opérations Adjoint) « la zone réservée aux conteneurs pleins transbordés se caractérise par une complexité qui se traduit, au moment de stockage, par différentes variables et contraintes » (A.E, Cadre Planificateur)*

Ce choix s'explique par le fait que l'activité principale du port en général, et du terminal en particulier, est le transbordement des conteneurs. De plus, il paraît que les planificateurs accordent plus d'importance à cette catégorie.

- **Type des conteneurs** : Dans le cadre de cette étude, nous considérons uniquement les conteneurs normaux. Pour les conteneurs réfrigérés et dangereux, ils sont équipés d'une unité de réfrigération connectée à l'alimentation dans une zone distincte « [...] les conteneurs spéciaux (tels que les réfrigérés, les flat-track et les dangereux) disposent des zones spécifiques qui leur sont destinés en raison d'alimentation et de sécurité » (A.E, le responsable QHSSE).

On distingue généralement neuf classes de marchandises dangereuses qui sont présentées dans le tableau 2.

Code	Classes
1	Substances explosives (risque d'incendie, de projection...)
2	Gaz (inflammables, toxiques ou non)
3	Matières liquides inflammables
4	Solides inflammables (sujette à l'inflammation spontanée, dégage des gaz au contact de l'eau, ...)
5	Substances comburantes
6	Matières toxiques
7	Substances radioactives
8	Substances corrosives
9	Autres marchandises dangereuses (déchets toxiques, dangereux pour les personnes...)

Sources : Organisation Maritime Internationale

**Tableau 2. Les différentes classes de marchandises dangereuses**

*Remarque:* On choisit la distance de sécurité entre deux conteneurs contenant des produits dangereux, selon les classes et le degré de danger de ces produits. Dans ce cadre, nous distinguons deux distances : distance minimale (de 0 à 6 mètres) et distance maximale (de 6 à 12 mètres).

- **Taille et dimension des conteneurs :** Nous considérons ici les conteneurs les plus souvent utilisés au terminal : conteneurs 20 pieds et conteneurs 40 pieds « [...] *au moment de déchargement d'un ensemble de conteneurs, on vise à préparer le YARD pour le chargement de ces conteneurs, en considérant [...] les tailles des conteneurs [...]* » (A.L, Cadre Planificateur)
- **La compatibilité :** En matière de stockage, il est essentiel de tenir compte de la compatibilité des conteneurs, notamment pour les conteneurs de type dangereux « *lors de l'organisation des zones de stockage, nous appliquons les instructions de l'organisation maritime internationale pour les conteneurs contenant des produits dangereux (IMO). Cela veut dire que nous laissons des distances de sécurité entre les conteneurs selon les classes intitulées par le code IMDG* » (A.L, Planificateur du YARD) « *Au sein de notre terminal, nous déchargeons les IMO dans des zones spécifiques (dans les rangées intérieures des blocs) en respectant les instructions de la réglementation internationale, afin de les éloigner le plus possible de la ligne de trafic des camions, voire de les rapprocher de plus des bouches d'incendies* » (A.E, le Responsable QHSSE).

Ainsi, « *Pour des raisons de sécurité, on opte pour un gerbage en pyramide : pour une baie de 7 rangées, de A jusqu'à G, par exemple, la hauteur de stockage est de 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 5 ; 5 ; 4* » (N.C, le directeur des opérations adjoint).

- **Berth window :** Le choix d'une bonne stratégie de stockage nécessite des critères fixes. Pour certains interrogés, les critères qui affectent la position des conteneurs dans la cour du terminal ne cessent de changer pour suivre les clients maritimes « *au niveau de notre entreprise, ces critères n'arrêtent pas à changer, à chaque fois on a de nouveaux paramètres, de nouvelles restructurations qui sont faites par les lignes maritimes... ce qui nous obligent à effectuer des mises à jour et des changements de stratégies.* » (affirme le directeur des opérations adjoint). Dans ce cadre, la profondeur de l'eau influence fortement et indirectement le choix de la stratégie de stockage « [...] *les services des grands navires (navires-mères) sont stockés plus proche du quai. Parce qu'à ce niveau où vient le*

paramètre de la profondeur de l'eau qui représente aussi un souci lors de stockage. En effet, le draft est plus profond dans une partie que dans une autre partie du quai. Cela justifie le lieu d'accostage des navires-mères et le placement des conteneurs pleins dans la zone A du terminal » (A. E, Planificateur des navires).

- **Poids de conteneurs** : il s'agit de considérer les classes de poids au moment de stockage des conteneurs dans la cour « *La planification des opérations portuaires (y compris celle de stockage et celle des escales), est un processus complexe [...]. Certains difficultés peuvent apparaître lors de la mise en œuvre du processus de planification, tels que : le poids des conteneurs [...]* » (A.E, planificateur des navires) « *[...], les conteneurs de chaque ligne doivent être posés ensemble dans le YARD. Ensuite, nous ajoutons des spécificités relatives [...] aux poids de conteneurs* » « *[...] au moment de déchargement d'un ensemble de conteneurs, on vise à préparer le YARD pour le chargement de ces conteneurs, en considérant, [...] les poids des conteneurs [...]* » (A.L, Cadre planificateur). Cela veut dire que lors d'empilement d'un ensemble de conteneurs, les planificateurs posent le conteneur moins lourd dans le YARD en dessous du plus lourd pour faciliter le chargement sur le navire qui se fait à l'envers. Le tableau 1 présente la répartition des conteneurs pleins par classe de poids.

Classe de poids	Tonnes
1	0 – 12,4
2	12,5 – 18,4
3	18,5 – 25
4	25,1 – 35
5	≥ 35,1

**Tableau 3. Répartition des conteneurs pleins par classe de poids (fourni par les responsables du terminal)**

- **Raisonnement par chargement** : Lors des entretiens, les personnes interrogées ont fait apparaître un nouvel élément qui nous semble particulièrement intéressante « *Pour nous, on raisonne par chargement. Cela veut dire qu'au moment de déchargement d'un ensemble de conteneurs, on vise à préparer le YARD pour le chargement de ces conteneurs, en considérant, d'une part, les statuts, les catégories, les tailles et les poids des conteneurs et,*



*d'autre part, la destination, c'est-à-dire le prochain port de déchargement dans le cas de transbordement » (A.L, Cadre planificateur du Yard).*

Ce raisonnement permet de minimiser le nombre de gerbages entre les conteneurs de mêmes caractéristiques. *« Si on prend en considération les restrictions de sécurité, la capacité d'une baie maximale est de 25 à 26 conteneurs. Cela veut dire que le chargement de 26 conteneurs (de mêmes caractéristiques) dans un navire exige une répartition de ces conteneurs 'dans deux zones' afin de minimiser, d'une part le nombre de gerbages entre les conteneurs à charger, et de l'autre, le temps d'accostage des navires au port (si on a plus que 26 conteneurs, dans ce cas, on va faire une distribution moitié-moitié entre les baies)»* (le responsable de la chambre du contrôle).

- **port de déchargement** : pour les planificateurs, la prochaine destination des conteneurs séjournés est l'un des principaux paramètres à prendre en compte au moment de stockage. En effet, lors de déchargement d'un ensemble de conteneurs qui sont en transit, les décideurs ne prennent en considération, par exemple, que la comptabilité et le poids des conteneurs à séjourner. Cependant, au moment de chargement, le client décide par une liste de chargements qui spécifie le port de destination.

#### E. Choix et priorité des objectifs

Comme pour toute opération, il est nécessaire de considérer un certain nombre d'objectifs, lors de stockage des conteneurs transitant. Nous parlons de :

- l'optimisation du nombre de mouvements improductifs
- l'optimisation de la distance moyenne entre l'endroit de déchargement et l'emplacement de stockage ainsi qu'entre ce dernier et les sorties des conteneurs
- l'optimisation de la distance moyenne prévue entre les conteneurs appartenant au même armateur

Ces objectifs sont tous en relation, ils méritent d'être classés selon le scénario le plus favorable à la gestion de stockage et, qui reflète le cas du terminal.

Partant des discours des cadres chargés de la planification du YARD, il a été constaté que le choix des scénarios repose en partie sur la position du navire déchargeant, l'opération considérée et donc sur l'état du trafic au terminal.

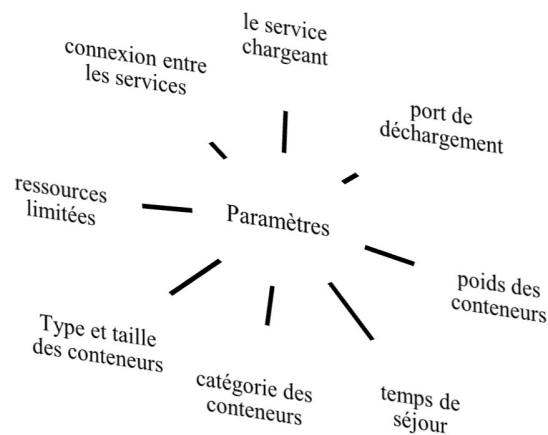
Pour définir une priorité entre les objectifs, il faut tenir compte de l'opération : chargement ou déchargement. « *Au moment de déchargement, les décideurs ne prennent, par exemple, en considération que la compatibilité et le poids, mais au moment de chargement, c'est le client qui décide par une liste de chargement* » déclare le planificateur de navires.

Pour les managers du YARD, le premier objectif recherché est l'optimisation de la distance moyenne entre l'endroit de déchargement et l'emplacement de stockage ainsi qu'entre ce dernier et les sorties des conteneurs, car c'est ce qui peut faire perdre le maximum de temps « *en tant que société de services, on sait très bien qu'un client insatisfait coûte cher pour nous, donc si on arrive à gagner une seule minute, au moment de chargement/déchargement, on va gagner vraiment sur l'ensemble [...]* » (déclare un chargé de la planification des opérations). Après l'optimisation de cette distance, vient l'optimisation des mouvements non productifs. Pour eux, ce deuxième objectif, ne concerne pas directement le client, aussi, il ne représente qu'une partie de l'objectif total. Le dernier objectif est la minimisation de la distance entre les conteneurs appartenant au même armateur. Ce dernier objectif intervient au moment de chargement.

## **VI. Conclusion**

Cet article a pour objectif d'étudier les contraintes et les paramètres déterminant la stratégie de stockage dans un cas précis. Nous avons tout d'abord présenté notre problématique qui porte sur la gestion de stockage des conteneurs dans les terminaux maritimes, les hypothèses et le modèle de stockage générique issu de l'analyse de la littérature, des études opérationnelles existantes sur le sujet de recherche et de diverses observations. En partant des objectifs assignés à notre travail de recherche et qui sont axés sur l'amélioration du processus de stockage des conteneurs transit au sein du port Tanger-Med, nous avons retenu, dans ce travail, une démarche méthodologique qui s'appuie sur une approche qualitative exploratoire, sous forme d'étude de cas. Cette approche a été effectuée selon des séances d'entretiens semi-directifs auprès de la population cible, et qui est composée des différents chefs et responsables de départements ayant une certaine ancienneté et une bonne connaissance de l'organisation et du fonctionnement du terminal. Toutefois, il faut noter que les questions du guide sont construites par nos soins et que chacune d'elles apporte un élément de réponse en relation avec notre problématique de recherche.

Les résultats de l'étude qualitative confirment l'importance des objectifs choisis, des variables considérées ainsi que tous les paramètres décrits dans le modèle générique présentés dans la section 3. Il a également fait apparaître de nouveaux paramètres que nous devons les considérer afin de garantir une bonne représentation du problème en matière de spécificités de cas d'étude. Le schéma, ci-dessous, illustre l'ensemble de ces paramètres.



**Figure 1. Schéma récapitulatif des variables/contraintes impactant la stratégie de stockage de conteneurs pleins au sein du terminal**

Par ailleurs, l'étude menée dans ce papier présente un triple intérêt, tant théorique, méthodologique qu'empirique. Sur le plan théorique, nous avons présenté un modèle de stockage générique qui tient compte de l'ensemble des paramètres et variables affectant directement le problème traité. Sur le plan méthodologique, il n'existe pas, à notre connaissance, des études basées sur l'approche qualitative proposée dans ce papier pour le traitement du PSC. En effet, le guide pratique élaboré présente pour les chercheurs scientifiques, opérationnels et pour les professionnels du domaine une analyse approfondie du problème dans un cas réel.

Enfin, sur le plan empirique, les contraintes et les paramètres d'allocations étudiés dans ce papier, constituent des critères qui permettent d'assurer une bonne gestion de la cour de stockage, des conteneurs transitant dans les terminaux à conteneurs en général, et dans le terminal EUROAGATE Tanger en particulier.

Néanmoins, nous n'avons pas pris en compte le facteur humain dans cette étude malgré notre conviction qu'il joue un rôle important au succès d'une stratégie de stockage et dans le

développement de n'importe quelle entreprise en général. La modélisation de ce facteur n'est pas facile en termes des formulations mathématiques.

Avant de tester le fonctionnement du modèle, nous devons contextualiser les outils mathématiques développés avant à notre cas d'étude. Ce procédé permet de proposer une modélisation plus réaliste en termes de contraintes et de paramètres.

La prochaine étape consistera à intégrer des nouveaux paramètres dans notre modèle. En considérant le scénario choisi par les chefs des services concernés, nous allons tester le fonctionnement du nouveau modèle, via une approche d'optimisation combinatoire où nous faisons appel aux méthodes et outils de types quantitatifs.

## REFERENCES



- [1] Pan S. "Contribution à la définition et à l'évaluation de la mutualisation de chaînes logistiques pour réduire les émissions de CO2 du transport: application au cas de la grande distribution". Thèse de doctorat de l'École nationale supérieure des mines de Paris, 2010.
- [2] Chuqian Zhang, Yat wah Wan, Jiying Liu & Richard J. Linn. "Dynamic crane deployment in container storage yards". *Transportation Research Part B : Methodological*, vol. 36, N° 6, pp. 537-555, 2002.
- [3] Raymond K. Cheung, Chung-Lun Li & Wuqin Lin. "Interblock crane deployment in container terminals". *Transportation Science*, vol. 36, N° 1, pp. 79-93, 2002.
- [4] Kap Hwan Kim & Hong Bae Kim. "Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals". *International Journal of Production Economics*, vol. 59, N° 1-3, pp. 415-423, 1999.
- [5] Ebru K. Bish. "A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal". *European Journal of Operational Research*, vol. 144, N° 1, pp. 83-107, 2003.
- [6] Ebru K. Bish, Frank Y. Chen, Yin Thin Leong, Barry L. "Nelson, Jonathan Wing Cheong Ng & David Simchi-Levi. Dispatching vehicles in a mega container terminal". *OR Spectrum*, vol. 27, pp. 491-506, 2005.
- [7] Li Chung-Lun & Vairaktarakis George. "Loading and unloading operations in container terminals". *IIE Transactions*, vol. 36, N° 4, pp. 287-297, 2004.
- [8] L. H. Lee, E. P. Chew, K. C. Tan, et Y. Han. "An optimization model for storage yard management in transshipment hub" *OR Spectrum*, vol. 28, pp. 539-561, 2006.
- [9] Benghalia Abderaouf. "Modélisation et évaluation de la performance des terminaux portuaires". Thèse de doctorat, Université du havre, 2015.
- [10] Luca Maria Gambardella, Andrea E. Rizzoli & Marco Zaffalon. "Simulation and Planning of an Intermodal Container Terminal". *Simulation*, vol. 71, N° 2, pp. 107-116, 1998.

- [11] M. B. Duinkerken, J. J. M. Evers, et J. A. Ottjes. "A Simulation Model For Integrating Quay Transport And Stacking Policies On Automated Container Terminals". Proceedings of the 15 th European Simulation Multiconference, Prague, 2001.
- [12] Bish, E.K., Leong, T.Y., Li, C.L., Ng, J.W.C. and Simchi-Levi, D. "Analysis of a new vehicle scheduling and location problem". Naval Research Logistics, vol. 48, pp. 363-385, 2001.
- [13] Peter Preston & Erhan Kozan. "An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals". Computers and Operations Research, vol. 28, N° 10, pp. 983-995, 2001.
- [14] Chuqian Zhang, Jiyin Liu, Yat wah Wan, Katta G Murty & Richard J Linn. "Storage space allocation in container terminals". Transportation Research Part B: Methodological, vol. 37, N° 10, pp. 883-903, 2003.
- [15] NDIAYE. F. "Algorithmes d'optimisation pour la résolution du problème de stockage de conteneurs dans un terminal portuaire". Thèse de doctorat, Université du havre, 2015.
- [16] E Nishimura, A Imai, G K. Janssens, S Papadimitriou. "Container Storage and Transshipment Marine Terminals". Transportation Research Part E 45, pp. 771-786, 2009.
- [17] D Sculli & CF Hui. "Three dimensional stacking of containers". Omega, vol. 16, N° 6, pp. 585-594, 1988.
- [18] P. Chen, Z. Fu, A. Lim & B. Rodrigues. "Port Yard Optimization Problem". IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 1, N° 1, pp. 26-37, 2004.
- [19] Y. Ma et K. H. Kim. "A comparative Analysis : Various storage rules in container yards and their performances". Industrial engineering & Management systems, vol. 11, pp. 276-287, 2012.
- [20] R Moussi, NF Ndiaye, A Yassine. "Hybrid Genetic Simulated Annealing Algorithm (HGSA) to Solve Storage Container Problem in Port". Intelligent Information and Database Systems Lecture Notes in Computer Science (Springer), Vol. 7197/2012, pp. 301-310, 2012.
- [21] NF Ndiaye, A Yassine, I Diarrassouba. "A Hybrid Ant Colony and Branch-and-Cut Algorithm to Solve the Container Stacking Problem at Seaport Terminal". International Journal on Advances in Software 7 (3/4), pp. 567-580, 2014.
- [22] H Dkhil, A Yassine, H. J Chabchoub. "Multi-Objective Optimization of the Integrated problem of Location Assignment and Straddle Carrier Scheduling in Maritime Container Terminal at Import". Journal of the Operational Research Society (Springer), pp. 1-23, 2017.
- [23] P. Chen, Z. Fu, A. Lim & B. Rodrigues. "Port Yard Optimization Problem". IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 1, no. 1, pages 26–37, 2004.
- [24] Thiétart R.A. (coord.). "Méthodes de recherche en management". 2ème édition, paris, Dunod, 2003.
- [25] Glaser B.G., Strauss A.L. "The discovery of grounded theory: strategies for qualitative research". Aldine Publishing Company, New York, 1967.


## ANNEXE

### Guide D'entretien Pour Les Chefs De Services Et De Départements Au Sein De la Société EUROGATE Tanger




#### I- Caractéristiques de la stratégie de stockage

-  *Quelle est votre stratégie de gestion des zones de stockage ?*
-  *Avez-vous mis en place un plan de stockage pour les conteneurs transitant ?*




#### II- L'analyse des ressources

-  *En parlant des ressources du terminal. A votre avis, comment peut-on assurer une répartition optimale de vos ressources, notamment pour les conteneurs en transbordement ?*


#### III- Distances et nombres de mouvements des conteneurs dans la cour

-  *Concernant les conteneurs qui vont être stockés dans le terminal portuaire, préféreriez-vous les stocker dans la zone la plus proche des navires ?*
-  *Pour les conteneurs qui seront transférés rapidement aux transporteurs, préférez-vous les stocker près des zones attribuées aux transporteurs ? ou ce critère n'a pas d'importance pour vous ?*
-  *Pensez-vous que le rapprochement de conteneurs appartenant au même armateur vous permet de gagner du temps lors de leur transfert ?*

#### IV- Autres variables et paramètres déterminant la stratégie de stockage

-  *Quelle est votre politique de stockage qui permet de respecter les critères de sécurité internationaux ?*
-  *Avec quelle politique de sécurité sont stockés les conteneurs que vous transitez ? La compatibilité est-elle importante pour vous ?*
-  *A part les contraintes de sécurité, quelles sont les autres contraintes qu'il faut absolument prendre en considération dans l'opération de stockage ?*

#### V- Choix et priorité des objectifs

-  *Pouvez-vous identifier une priorité entre les scénarios proposés (l'optimisation du nombre de mouvements improductifs ; l'optimisation de la distance moyenne entre l'endroit de déchargement et l'emplacement de stockage ainsi qu'entre ce dernier et les sorties des conteneurs ; l'optimisation de la distance moyenne prévue entre les conteneurs appartenant au même armateur ? Cette priorité peut-elle changer selon l'état du trafic au terminal ?*

