

Rapport d'étude

Modélisation des flux de conteneurs sur les terminaux portuaires

Application à la mise en place du scanning

Page laissée blanche intentionnellement

Sommaire

1 - Introduction.....	4
1.1 - Contexte.....	4
1.2 - Problématique générale.....	4
2 - Présentation du terminal conteneurs de Fos-Graveleau.....	5
2.1 - Installations portuaires.....	5
2.2 - Infrastructures de desserte du terminal.....	5
2.3 - Organisation du terminal pour la manutention.....	5
2.4 - Trafics portuaires actuels et prévisionnels.....	6
3 - Modélisation.....	6
3.1 - Activité modélisée.....	6
3.2 - Une question peu explorée.....	7
3.3 - Principes de modélisation.....	7
3.4 - Zonage et flux.....	8
3.5 - Les grands principes retenus.....	8
3.6 - Modèle conçu.....	9
3.7 - Architecture générale.....	10
3.8 - Calage et paramètres du modèle.....	13
3.9 - Résultats.....	13
3.10 - Avantages et limites du modèle.....	18
4 - Extensions / Améliorations envisageables.....	19
5 - Conclusion.....	20
Annexes.....	21
Annexe A - Présentation du paramétrage de la simulation.....	22
Annexe B - Paramétrage du plan du terminal portuaire.....	23
Annexe C - Présentation des résultats bruts de la simulation.....	24
Glossaire.....	25

1 - Introduction

1.1 - Contexte

Le scanning consiste à inspecter le contenu d'un conteneur, sans l'ouvrir. Cette opération a pour objectif de déceler toute marchandise dangereuse. En 2007, dans le cadre de la loi dite «Implementing Recommendations of the 9/11 Commission Act of 2007 », le congrès américain a décidé de rendre obligatoire, à partir de juillet 2012 le scanning de 100 % des conteneurs entrant aux États-Unis, cette opération de scanning étant réalisée au port de départ des conteneurs. L'entrée en vigueur de cette réglementation a depuis été reportée¹ au 1er janvier 2014 par le Département de la Sécurité Intérieure des États-Unis, avec possibilité de nouveau report à cette date. De son côté, la Commission Européenne s'est positionnée sur cette mesure² ; les négociations sont toujours en cours avec les Etats-Unis.

Toutefois, si elle était mise en place, cette nouvelle réglementation deviendrait alors une composante très importante de la compétitivité des ports français à l'international. Dans ce contexte le CETMEF a demandé au RST, par le biais d'une étude de cas sur le port de Marseille, d'étudier la faisabilité pratique d'un tel système. Le CETE Normandie-Centre et le CETE Méditerranée ont été chargés de l'étude des possibilités de scanning des flux intermodaux, acheminés par le rail et le fleuve. Il a été choisi de s'intéresser dans un premier temps au terminal de Graveleau, situé sur les bassins ouest de Marseille. La question des flux de conteneurs à l'import ou à l'export et acheminés par voie routière a fait l'objet d'une précédente étude du CETE Méditerranée³ ; cette problématique n'est donc pas évoquée dans le présent rapport.

L'Union Européenne a lancé des démarches de réflexion en ce sens. Dans ce contexte le CETMEF a demandé au RST, par le biais d'une étude de cas relative au port de Marseille, d'étudier la faisabilité pratique d'un tel système. Le CETE Normandie-Centre et le CETE Méditerranée ont été chargés de l'étude des possibilités de scanning des flux intermodaux, acheminés par le rail et le fleuve. Il a été choisi de s'intéresser dans un premier temps au terminal de Graveleau, situé sur les bassins ouest de Marseille. La question des flux de conteneurs à l'import ou à l'export et acheminés par voie routière a fait l'objet d'une précédente étude du CETE Méditerranée⁴ ; cette problématique ne sera donc pas évoquée dans le présent rapport.

Après une première phase d'étude réalisée par le CETE Méditerranée ayant permis d'identifier les caractéristiques du transport de conteneurs sur ce terminal (cf. §2 -), la deuxième partie d'étude visait, par le biais d'une modélisation, à évaluer les conséquences de la mise en place de contrôle par scanning pour une partie des conteneurs acheminés par barge fluviale/maritime ou par train. Toutefois, bien que l'étude initiale était orientée sur la problématique des uniques flux de conteneurs à l'export en provenance des seuls modes ferroviaires et fluviaux, la simulation développée permet de modéliser l'ensemble des flux d'import et d'export de conteneurs tous modes de transports confondus (ajout du routier). Cette approche pourrait donc également être utilisée dans le cas d'études plus larges sur la problématique de la mise en place du scanning dans les terminaux portuaires.

1.2 - Problématique générale

L'objectif de l'étude est de proposer une méthode d'évaluation des impacts de la mise en place du 100 % scanning sur les flux portuaires et sur la productivité, en retenant le terminal de Graveleau comme lieu d'étude.

Le présent rapport vise à présenter la démarche retenue pour mener cette étude. Après une rapide description du terminal de Graveleau, le rapport décrit les choix retenus pour la constitution du modèle original ainsi que les avantages et limites de ce choix de modélisation, puis formule des propositions de recommandations.

1 Trade and Investment Barriers - Report 2013, European Commission, 2013

2 Secure Trade and 100% Scanning of Containers, European Commission Staff Paper Work, 2010

3 Rapport (interne et non publié) CETE Méditerranée, «_Mise en place de dispositifs de scanning à l'entrée du terminal conteneurs de Fos : estimation des impacts sur la circulation routière – Simulation dynamique », janvier 2010

4 Rapport (interne et non publié) CETE Méditerranée, «_Mise en place de dispositifs de scanning à l'entrée du terminal conteneurs de Fos : estimation des impacts sur la circulation routière – Simulation dynamique », janvier 2010

2 - Présentation du terminal conteneurs de Fos-Graveleau

2.1 - Installations portuaires

Le terminal de Graveleau est exploité par le Grand Port Maritime de Marseille (GPMM). Il a été construit en 1973. Ses caractéristiques principales sont :

- longueur de quai : 1175 m ;
- tirant d'eau maximum autorisé : 14,5 mètres ;
- capacité opérationnelle actuelle : environ 750 000 conteneurs ;
- superficie de l'aire de stockage : 56 hectares au total ;
- outillages : 10 portiques de déchargement.

Le GPMM envisage l'extension de ce terminal d'une part dans le prolongement du quai existant et d'autre part dans la création d'un autre quai au nord de la darse. L'extension de la capacité de du terminal de Graveleau sera accompagné d'importants objectifs de report modal vers les modes alternatifs à la route.

Actuellement le terminal de Graveleau est exploité par deux sociétés de manutention.

2.2 - Infrastructures de desserte du terminal

Pour son bon fonctionnement, le terminal dispose de plusieurs voies d'acheminements des conteneurs. Le terminal est ainsi accessible via :

- un réseau routier, délimité par des points d'accès contrôlés et définissant une zone de circulation restreinte ;
- un réseau ferroviaire limité par les capacités des sections amont très contraignantes. Le terminal de Graveleau dispose d'un faisceau comportant huit voies non électrifiées ;
- un accès direct entre les bassins ouest du GPMM et le bassin fluvial Rhône-Saône. Les quais du terminal sont utilisés conjointement pour le trafic fluvial et maritime.

2.3 - Organisation du terminal pour la manutention

2.3.1 - Pour les trains

Les trains arrivent le matin au niveau du faisceau de Graveleau. Les wagons sont dételés et répartis sur les voies propres à chaque manutentionnaire.

Les wagons sont alors déchargés au moyen de reach-stacker et les conteneurs entreposés dans une zone de stockage provisoire à proximité des quais. Une fois les opérations de chargement terminées, les wagons sont à nouveau chargés des conteneurs en attente sur la même zone de stockage provisoire.

Les wagons sont regroupés sur le faisceau ferroviaire et les trains reformés pour être prêts à repartir le soir même.

2.3.2 - Pour les barges fluviales

Le GPMM ne dispose pas de quais dédiés à la navigation fluviale. Les barges utilisent les mêmes infrastructures que les navires. Cependant, la priorité est donnée au trafic ferroviaire, ce qui implique que les barges n'ont pas d'horaires fixes de manutention.

2.3.3 - Pour les navires

Une fois accueillis à quai les navires sont déchargés au moyen des portiques vers la zone de manutention où les conteneurs sont ensuite récupérés pour être transférés vers les zones de stockage ou d'échanges.

2.3.4 - Pour les poids-lourds

Les poids-lourds sont déchargés au moyen des cavaliers au niveau de deux zones d'échanges à proximité de la zone de stockage. Leurs trajets à l'intérieur de la zone portuaire sont limités au maximum.

2.4 - Trafics portuaires actuels et prévisionnels

Il est à noter que par rapport à la problématique initiale, les conteneurs à destination des Etats-Unis transitent tous via les bassins Ouest du terminal de Graveleau. Les bassins Est accueillent uniquement des dessertes de la Méditerranée.

Les bassins Ouest ont une capacité actuelle de traitement d'environ 700 000 EVP par an. Selon le GPMM, environ 55 000 conteneurs sont à destination des Etats-Unis (estimation année 2011). Pour l'année 2010, les acheminements terrestres (hors transbordement maritime) de conteneurs étaient répartis de la façon suivante entre les différents modes de transport :

- 86,4 % par la route ;
- 8,6 % par le fleuve ;
- 5,2 % par le fer.

A terme avec l'ouverture du nouveau terminal, le GPMM estime que le trafic devrait atteindre 1,8 millions d'EVP. En conservant la répartition actuelle, le trafic de conteneurs à destination des États-Unis devrait atteindre 133 000 EVP.

3 - Modélisation

3.1 - Activité modélisée

Dans le cadre de cette étude, tous les flux de conteneurs à l'import et l'export ont été étudiés et modélisés. Cette exhaustivité permet de bien modéliser la mobilisation des engins de manutention nécessaires au traitement de l'ensemble des conteneurs du terminal.

Dans le contexte de l'étude, seule la problématique du scanning des flux à l'export effectuant un changement modal entre le mode ferroviaire et la voie fluviale/maritime a été examinée.

La première étape a consisté en une analyse critique des différentes solutions de scanning afin d'identifier la plus pertinente à modéliser. A l'issue de ce travail d'analyse, il a été décidé d'étudier la méthode consistant à scanner les conteneurs lors de la manutention de transfert entre le mode ferroviaire et la voie fluviale. Cette méthode se rapproche de celle envisagée pour les poids-lourds, qui devraient passer à vide par le scan avant de recevoir le conteneur.

La modélisation permet de quantifier les impacts sur la mobilisation des moyens de manutentions d'une part et des dispositifs de contrôle d'autre part pour effectuer les scans.

Afin d'évaluer l'impact sur ces différents éléments, il est nécessaire de pouvoir comprendre et reproduire avec l'outil de modélisation le fonctionnement actuel de l'activité de ce terminal portuaire.

3.2 - Une question peu explorée

La modélisation à réaliser pour répondre à la question de l'organisation des flux au sein même d'un terminal conteneur n'est pas « usuelle », au sein de la sphère publique tout au moins. En effet, les questions de la gestion et l'organisation des flux sur les terminaux par les manutentionnaires sont traitées par les compagnies privées. Ce sont ces compagnies privées qui gèrent les terminaux et possèdent depuis la dernière réforme portuaire les équipements lourds de manutention. L'État, même par l'intermédiaire du GPMM, n'a donc plus qu'un rôle d'observateur par rapport à ces questions d'organisation pratique.

Ces agents privés disposent en général d'outils de modélisation informatique, mais qui sont plutôt adaptés à l'optimisation quotidienne en temps réel, et non à des démarches de prospective.



Figure 1 : engins de manutention utilisés (reach-stacker à g. ; cavalier à d.)
(photos CETE Méditerranée et Normandie-Centre)

Les terminaux portuaires constituent des zones importantes de transfert de conteneurs entre les différents modes utilisés. Les conteneurs transitent entre plusieurs modes de transport avec des périodes de stockage temporaire dans l'attente de leur exportation. Les dockers utilisent plusieurs matériels de manutention selon la nature de l'opération. Les cavaliers, engins les plus utilisés, permettent de transporter rapidement les conteneurs entre plusieurs zones de stockage. Ils permettent également le déchargement des poids-lourds. Les reach-stackers, plus maniables, permettent de déposer des conteneurs sur les wagons ferroviaires. Ils assurent principalement les opérations de chargement/déchargement à partir des zones de stockage tampon. Ces deux types d'engins sont capables d'opérer des stockages verticaux.

3.3 - Principes de modélisation

Le rapport du CETE Méditerranée rassemble les différents éléments récoltés auprès des manutentionnaires, et notamment :

- les flux globaux de conteneurs sur l'année, la part modale de chaque mode et la part de conteneurs 20 pieds ;
- le plan du terminal d'Eurofos avec une description relativement précise de l'espace accordé à chaque mode et au stockage des conteneurs ;
- les horaires des trains : heure d'arrivée pour chargement et heure de départ ;
- les engins de manutention disponibles, leur mode de fonctionnement et quelques chiffres moyens relatifs à leur fonctionnement.

Une visite sur site a permis de recueillir également quelques éléments d'information complémentaire sur le fonctionnement pratique des différents matériels de la zone et sur les interactions existantes entre-eux.

Il est à noter que les valeurs recueillies sont principalement des données moyennes quotidiennes voire annuelles, ce qui implique que le modèle développé n'est calé au mieux qu'à une donnée journalière.

3.4 - Zonage et flux

L'activité très organisée d'un terminal portuaire a permis de proposer un découpage assez fin des différentes zones à considérer dans la modélisation.

Chaque zone est caractérisée par une activité particulière qui a pu ensuite être reprise dans le modèle (cf. figure 2).

D'autre part, les différents flux possibles de conteneurs ont été recensés (cf. figure 2) : flux de poids lourds, flux de cavaliers et flux de reach-stacker. L'utilisation de deux types d'engins présents sur la zone portuaire (cavaliers et reach-stackers) s'effectue de manière organisée en fonction de la nature du déplacement à accomplir. Des règles de gestion de déplacement ont été ainsi implémentées dans le modèle.

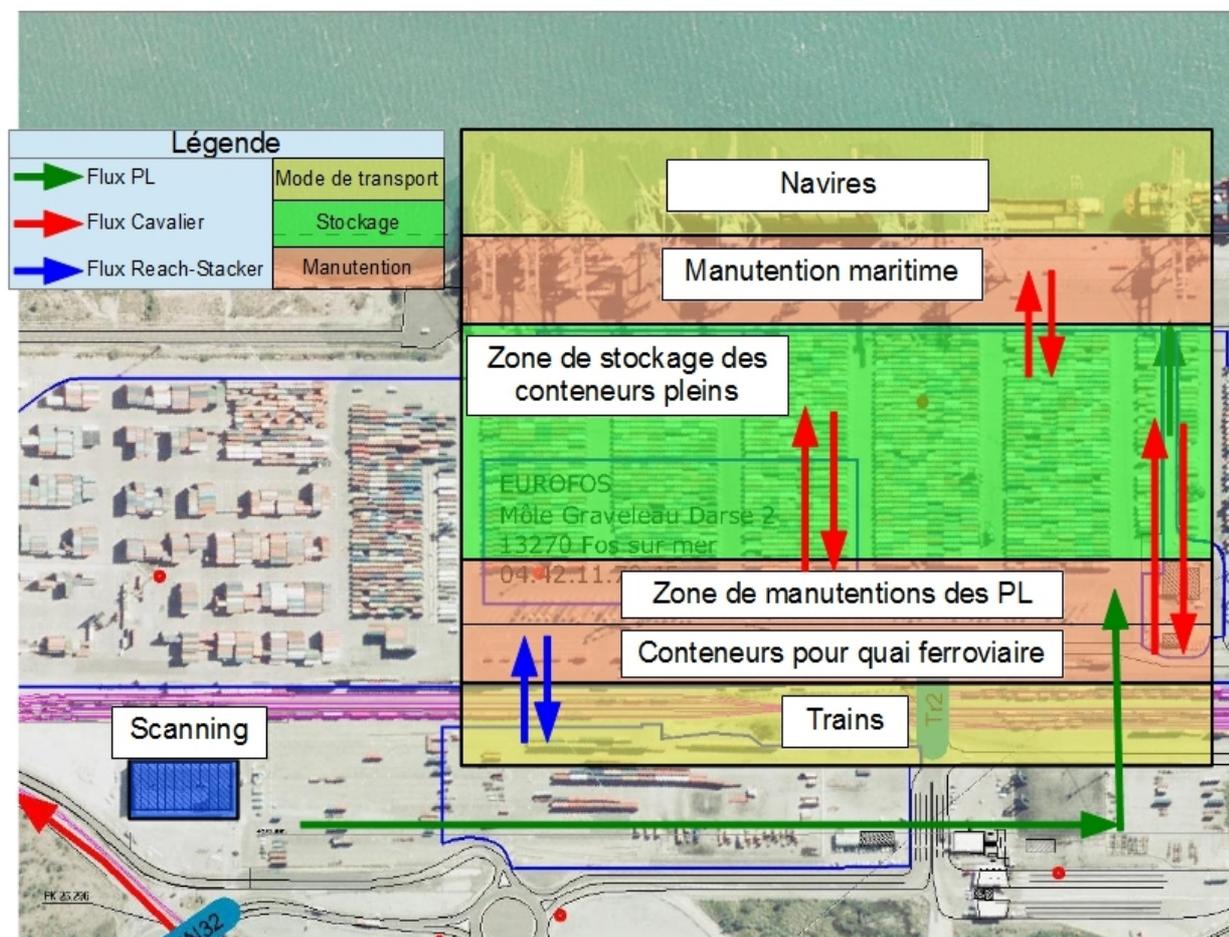


Figure 2 : identification des différentes « zones » du terminal et de l'organisation des flux au sein du terminal (exemple d'Eurofos sans les flux vers liés au scanning)

3.5 - Les grands principes retenus

La modélisation s'attache à retranscrire le déplacement des conteneurs et non des engins de manutention.

Le modèle dispose d'une quantité importante d'informations de qualité mais certaines lacunes lui imposent tout de même certaines limitations. En particulier, sont inconnus :

- les principes de priorisation du traitement des conteneurs (système en temps réel basé sur de l'information GPS), a priori extrêmement complexes ;
- le positionnement et le cheminement précis des conteneurs au cours d'une journée type : seules des données moyennes de zones à zones sont disponibles.

En conséquence, le modèle ne peut être en mesure que de proposer des résultats globalisés représentant le fonctionnement général de l'activité étudiée.

Cette forte contrainte a conduit à devoir faire plusieurs choix dans la modélisation :

- travailler sur une journée moyenne annuelle (un équivalent en trafic des modèles interurbains basés sur du TMJA). Cela se justifie d'autant plus qu'au vu des informations recueillies, une grande majorité des conteneurs est stockée pendant plusieurs jours sur le terminal conteneurs, il n'y a donc pas de réelle priorisation de l'affectation des tâches des engins de manutention outre l'arrivée des navires ;

- travailler sur un modèle relativement simple et qui ne nécessite que peu d'hypothèses supplémentaires. En particulier, les mouvements parasites ne sont pas modélisés distinctement, une fonction simple définit la priorité de traitement des conteneurs, le modèle utilise des temps moyens de manutention ;
- approcher la complexité des flux logistiques par l'aléa : il s'agit d'un principe fort mais qui correspond à l'idée que se ferait un observateur neutre du terminal. C'est-à-dire qu'un conteneur en import qui a vocation à partir par train sera placé aléatoirement sur la zone de stockage des conteneurs, puis aura une destination aléatoire sur la zone de stockage train et une destination aléatoire sur le train à proximité immédiate de cette dernière zone ;
- mettre en place un modèle facilement paramétrable (plan, nombre de conteneurs à manutentionner, nombre d'engins...) qui puisse tester un grand nombre d'hypothèses par la suite ;
- axer le modèle sur les mouvements des conteneurs opérés par les engins de manutention, car ceux-ci sont au cœur de la problématique du dimensionnement des moyens.

3.6 - Modèle conçu

Au stade de la programmation du modèle, les différents principes évoqués précédemment se sont concrétisés sous la forme suivante :

- seul le conteneur de 40 pieds est représenté graphiquement ; il s'agit de l'unité spatiale retenue ;
- les conteneurs de 20 pieds sont assimilés à des conteneurs de 40 pieds ; les temps de manutention et de déplacements sont considérés comme identiques (bien que quelque peu différents dans la réalité) ; la proportion de conteneurs de 20 pieds représente un tiers des conteneurs ;
- le pas du temps du modèle est un multiple de la seconde ;
- seuls les mouvements essentiels subis par un conteneur sont modélisés ; les chemins empruntés sont calculés au plus court avec la prise en compte de zones de circulation dédiées et de règles de circulation définies à la conception du modèle (règles de priorité) ;
- l'origine et la destination d'un conteneur sont déterminées par la nature (import ou export) du flux à modéliser ; la position exacte initiale et finale du conteneur sont définies de manière aléatoire ; le modèle permet la réalisation d'itérations successives à paramètres constants ;
- la congestion liée aux engins de manutention n'est pas prise en compte ;
- enfin le paramètre vertical n'est pas pris en compte dans le modèle ; plusieurs conteneurs peuvent se superposer sans prise en compte du temps de manutention supplémentaire, sauf par l'intermédiaire d'un taux de mouvement parasite général et commun paramétrable.

Le choix a été fait de modéliser ce problème par l'utilisation du langage Visual Basic for Application (VBA) disponible dans le logiciel Microsoft Excel®.

Les éléments de présentation de l'interface Excel® connue du plus grand nombre permettent ainsi une analyse aisée des résultats et la possibilité d'une reprise en main de l'outil par des acteurs non spécialistes.

3.7 - Architecture générale

Le choix retenu est un **modèle macroscopique à résolution microscopique**. C'est-à-dire que le modèle travaille avec un pas de temps fin, ici un multiple entier d'une seconde (paramétrable), et peut faire évoluer la simulation à chaque pas de temps sur l'ensemble de la journée étudiée. De plus, chaque conteneur identifié de manière unique est modélisé de manière individuelle à chaque pas de temps. Pour autant, ne sont pris en compte comme résultat que les indicateurs moyens en sortie qui sont calculés sur une journée entière simulée.

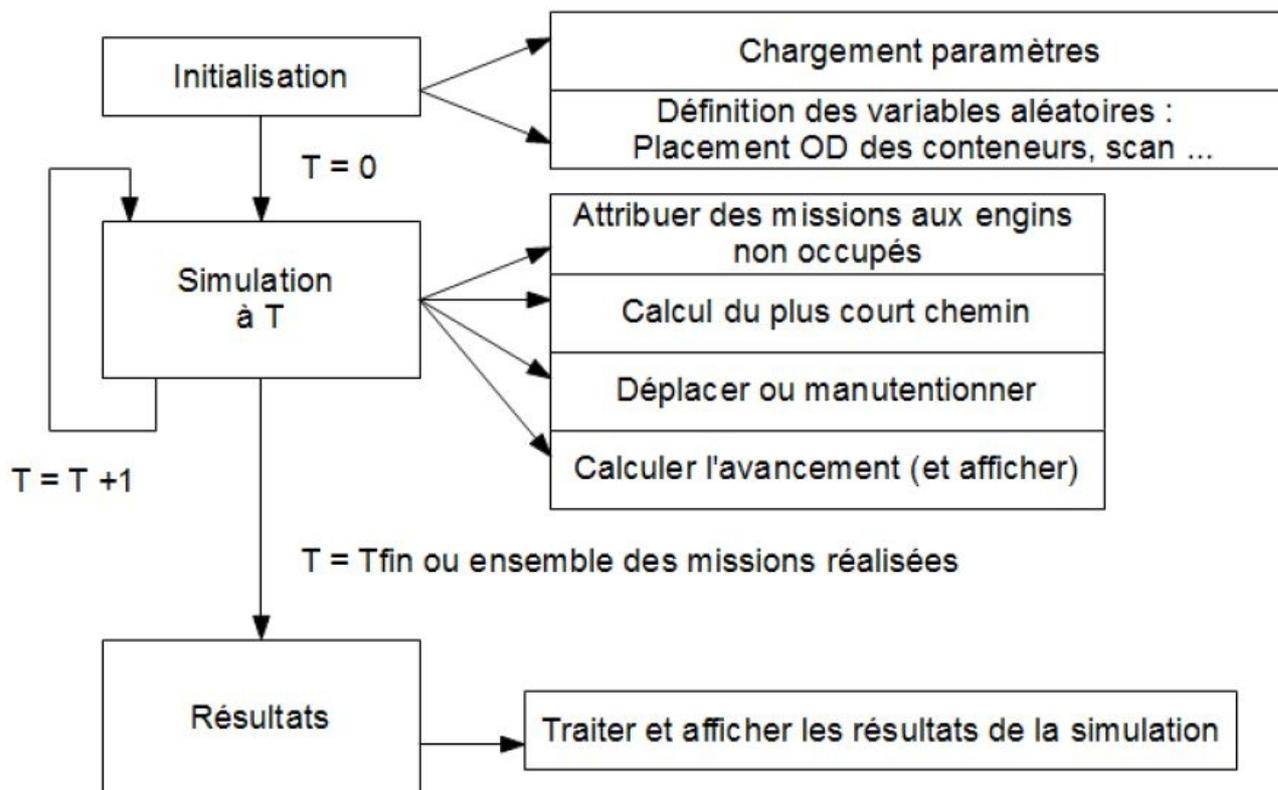


Figure 3 : architecture du modèle

L'architecture est découpée en plusieurs modules, ce qui permet de traiter chaque problème de manière indépendante. En pratique, chaque module a fait l'objet de sous-programmes VBA séparés. Un programme général fait ainsi appel aux différents sous-programmes.

3.7.1 -Plan du terminal

Le programme se base sur les données paramétrées en entrée ainsi que sur le plan du terminal.

Le terminal est modélisé au moyen d'un rectangle de 67 x 73 cases, dans lequel chaque case se voit attribuée une valeur représentant une fonction (stockage, circulation, scanning,...). Le plan peut ainsi être modifié très rapidement et facilement dans la limite du nombre de cases maximal. Les cases peuvent également être « non utilisées ». L'agrandissement du plan nécessiterait de légères modifications dans le cœur du programme.

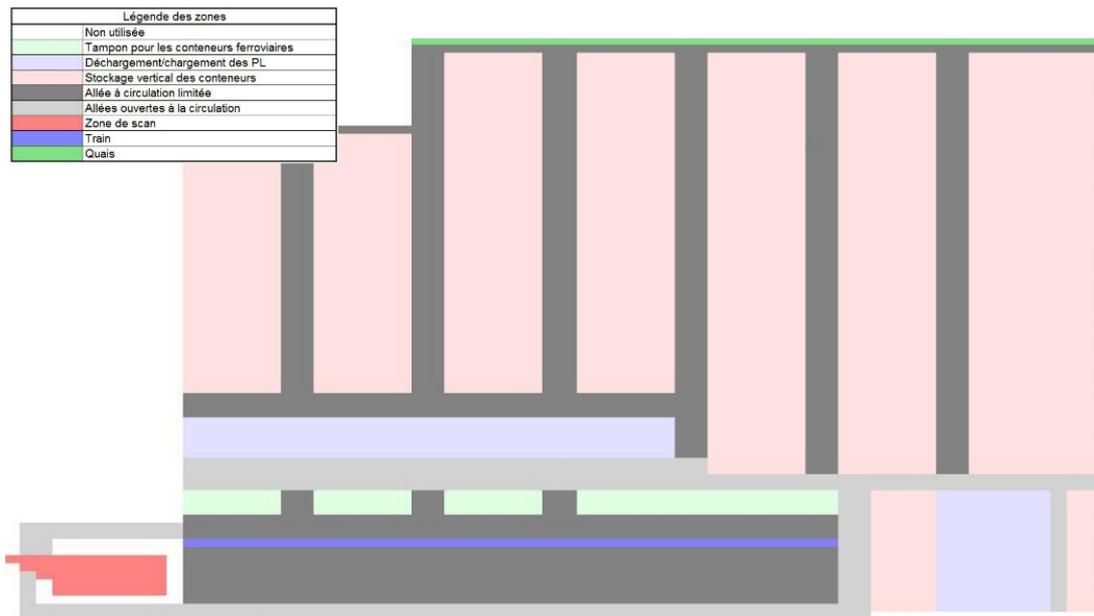


Figure 4 : représentation du plan du terminal modélisé dans Excel

3.7.2 - Génération des conteneurs de manière aléatoire

Les conteneurs à manutentionner sont générés de manière aléatoire sur les zones initiales en fonction de leur mode de pré/post-acheminement et de leur sens. Ainsi le conteneur sera positionné de manière aléatoire sur la bonne zone ou sur le train.

Cependant, le stockage intermédiaire, à la décharge du train par exemple, intervient à proximité immédiate de la localisation du conteneur sur le train, qui, elle, a été déterminée au hasard. Cette proximité est également prise en compte pour l'envoi de conteneurs par voie maritime.

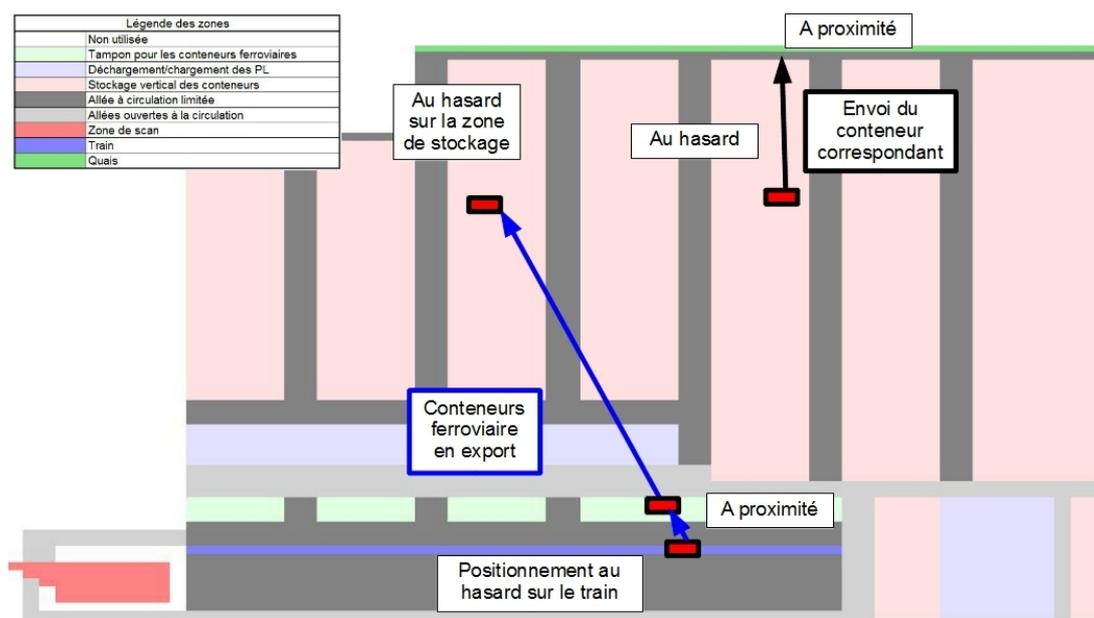


Figure 5 : exemple de déplacements générés, pour un conteneur ferroviaire en export

En réalité, un conteneur peut mettre plusieurs jours pour être transféré d'un mode de transport à un autre. Aussi, ses déplacements sont entrecoupés de période d'attente sur les différentes aires de stockage de la zone portuaire.

Le modèle mis en place ne considère qu'un seul déplacement de conteneur entre deux zones. Un conteneur est donc déposé au hasard sur une zone de stockage. Un second est ensuite pris au hasard sur la zone de stockage pour le déplacement suivant. Ces deux étapes sont indépendantes dans le modèle. L'objectif de la modélisation est de pouvoir décharger et charger le bon nombre de conteneurs paramétrés par l'utilisateur. Dans le cas d'un conteneur devant être scanné, un déplacement supplémentaire vers la zone de scanning est ajouté.

La figure 5 illustre le principe de génération des conteneurs présenté ci-avant.

Il est à noter que le modèle ne prend pas en compte la manutention des conteneurs entre le quai et les navires.

3.7.3 - Attribution des missions et déplacements

L'attribution des missions des engins de manutention s'effectue au hasard en fonction des engins disponibles au pas T et selon des priorités d'utilisation définies par type d'engins (cavalier ou reach-stacker). L'ordre de priorité est défini dans la suite du document.

Le déplacement des conteneurs s'effectue selon le principe du plus court chemin de Dijkstra⁵. La vitesse de déplacement dépend du type d'engin mobilisé. Les zones de circulation sont prioritairement utilisées et seul le dernier déplacement peut être effectué (au plus court) dans une zone de stockage.

Le temps global de la mission prend en compte le temps de parcours et le temps de manutention au chargement et au déchargement (temps paramétrables). Une fois le déplacement achevé, l'engin de manutention est considéré comme immobilisé pendant un temps : « temps de déplacement » x « taux de mouvement parasite » qui permet de prendre en compte le temps de retour à vide des engins de manutention, la variabilité du temps de manœuvre (dépendant du nombre de conteneurs à bouger sur le lieu de stockage vertical) et des autres pertes de temps éventuelles (pause, autres aléas,...). Ce taux de mouvement parasite permet de ne pas affecter de nouvelles missions durant ce temps. Il est paramétrable par l'utilisateur.

Le modèle de choix d'attribution est assez simple. Si un engin n'est pas occupé à l'instant T, le modèle passe en revue les conteneurs qui pourraient être traités par cet engin selon des ordres de priorité définis par type de matériels. A priorité équivalente, l'attribution sur l'un des conteneurs s'effectue au hasard. La position des engins n'étant pas modélisée, ce recours à l'aléa n'a pas d'impact sur la modélisation.

Ainsi, pour le reach-stacker, l'ordre de priorité est le suivant :

- 1 : traiter les conteneurs à décharger du train ;
- 2 : traiter les conteneurs à charger sur le train ;
- 3 : emmener les conteneurs au scan.

Pour un cavalier, le schéma est le suivant :

- 1 : traiter les conteneurs dans la zone tampon pour le train présent (import) ;
- 2 : traiter les conteneurs pour le train suivant (import) ;
- 3 : s'occuper des conteneurs à scanner, les emmener ou les ramener ;
- 4 : s'occuper des autres conteneurs : import/export fluviaux, maritimes et routiers, ainsi que des conteneurs trains en export sur la zone de stockage tampon.

5 Pour plus de détails sur le fonctionnement de l'algorithme de Dijkstra, voir Ortuzar, J. and L. Willumsen (2001), Modelling transport, John Wiley & Sons, Ltd, p 330 et 331.

3.8 - Calage et paramètres du modèle

3.8.1 -Données de calage

La première phase d'étude menée par le CETE Méditerranée a permis rassembler différents éléments sur le fonctionnement du terminal et notamment :

- les flux globaux de conteneurs sur l'année et la part modale de chaque mode ;
- les horaires des trains : heure d'arrivée pour chargement et départ ;
- les temps moyen de manutention par opération et par engin de manutention ;
- les vitesses moyennes de déplacements des engins.

Les données de calage sont principalement des données moyennes, quotidiennes voire annuelle.

3.8.2 -Paramètres de calage

Afin de représenter au plus proche la situation actuelle, les paramètres de calage suivants sont utilisés :

- pas de la simulation (en secondes) ;
- temps de chacune des opérations de manutention pour chaque engin ;
- vitesse des engins de manutention (dépendant du pas spatial et du pas de temps).

3.8.3 -Méthode de calage du modèle

Le calage du modèle a été effectué sur la base de la bonne reproduction du temps de manutention et de déplacements moyens des conteneurs par chaque type d'engins. Cette vérification a également été effectuée sur la durée générale de la journée de travail nécessaire au traitement du flux moyen de conteneurs, ainsi que sur la comparaison des heures réelles d'arrivée et surtout de départ des trains.

3.8.4 -Paramètres d'études

Les paramètres d'études qui peuvent évoluer à chaque simulation sont les suivants :

- nombre moyen de conteneurs à traiter, à différencier par mode et en fonction du sens ;
- proportion de conteneurs à scanner
- temps moyen de scan et capacité du scan ;
- heure de début et de fin de simulation ;
- heure de départ et d'arrivée des trains ainsi que le nombre de conteneurs à charger/décharger par train ;
- moyens de manutention disponibles et taux de mouvements parasites ;
- paramètres d'activation et de configuration de l'affichage (sans influence sur le résultat de la simulation).

Il est possible de lancer plusieurs fois le modèle soit en conservant les paramètres d'entrée soit en en faisant évoluer certains. Il est ainsi possible :

- d'effectuer la même simulation x fois avec un taux de scanning différent (variant de 0 à 100%) ;
- de déterminer, pour une situation donnée, le nombre de cavaliers nécessaires ;
- de déterminer, pour différents taux de scan, le nombre minimal de cavaliers nécessaires.

Les paramètres sont saisis sur l'une des feuilles du tableau Excel portant la simulation (*cf.* Annexe A).

3.9 - Résultats

3.9.1 - Résultats du modèle

S'agissant d'un modèle macroscopique, les résultats sont compilés sur la durée totale de la simulation (cf. figure 6). Toutefois, un certain nombre de variables est également enregistré à chaque pas de calcul afin de pouvoir analyser l'évolution de celles-ci au cours de la simulation

Les paramètres enregistrés en continu sont :

- nombre de conteneurs en cours de manutention (faible en fin de simulation) ;
- nombre de conteneurs arrivés à « bon port » c'est à dire ayant atteint leur destination finale ;
- nombre de conteneurs scannés ;
- nombre de conteneurs en cours de scan (faible en fin de simulation) ;
- nombre de cavaliers et de reach-stackers occupés (faible en fin de simulation) ;
- indicateurs statistiques de taux d'occupation des reach-stackers et des cavaliers ;
- nombre moyen de mouvements par heure et par cavalier ;
- heure réelle de départ et d'arrivée des trains ;
- synthèse écrite sur les heures de départ et d'arrivée des trains et sur le résultat final de la simulation.

rapport		Horaire	Train 1	Train2	Train3	Train4	Train5
	Nombre de conteneurs en cours de manutention	22,0					
	3	arrivée réelle	8	10,5	14		
	Nombre de conteneurs arrivés à "bon port"	départ réel	9,14	11,61	15,09		
	1167						
	Capacité du scan	Nombre de conteneurs scannés	Nombre de RS occupés	indicateurs synthétiques	taux d'occupation des Reach-taux	66%	
	7	110	0		d'occupation des cavaliers	100%	
	Utilisation du scan	vérif : scan en cours	Nombre de cavaliers occupés		taux d'occupation du scan	50%	
	0	0	13		Nombre de mvt par heure et par cavalier	6,5879	

Le Train numéro 1 était prêt à partir à 9,14 h, avant l'heure de départ prévu : avance de 1,36 h
 Le Train numéro 2 était prêt à partir à 11,61 h, avant l'heure de départ prévu : avance de 2,72 h
 Le Train numéro 3 était prêt à partir à 15,09 h, avant l'heure de départ prévu : avance de 3,91 h
 Opération non terminée, il reste 94 conteneurs à manutentionner, sur un total de 1240
 Nombre de conteneurs déplacés : 1146

Figure 6 : extrait de la page des résultats agrégés de la simulation

De plus, il est possible d'activer la fonction d'affichage permettant de visualiser les mouvements des conteneurs. Cet affichage a une vocation pédagogique et permet également lors des phases de tests de vérifier le bon comportement du modèle.

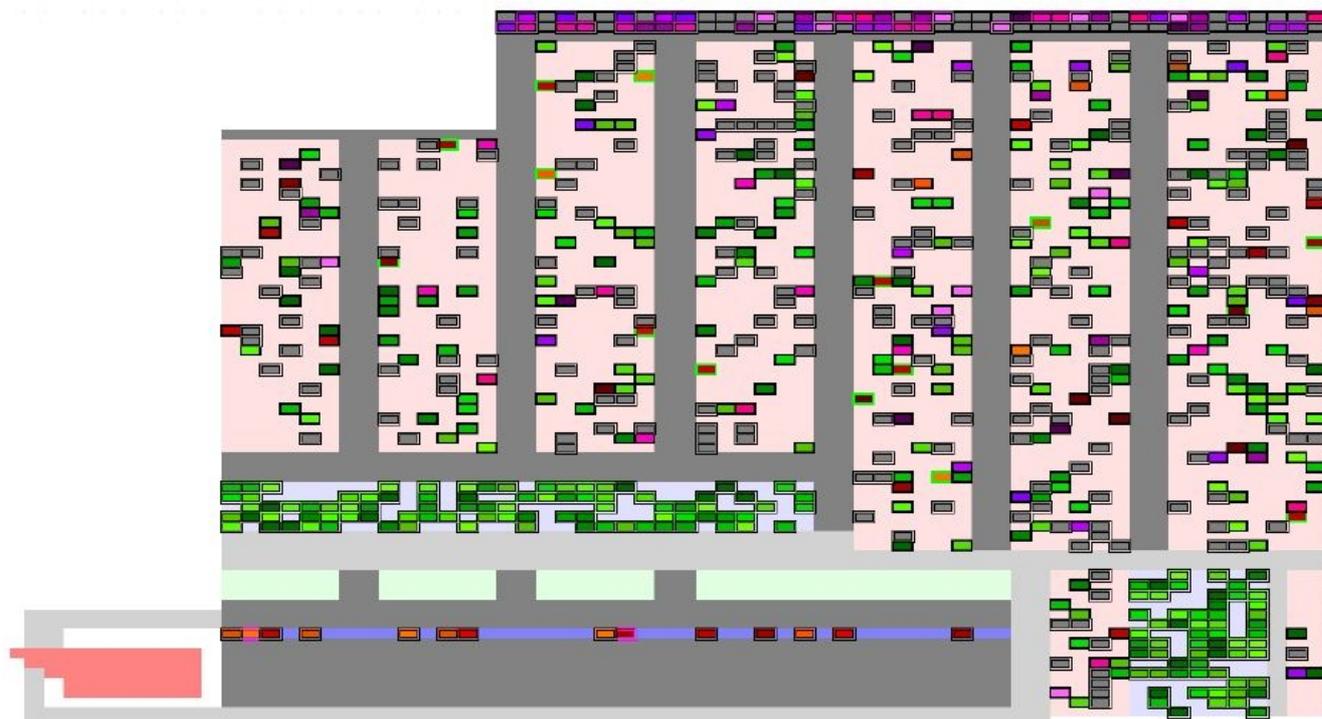


Figure 7 : exemple d'affichage (début de simulation à l'arrivée du train)

Afin d'identifier les mouvements de conteneurs, un code couleur a été défini comme suit :

- le sens du flux :
 - les conteneurs exportés sont entourés de deux bordures fines ;
 - les conteneurs importés sont entourés d'une bordure large ;
- le mode de transport terrestre des conteneurs :
 - les conteneurs routiers sont en teintes vertes ;
 - les conteneurs ferroviaires en teintes rouge marron ;
 - les conteneurs fluviaux en teinte violet rose ;
 - les conteneurs virtuels approvisionnant le terminal maritime sont en gris (ces conteneurs correspondent aux conteneurs déjà présents et sans mouvements ce jour) ;
- le mode de manutention des conteneurs :
 - les conteneurs en cours de manutention par un RS sont entourés de rose ;
 - les conteneurs en cours de manutention par un cavalier sont entourés de vert ;
 - les autres sont entourés de noir.

Le temps de calcul du modèle reste relativement élevé pour une utilisation régulière et dépend fortement de la configuration matérielle de l'ordinateur utilisé.

Pour une simulation donnée, le temps de calcul est de l'ordre de quelques minutes soit de l'ordre du quart d'heure pour une dizaine de répliques. Lorsque l'affichage est activé, la simulation est mise en pause à chaque nouvel affichage afin de laisser le temps à l'utilisateur de visionner l'interface graphique. Ainsi, la simulation est ralentie ce qui incite l'utilisateur à modérer l'utilisation de cette fonction ou d'en adapter le pas d'affichage.

Bien qu'ayant été amélioré sur quelques aspects de programmation, le programme reste toutefois, d'un point de vue strictement informatique, loin d'être optimisé. Le programme ainsi proposé reste avant tout un démonstrateur.

3.9.2 - Principaux résultats

La simulation mise en place permet de modéliser un dimensionnement de moyens sans vocation à retranscrire exactement le déroulement d'une journée de travail réelle.

En utilisant les différentes possibilités d'optimisation des moyens proposés par le modèle, un certain nombre d'enseignements a pu être tiré sur le cas particulier du terminal de Graveleau.

Dans les différents extraits de résultats présentés ci-après, la capacité du scanner et le nombre de conteneurs à déplacer dans la journée de travail ont été fixés. L'objectif est de déterminer l'impact du taux souhaité de conteneurs devant faire l'objet d'un scan sur deux grands indicateurs :

- vérifier la possibilité de traiter dans la journée de travail tous les conteneurs devant être manipulés ;
- vérifier le dimensionnement des engins de manutention et leur taux d'utilisation moyen sur la journée.

Le premier scénario de base qui a été simulé prenait en compte le contrôle des conteneurs à l'export et qui étaient en provenance du mode fluvial ou ferroviaire.

La simulation a été effectuée sur plusieurs répliques successives en augmentant le taux de conteneurs à scanner. Les résultats de cette simulation, dont l'évolution des paramètres est présentée en figure 8, montrent qu'il est possible de réaliser la totalité du plan de transport de la journée jusqu'à un taux d'environ 50 % du scanning. Au delà, l'augmentation du taux de scan a un impact sur le nombre de conteneurs effectivement déplacés sur la journée de travail.

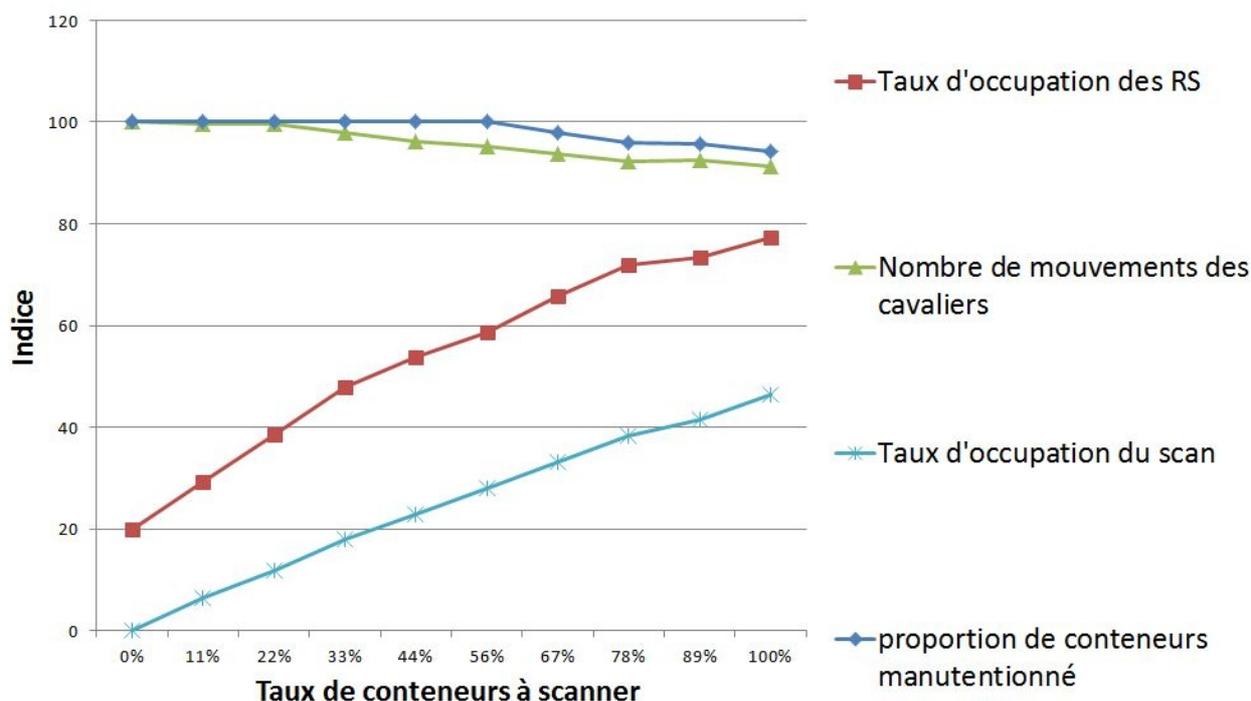


Figure 8 : évolution des résultats en fonction du taux de scan des conteneurs – modes fluvial et ferroviaire (base 100 : 0 % scan)

Le second scénario présente une utilisation étendue de la simulation en élargissant le scanning aux conteneurs en provenance du mode routier. Le résultat présenté en figure 9 démontre que la capacité de la zone de scanning devient rapidement un facteur limitant.

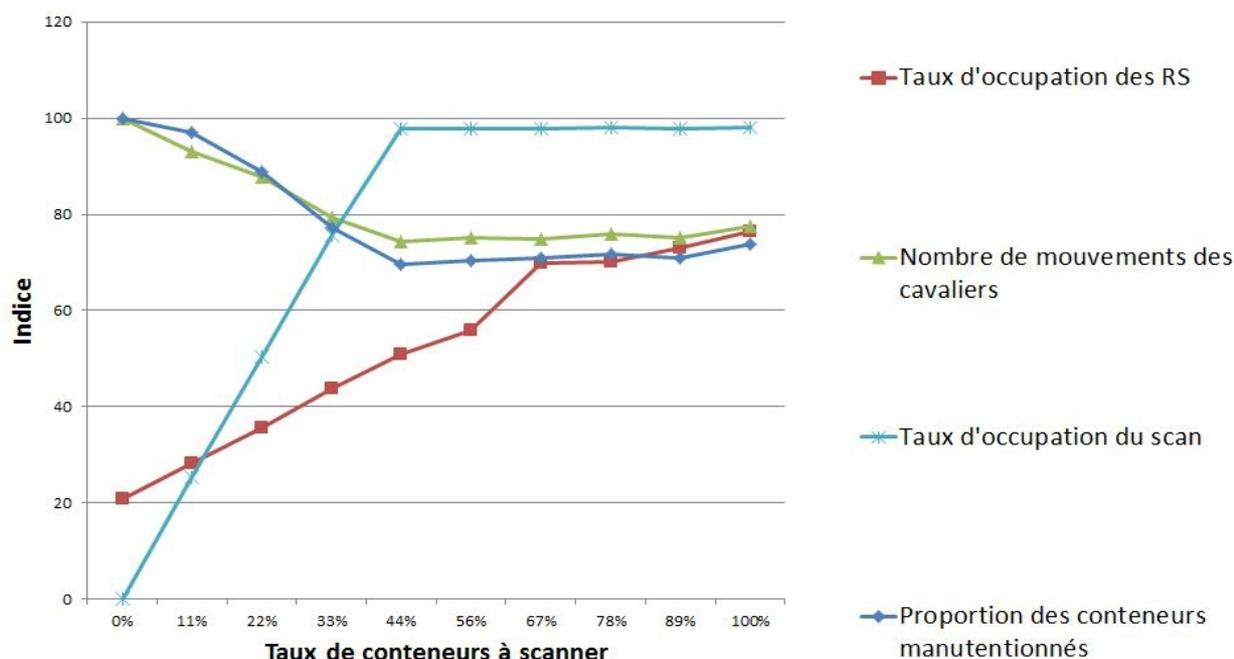


Figure 9 : évolution des résultats en fonction du taux de scan des conteneurs – tous modes

Le fait de généraliser le scanning aux conteneurs en provenance du mode routier a pour conséquence d'augmenter fortement le nombre de conteneurs à scanner et permet de confirmer le bon fonctionnement du modèle dans cette situation.

Enfin, le dernier scénario type pouvant être testé par le modèle consiste à déterminer les moyens nécessaires, en nombre de reach-stackers et cavaliers mais également en nombre de places disponibles au scan, afin d'assurer le plan de transport défini pour la journée.

La figure 10 présente les résultats obtenus dans le cas d'un scénario multi-modal en fonction du taux de scan des conteneurs en provenance uniquement du mode fluvial et ferroviaire.

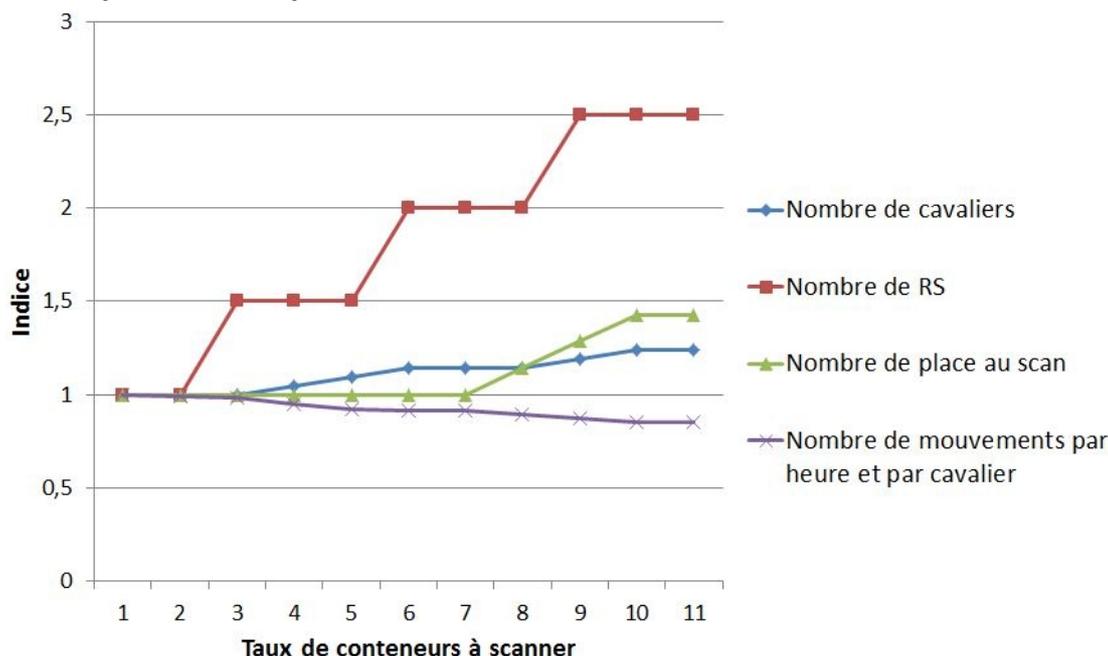


Figure 10 : évolution des moyens nécessaires selon le taux de scan

Le modèle effectue ainsi plusieurs itérations successives en ajustant les différents paramètres en fonction de la réalisation totale ou non du plan de transport prévu, obtenu dans l'itération précédente. Ces itérations successives sont réalisées à chaque taux de scan.

Il apparaît ainsi, dans l'organisation retenue, que le dimensionnement en reach-stackers est le plus sensible à la hausse du taux de scan.

3.10 - Avantages et limites du modèle

3.10.1 - Avantages

Les résultats obtenus par le modèle sont des données moyennes à la journée. L'approche microscopique retenue dans le programme permet au modélisateur de bien identifier chaque étape élémentaire de ce problème complexe en vue d'en sommer les différents effets.

Cette approche microscopique permet de limiter les effets d'arrondis qui seraient nécessairement présents dans une approche manuelle du problème.

Aussi la structure du programme permet d'effectuer des simulations avec en paramètres d'entrée d'une part des données moyennes sur le volume de conteneurs manipulés dans la journée, tout en prenant en compte d'autre part des données unitaires sur les moyens disponibles pour la manutention.

De plus, le modèle retenu simule l'ensemble des flux de conteneurs aussi bien à l'import qu'à l'export quel que soit le mode de transport. La simulation peut ainsi être utilisée dans le cadre d'études plus larges sur la problématique du dimensionnement de moyens de manutention suite à la mise en place du scanning sur la zone portuaire.

Par ailleurs, l'approche retenue dans ce modèle présente l'avantage de pouvoir proposer à l'utilisateur une reconstitution graphique du déplacement des conteneurs. Cette possibilité permet au modélisateur de vérifier le bon comportement du modèle dans les phases de calage et de tests des simulations de projets. De plus, il s'agit d'un très bon outil pédagogique pour expliquer le fonctionnement du modèle à un public non averti (comme le commanditaire de l'étude par exemple).

Pour le reste, l'évolution temporelle de plusieurs variables peut également être représentée permettant d'affiner l'analyse des comportements observés.

De plus, le choix d'utiliser le logiciel Excel et le langage VBA est un atout très appréciable de ce programme. En effet, le modèle a été pensé pour être relativement flexible sur de nombreux paramètres dont le principal est l'agencement spatiale des différentes zones du terminal portuaire.

Par conséquent, le modèle peut facilement être adapté pour répondre à l'analyse d'un autre terminal présentant les mêmes usages, ou à l'étude de l'amélioration spatiale d'un port donné.

Les nombreux paramètres d'entrée actuellement retenus dans le modèle permettent une grande latitude dans les scénarios pouvant être étudiés et comparés.

Enfin, l'utilisation du langage VBA permet d'envisager rapidement des améliorations dans l'algorithme par des modélisateurs, non spécialistes en programmation informatique. En particulier, il est très aisé de tester plusieurs paramètres d'entrées et donc plusieurs dimensionnements de moyens par la création de macro de répliques.

3.10.2 -Inconvénients – limites du modèle

Une des premières limites du modèle (cf. §3.5 -) est intrinsèque à la nature des données d'entrée disponibles pour réaliser la modélisation de cette activité de manutention portuaire. Les données disponibles sont des flux moyens journaliers voire annuels ce qui implique que les résultats issus de la modélisation ne peuvent être présentés que de manière agrégée sur la journée.

Cette contrainte a pour principale conséquence de rendre le calage du modèle relativement délicat. Cette notion doit bien être intégrée dans la préparation d'une étude de ce type et exige une phase de recueil de données spécifique.

Le choix d'une approche microscopique pour étudier ce problème a permis de prendre en compte finement un certain nombre de comportements élémentaires. Cependant, quelques aspects n'ont pas été modélisés de manière détaillée :

- aucun phénomène de congestion n'est pris en compte dans le déplacement des engins. Ceci devrait être pris en compte dans l'hypothèse d'une augmentation massive du nombre d'engins utilisés ou en fonction de la congestion envisageable sur les voies d'accès à la zone de scanning par exemple ;
- modélisation axée sur le déplacement d'un conteneur d'une zone à une autre sans suivi de la trace de ce conteneur pour le déplacement suivant. Le grand nombre de déplacements et la proximité immédiate des zones de stockage atténuent l'effet de cette approximation ;
- pas de prise en compte du déplacement à vide des engins de manutention (sauf dans le taux de mouvement parasite) ;
- de manière générale pas de prise en compte du paramètre vertical et d'une variabilité du temps de manutention initial et final en fonction de la position du conteneur dans la pile de stockage (considéré uniquement dans le taux de mouvements parasites).

Enfin, comme dans toute simulation dynamique, le modèle s'appuie sur plusieurs variables aléatoires (en particulier la position des conteneurs à déplacer). Ce principe impose une certaine prudence du modélisateur vis à vis des résultats obtenus, qui peuvent alors être moyennés par le biais de plusieurs itérations successives.

4 - Extensions / Améliorations envisageables

Comme cela a déjà été rappelé précédemment, le programme développé n'a pas été conçu par des modélisateurs ayant de fortes compétences en programmation informatique. Aussi, quelques optimisations sur l'architecture du modèle pourraient être envisagées afin de réduire le temps de calcul.

De même, dans le but de pouvoir utiliser de manière plus systématique la représentation graphique du modèle, des améliorations pourront être réalisées sur cette fonction, qui pourra également bénéficier de la réduction du temps de calcul.

De plus, le modèle pourrait être adapté aux demandes d'études par l'ajout de nouveaux paramètres permettant d'affiner les résultats. Par exemple, la vitesse de déplacement pourrait être définie par zone afin de mieux calculer les temps de parcours des engins de manutention en particulier dans le cas d'un terminal très étendu géographiquement. La problématique de la congestion des flux pourrait également faire l'objet d'un développement complémentaire.

Dans la même logique, des cas plus complexes pourraient être modélisés :

- présence de plusieurs quais maritimes ou ferroviaires,
- présence de plusieurs zones de scanning.

Enfin, dans le but de consolider complètement la simulation, le modèle pourrait faire l'objet d'une programmation dans un autre langage. Ceci impliquerait cependant un développement spécifique assez conséquent et dépasserait les enjeux initiaux de la présente étude.

5 - Conclusion

Le travail mené par le PCI MOD² (Pôle de Compétences et d'Innovation, Méthodes, Outils et Démarches pour la Modélisation et l'Organisation des Déplacements) pour déployer ce modèle a permis :

- d'entamer une démarche de meilleure connaissance des flux de conteneurs sur un terminal portuaire ;
- de quantifier les moyens disponibles nécessaires, en termes d'engins de manutention et du dimensionnement des possibilités de scanning ;
- de vérifier les interactions entre les différentes tâches à effectuer, notamment liées au ferroviaire, pour lequel le modèle a été plus finement détaillé.

Compte tenu de la relative complexité de la démarche de modélisation, la question de l'intérêt du développement d'un tel modèle microscopique pour répondre à des problématiques de dimensionnement optimal de moyens peut être posée.

Aussi, l'analyse ci-dessus permet de mettre en évidence que le choix d'une modélisation microscopique permet de s'assurer de la bonne prise en compte de toutes les étapes nécessaires au bon fonctionnement du terminal portuaire.

Cette démarche est d'autant plus intéressante, qu'au contraire d'une approche mathématique moyenne, ce choix permet d'offrir une représentation géographique des différentes étapes du calcul ainsi qu'une représentation de l'évolution de plusieurs paramètres au cours de la modélisation. Tout ceci justifie pleinement le choix de retenir une telle approche.

Nous pouvons également citer la particularité de l'activité portuaire, relativement bien organisée et particulièrement adaptée à la mise en place d'une modélisation fondée sur la transcription de règles d'usage bien définies.

Enfin, bien que l'étude initiale était orientée sur la problématique des uniques flux de conteneurs à l'export en provenance des seuls modes ferroviaires et fluviaux, la simulation développée dans ce rapport permet de modéliser l'ensemble des flux d'import et d'export de conteneurs tous modes de transports confondus. Cette approche pourrait donc également être utilisée dans le cas d'études plus larges sur la problématique générale de la mise en place du scanning dans les terminaux portuaires.

Annexes

Annexe A - Présentation du paramétrage de la simulation

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L			
1															
2	Données d'entrées														
3	Général				temps de pause entre deux affichage de la carte	100	sonore finale		VRAI						
4	Heure de début de simulation		8	Pas de la simulation (en s)		2									
5	Heure de fin de simulation		22	Nb de réplication		4									
6	Pas d'affichage		2	Activation affichage (Vrai ou Faux)		FAUX									
7															
8	Conteneurs														
9	Nombre de conteneurs														
10	export		import		A Scanner (export)										
11	Fer		60	60	60										
12	Fleuve		50	50	50										
13	Route		200	200	0										
14															
15															
16	Scan														
17	Taux de scanning (fer)		100%												
18	Taux de scanning (fleuve)		100%												
19	Taux de scanning (route)		0%												
20	Temps de scan moyen d'un conteneur (en minutes)		20												
21	Capacité du scanner en simultannée		7												
22	Route scannée comme fer et fleuve (réplication)		FAUX												
23															
24															
25	Manutention														
26	Moyens disponibles														
27															
28	Reach staker		4												
29	Cavaller		13												
30	Taux de mouvements parasites		60%												
31															
32	temps par opération		reach staker		cavaller		temps d'opérations en secondes					reach staker		cavaller	
33	dechargement train		25	x			dechargement train		50	x					
34	chargement train		25	x			chargement train		50	x					
35	dechargement FL		15		10		dechargement FL		30		20				
36	chargement FL		15		10		chargement FL		30		20				
37	dechargement stock age		15		20		dechargement stock age		30		40				
38	chargement stock age		15		15		chargement stock age		30		30				
39	vitesse cavaller		x		1	x	vitesse par type d'engin		reach staker		cavaller				
40	vitesse RS				1	x	vitesse (en km/h)		7,2		7,2				
41															
42	Variable pour le programme, à ne pas changer														
43															
44			Type	Nb de cellules											
45	Vide		0	896											
46	Zone échange train/stockage		1	102											
47	Zone échange train/stockage		2	255											
48	Zone stockage conteneur		3	2018											
49	Voie circulation engin manutention uniquement		4	1104											
50	Zone scanning		5	351											
51	Zone scanning		6	41											
52	Train		7	40											
53	Maritime		8	84											
54															
55	Taille Plan Horizontal (en cellules)		67												
56	Taille Plan Vertical (en cellules)		73												
57	Facteur de Proportionnalité Horizontale/verticale		3												

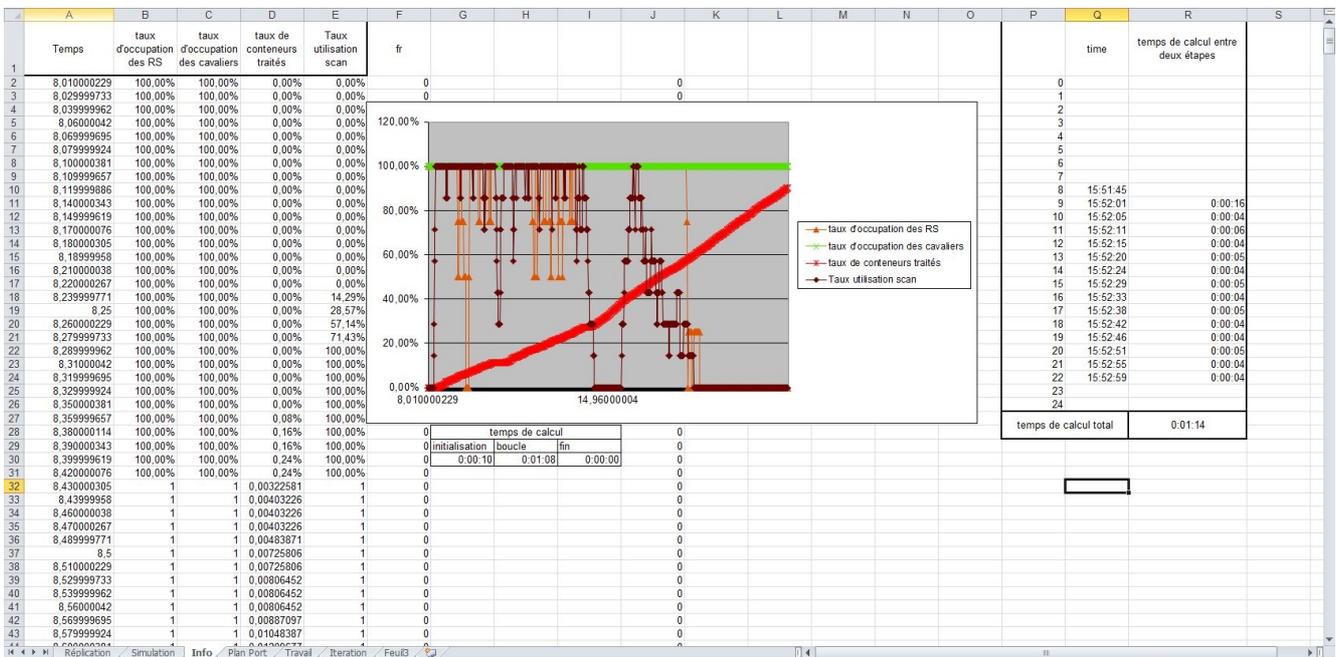
**légende
à compléter
information**

Numéro du train	Train							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Heure arrivée	8:00	10:30	14:00					
Heure départ	10:30	14:20	19:00					
Nb conteneur export	20	20	20					
Nb conteneur import	20	20	20					

Annexe C - Présentation des résultats bruts de la simulation

rapport		Horaires	Nombre de conteneurs en cours de manutention					Train 1 Train2 Train3 Train4 Train5						
		22,0	3		arrivée réelle		8		10,5		14			
			Nombre de conteneurs arrivés à "bon port"		départ réel		9,14		11,61		15,09			
			1167											
			Capacité du scan		Nombre de conteneurs scannés		Nombre de RS occupés		indicateurs synthétiques		taux d'occupation des Reach-taux d'occupation des cavaliers		66%	
			7		110		0				taux d'occupation des cavaliers		100%	
			Utilisation du scan		vérif : scan en cours		Nombre de cavaliers occupés				taux d'occupation du scan		50%	
			0		0		13				Nombre de mvt par heure et par cavalier		6,5879	

Le Train numéro 1 était prêt à partir à 9,14 h, avant l'heure de départ prévu : avance de 1,36 h
 Le Train numéro 2 était prêt à partir à 11,61 h, avant l'heure de départ prévu : avance de 2,72 h
 Le Train numéro 3 était prêt à partir à 15,09 h, avant l'heure de départ prévu : avance de 3,91 h
 Opération non terminée, il reste 94 conteneurs à manutentionner, sur un total de 1240 Nombre de conteneurs déplacés : 1146



Glossaire

Cavalier :	Engin de manutention de conteneurs se positionnant au-dessus de sa charge, très mobile. Il assure le gerbage des conteneurs. Sa vitesse est de 25 km/h. Certains cavaliers actuellement en service à Graveleau peuvent travailler sur 4 hauteurs
CETMEF :	Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales
CETE :	Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement
EVP :	Equivalent Vingt Pieds (unité traditionnellement utilisée dans le domaine du transport intermodal)
Faisceau ferroviaire :	Ensemble de voies de garage parallèles
GPMM :	Grand Port Maritime de Marseille
RST :	Réseau Scientifique et Technique
Reach-Stacker (RS) :	engin de manutention permettant de déplacer les conteneurs par le biais d'un bras articulé. Il permet le déchargement des trains (opération impossible à réaliser par les cavaliers).
TMJA :	Trafic Moyen Journalier Annuel

Index des illustrations

Figure 1 : engins de manutention utilisés (reach-stacker à g. ; cavalier à d.)	7
Figure 2 : identification des différentes « zones » du terminal et de l'organisation des flux au sein du terminal (exemple d'Eurofos sans les flux vers liés au scanning).....	8
Figure 3 : architecture du modèle.....	10
Figure 4 : représentation du plan du terminal modélisé dans Excel.....	11
Figure 5 : exemple de déplacements générés, pour un conteneur ferroviaire en export.....	11
Figure 6 : extrait de la page des résultats agrégés de la simulation.....	14
Figure 7 : exemple d'affichage (début de simulation à l'arrivée du train).....	15
Figure 8 : évolution des résultats en fonction du taux de scan des conteneurs – modes fluvial et ferroviaire.....	16
Figure 9 : évolution des résultats en fonction du taux de scan des conteneurs – tous modes.....	17
Figure 10 : évolution des moyens nécessaires selon le taux de scan.....	17

Page laissée blanche intentionnellement

Pôle de Compétences et d'Innovation

"Méthodes, Outils et Démarches pour la Modélisation et l'Organisation des Déplacements"

Ce document a été élaboré sous le pilotage du Sétra par le PCI "Méthodes, Outils et Démarches pour la Modélisation et l'Organisation des Déplacements".

Le PCI vise à proposer des évolutions dans la manière de conduire les études de déplacements afin de pouvoir répondre aux attentes sociétales complexes relevant directement ou indirectement de ce domaine d'investigations. La modélisation des déplacements est donc la cible principale du PCI mais il a aussi vocation à proposer, spécifier ou améliorer d'autres démarches, méthodes et outils pour permettre une prise en compte plus large et plus efficace des enjeux de déplacements.

Le PCI est situé au CETE Normandie Centre.

Le rapport présente la démarche suivie par le PCI Modélisation pour développer un modèle de simulation des flux de conteneurs sur un terminal portuaire. Cette approche microscopique a notamment permis d'estimer les impacts de la mise en place des procédures de scanning pour les conteneurs à l'export.

Rédacteurs

Michaël SAVARY – CETE Normandie-Centre

téléphone : 02 35 68 82 46

mél : michael.savary@developpement-durable.gouv.fr

Guillaume BENNET – CETE Normandie-Centre

mél : guillaume.bennet@developpement-durable.gouv.fr

Rémi CORGET – CETE Normandie-Centre

mél : remi.corget@developpement-durable.gouv.fr

Référent SETRA

Charlotte COUPE

mél : charlotte.coupe@developpement-durable.gouv.fr

Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements
110, rue de Paris - SOURDUN – BP 124 – 77487 PROVINS Cedex – France
téléphone : 33 (0)1 60 52 31 31 – télécopie : 33 (0)1 60 52 31 69

Document consultable et téléchargeable sur les sites web du Sétra :

- Internet : <http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr>
- Intranet (Réseau ministère) : <http://intra.setra.i2>

Ce document ne peut être vendu. La reproduction totale du document est libre de droits.

En cas de reproduction partielle, l'accord préalable du Sétra devra être demandé.

© 2013 Sétra – Référence : 1323w – ISRN : EQ-SETRA--13-ED19--FR

Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique
du MEDDE

