

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE CONCENTRATION GÉNIE INDUSTRIEL

PAR
ÉLOISE GOUDREAU

ANALYSES DES IMPACTS DE L'IMPLANTATION D'UN SYSTÈME DE
RENDEZ-VOUS SUR LE TRAFIC ROUTIER DANS UN PORT
MANUTENTIONNANT DES PRODUITS NON CONTENEURISÉS

SEPTEMBRE 2018

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

Ce mémoire a été dirigé par :

Chantal Baril, directrice de recherche, ing. Ph.D.

Génie industriel

Jury d'évaluation du mémoire

Chantal Baril, ing. Ph.D.

Génie industriel

David Lupien St-Pierre, ing. Ph.D.

Génie industriel

Viviane Gascon. Ph.D.

École de gestion

Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement Mme Chantal Baril sans qui ce travail n'aurait jamais été ce qu'il est aujourd'hui. Grâce à sa patience, son expertise et son soutien, j'ai pu apprendre énormément autant sur le plan professionnel que sur le plan personnel. Elle a su me motiver et me conseiller lorsque j'en avais besoin. Malgré les embuches, elle a toujours été présente pour moi et cela a fait une grande différence dans mon parcours.

Je tiens également à remercier Mme Vivianne Gascon pour sa grande rigueur et ses précieux conseils tout au long du projet ainsi qu'à tous ceux qui ont participé à la collecte de données au port.

Finalement, je me dois de remercier l'équipe de direction du port dans lequel l'étude a été menée ainsi que les gestionnaires des différentes entreprises avec qui l'étude a été réalisée. Sans eux, le projet n'aurait jamais vu le jour.

Résumé

Cette recherche a pour but d'approfondir les connaissances sur les moyens à mettre en place pour diminuer le temps d'attente des camions dans un port manutentionnant des produits non conteneurisés. Puisque ce temps d'attente est principalement engendré par un taux d'arrivée des camions plus grand que la capacité des ressources à les charger ou les décharger, l'instauration d'un système de rendez-vous est proposée. Plus précisément, le but de la recherche est de déterminer l'impact de l'instauration d'un système de rendez-vous sur le temps de passage total des camions et le taux d'utilisation des ressources dans un port ne manutentionnant pas de produits conteneurisés. Pour ce faire, quatre facteurs ont été étudiés. Deux de ces facteurs sont des facteurs contrôlables (durée des plages de rendez-vous et méthode de gestion des camions en avance ou en retard à leur rendez-vous) alors que les deux autres sont des facteurs incontrôlables dits facteurs bruits (nombre de camions se présentant au port par jour et proportion des camions arrivant en avance ou en retard à leur rendez-vous). Enfin, les variables dépendantes étudiées sont le temps de passage des camions, le temps d'attente et le taux d'utilisation des ressources. Chacun de ces facteurs a trois niveaux. Un plan d'expérience Taguchi croisé a été mis sur pied afin de tester toutes les combinaisons des facteurs. Pour obtenir les résultats du plan d'expérience, un modèle de simulation à événements discrets a été construit à l'aide du logiciel Arena. Pour alimenter le modèle, une collecte de données a été effectuée. Une fois les résultats obtenus à l'aide du modèle de simulation, une analyse de la variance a été effectuée. Pour tous les facteurs ou les interactions significatifs, un test de Newman-Keuls a été effectué afin de déterminer le niveau du facteur qui permettait d'optimiser la réponse. Pour les facteurs incontrôlables (bruits) une analyse du rapport signal/bruit a été effectuée dans le but de déterminer la solution la plus robuste. Pour les deux analyses, 2 solutions sont recommandées.

- 1) Plage de rendez-vous de 2H80 et méthode de gestion FIFO
- 2) Plage de rendez-vous de 2H80 et méthode de gestion PRIORITÉ

Cette recherche contribue à faire augmenter les connaissances sur l'impact de l'instauration d'un système de rendez-vous dans un port sans conteneurisation et sur les mesures à prendre pour l'instaurer. Dans une industrie en plein essor comme l'industrie portuaire au Québec, il est intéressant de connaître les possibilités qui s'offrent aux ports ainsi que de tester d'autres possibilités avec un modèle de simulation avant de l'instaurer.

Table des matières

Remerciements.....	iii
Résumé	iv
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux	ix
Chapitre 1 : Introduction et mise en contexte	11
1.1 L'industrie maritime au Québec	11
1.2 La problématique du trafic routier dans les ports	12
1.3 Objectif principal	13
1.4 Objectifs secondaires	13
Chapitre 2 : Revue de littérature	15
2.1 Ports manutentionnant des marchandises conteneurisées	17
2.1.1 Diverses solutions pour diminuer la congestion.....	17
2.1.2 Instauration de rendez-vous ou de fenêtres de rendez-vous	20
2.1.3 Résultats des ports ayant déjà implanté un système de rendez-vous pour les véhicules lourds	27
2.2 Ports manutentionnant des marchandises générales et en vrac	30
2.3 Constats suite à la revue de littérature.....	31
Chapitre 3 : Méthodologie de la recherche.....	35
3.1 Étude de cas : présentation du port à l'étude.....	35
3.2 Conception du modèle de simulation	40
3.2.1 Modélisation.....	40
3.2.2 Animation du modèle de simulation.....	48
3.2.3 Horizon de simulation.....	48
3.2.4 Validation du modèle de simulation	49
3.3. Étendue de l'expérimentation	50
3.4 Scénarios préliminaires	51
3.4.1 Scénario 1 : mise en place d'un système de rendez-vous.....	51
3.4.2 Scénario 2 : Ajout d'un puits de déchargement (produit PG1)	51
3.4.3 Scénario 3 : Ajout d'un trafic routier (produit PX).....	52
3.5 Conception du plan d'expérience.....	53
3.5.1 Variables indépendantes contrôlables.....	53
3.5.2 Variables indépendantes incontrôlables (bruits)	54
3.5.3 Variables dépendantes	56
3.5.4 Modèles mathématiques des plans d'expérience	56

Chapitre 4 : Résultats et analyse des scénarios préliminaires.....	58
4.1 Trajectoires des produits PG1 et PF	58
4.2 Scénario 1 : système de rendez-vous.....	65
4.2.1 Système de rendez-vous à heure fixe	65
4.2.2 Système de rendez-vous plages de 4 heures avec arrivée aléatoire	66
4.2.3 Système de rendez-vous plages de 4 heures 80/20.....	68
4.2.4 Système de rendez-vous 2 heures 80/20	70
4.2.5 Constats suite au scénario concernant l'instauration d'un système de rendez-vous.....	72
4.3 Scénario 2 : ajout d'un puits	73
4.4 Scénario 3 : ajout d'un produit PX	74
Chapitre 5 : Résultats et analyse des plans d'expériences.....	77
5.1 Analyses pour le produit PG1	77
5.1.1 Analyse du temps de passage total.....	77
5.1.2 Analyse du taux d'utilisation des ressources	82
5.1.3 Conclusion de l'analyse pour le produit PG1	85
5.2 Analyse pour le produit PF	87
5.2.1 Analyse du temps de passage total.....	87
5.2.2 Analyse du taux d'utilisation des ressources	93
5.2.3 Conclusion de l'analyse pour le produit PF	97
5.3 Conclusion.....	99
Chapitre 6 : Conclusion.....	100
6.1 Synthèse de la recherche	100
6.2 Limitations de la recherche.....	101
6.3 Contributions de la recherche	102
6.4 Avenues futures de la recherche	102
6.5 Conclusion.....	104
Références	105
Annexe	108
Annexe 1	108
Annexe 2	120
Annexe 3	132
Annexe 4	135

Liste des figures

Figure 1 : Répartition des taux d'arrivée des camions	42
Figure 2 : Cartographie du produit PG1	60
Figure 3 : Schéma de la zone d'échantillonnage et de déchargement du produit PG1 ..	61
Figure 4 : Cartographie du produit PF	62
Figure 5 : Diagramme de circulation du produit PG1	64
Figure 6 : Diagramme de circulation du produit PF	64
Figure 7 : effet du facteur RDV sur le temps de passage PG1	79
Figure 8 : Effet du facteur RDV sur temps de passage PF	89
Figure 9 : Effet du facteur Gestion A/R sur le temps de passage PF	90

Liste des tableaux

Tableau 1 : Indicateurs utilisés dans le domaine portuaire	32
Tableau 2 : Facteurs utilisés dans le domaine portuaire.....	32
Tableau 3 : Utilisateurs et produits manutentionnés.....	36
Tableau 4: Modes de transport et entreposage des produits.....	37
Tableau 5 : Trafic maritime et routier pour l'année 2016	39
Tableau 6 : Nombre de camions observés aux guérites.....	41
Tableau 7 : Distributions statistiques associées à la guérite.....	44
Tableau 8: Distributions statistiques associées au temps passé à la balance	45
Tableau 9 : Temps de chargement et de déchargement par produit observés	46
Tableau 10 : Distributions statistiques spécifiques au produit PG1	47
Tableau 11 : Temps de passage moyen observé et simulé.....	49
Tableau 12 : Nombre de camions attendus par jour en fonction du type de produit et du pourcentage de la capacité maximale	55
Tableau 13 : Temps de passage et nombre de camions en attente pour rendez-vous à heure fixe.....	66
Tableau 14 : Nombre de camions de PG1 généré par heure pour système de rendez-vous 4 heures aléatoires	67
Tableau 15 : Nombre de camions de PF généré par heure pour système de rendez-vous 4 heures aléatoires	67
Tableau 16 : Résultats de la simulation des 10 séries de nombres aléatoires pour système de rendez-vous 4 heures aléatoires	68
Tableau 17 : Nombre de camions de PG1 simulé par heure pour système de rendez-vous 4 heures 80/20	68
Tableau 18 : Nombre de camions de PF simulé par heure pour système de rendez-vous 4 heures 80/20.....	69
Tableau 19 : Résultats de la simulation pour système de rendez-vous 4 heures 80/20.	69
Tableau 20 : Nombre de camions de PG1 simulé par heure pour système de rendez-vous 2 heures 80/20	70
Tableau 21 : Nombre de camions de PF simulé par heure pour système de rendez-vous 2 heures 80/20.....	71
Tableau 22 : Résultats de la simulation pour système de rendez-vous 2 heures 80/20.	71
Tableau 23 : Résumé des résultats obtenus pour le scénario 1	72
Tableau 24 : Résultats obtenus avec la simulation pour le scénario 2.....	73
Tableau 25 : Nombre de camions simulés selon le scénario 3.....	75
Tableau 26 : Temps de passage et longueur des files d'attente pour le produit PX.....	75
Tableau 27 : Probabilité de débordement à l'extérieur du terminal en fonction de la capacité de la zone d'attente.....	76
Tableau 28 : Temps de passage obtenu grâce à la simulation.....	78
Tableau 29 : Analyse de la variance pour le produit PG1 concernant le temps de passage total	78
Tableau 30 : Temps de passage obtenu grâce à la simulation PG1	80
Tableau 31 : Analyse de la variance pour le produit PG1 concernant le temps de passage total	81
Tableau 32 : Rapport signal/bruit pour le temps de passage total pour le produit PG1 ..	82

Tableau 33 : Taux d'utilisation obtenus grâce à la simulation.....	83
Tableau 34 : Analyse de la variance pour le produit PG1 concernant le taux d'utilisation des ressources	83
Tableau 35 : Taux d'utilisation obtenus grâce à la simulation pour le produit PG1	84
Tableau 36 : Analyse de la variance pour le produit PG1 concernant le taux d'utilisation des ressources	84
Tableau 37 : Rapport signal/bruit pour le taux d'utilisation des ressources pour le produit PG1	85
Tableau 38: Résumé des résultats de l'analyse de la variance et des rapports signal/bruit pour le produit PG1.....	86
Tableau 39 : Temps de passage obtenus grâce à la simulation pour le produit PF	88
Tableau 40 : Analyse de la variance pour le produit PF concernant le temps de passage total.....	88
Tableau 41 : Temps de passage obtenus grâce à la simulation pour le produit PF	91
Tableau 42 : Analyse de la variance pour le produit PF concernant le temps de passage total.....	91
Tableau 43 : Rapport signal/bruit pour le temps de passage total pour le produit PF	92
Tableau 44 : Taux d'utilisation obtenus grâce à la simulation.....	93
Tableau 45 : Analyse de la variance pour le produit PF concernant le taux d'utilisation des ressources	94
Tableau 46 : Taux d'utilisation obtenus grâce à la simulation PF	95
Tableau 47 : Analyse de la variance pour le produit PF concernant le taux d'utilisation des ressources	95
Tableau 48 : Rapport signal/bruit pour le taux d'utilisation des ressources pour le produit PF.....	96
Tableau 49 : Résumé des résultats de l'analyse de la variance pour le produit PF	97

Chapitre 1 : Introduction et mise en contexte

1.1 L'industrie maritime au Québec

La province du Québec, bordée par l'océan Atlantique et la baie d'Hudson, est prédisposée à une industrie maritime prospère. En effet, à elle seule, la partie nord du Québec comporte plus de 2 700 km de berge et la vallée du St-Laurent est la principale porte d'entrée du nord-est de l'Amérique du Nord puisqu'elle est le chemin le plus court entre deux des zones les plus industrialisées au monde soient le centre de l'Amérique et l'Europe. De plus, l'industrie maritime contribue grandement à développer l'économie au sein de la province grâce aux 25 000 emplois directs et à la vingtaine de ports actifs. Enfin, près de 70% de la population québécoise vit dans la vallée du St-Laurent et plusieurs entreprises s'installent dans cette zone afin d'être à proximité du transport maritime pour atteindre leurs marchés local et international.

Afin de continuer à développer l'industrie maritime, le gouvernement du Québec a mis sur pied, en 2015, la Stratégie maritime ayant pour objectif de créer 30 000 emplois et de développer un réseau maritime prospère et durable au Québec d'ici 2030. Cette stratégie a été développée sur trois grands volets soient : l'économie, l'environnement et le développement social. L'objectif du volet économique est d'atteindre des investissements publics et privés d'environ 9 milliards de dollars d'ici 2030. Afin d'atteindre cet objectif, 10 axes d'intervention ont été identifiés dont : investir dans les infrastructures, développer des zones industrialo-portuaires et favoriser le développement des connaissances dans le domaine maritime. Le volet environnemental a pour objectif de protéger les écosystèmes du territoire maritime puisque 40% de la population du Québec utilise le fleuve Saint-Laurent comme principale source d'eau potable et l'objectif du volet social est d'améliorer la qualité de vie des populations vivant en région et près des ports. ¹ Ce contexte oblige les administrations portuaires présentes dans la vallée du St-Laurent à

¹ <https://strategiemaritime.gouv.qc.ca>

améliorer la performance de leurs opérations portuaires. La performance se mesure, entre autre, par le taux de roulement des produits entreposés dans les ports, ce qui les amène à repenser le trafic routier, ferroviaire et maritime sur une base régulière. Le projet de recherche proposé dans ce mémoire s'inscrit donc dans cette perspective d'amélioration de la performance et s'intéresse particulièrement au trafic routier.

1.2 La problématique du trafic routier dans les ports

Le trafic routier dans les ports engendre assurément toute sorte de problèmes : de la congestion, de l'attente, des pertes de temps, des coûts excédentaires, du bruit et évidemment des dommages à l'environnement par l'émission de gaz CO₂, d'où l'intérêt pour les administrateurs de trouver des solutions afin de mieux gérer ce trafic.

Les enjeux pour les ports concernant le trafic routier sont différents selon le type de marchandise manutentionnée. Les types de produits manutentionnés dans les ports sont des conteneurs, de la marchandise générale et des produits en vrac. Dans les ports manutentionnant des conteneurs, les files d'attente se retrouvent principalement aux guérites alors que les ports sans produits conteneurisés (marchandises générales et produits en vrac) engendrent plutôt des files d'attente au lieu de chargement ou de déchargement. De plus, le temps pour décharger ou charger un conteneur sur un véhicule lourd ne dépend pas du produit transporté alors que pour la marchandise non conteneurisée, ce temps varie énormément en fonction du produit. Enfin, le taux d'utilisation des grues, le lieu d'entreposage des conteneurs et leurs dispositions sur le terminal ainsi que le taux d'arrivée des véhicules sont les principaux enjeux des ports manutentionnant des produits conteneurisés (Dekker et al., 2013) alors que le temps de chargement ou de déchargement ainsi que le taux d'arrivée des véhicules sont les principaux enjeux des ports manutentionnant de la marchandise non conteneurisée.

Bien que les enjeux dans les deux types de ports soient différents, la congestion routière est bien présente dans les deux cas. Pour contrer ces problèmes grandissant dans les ports, plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'instauration

d'un système de rendez-vous principalement dans les ports avec conteneurisation. En effet, la revue de la littérature sur ce sujet a démontré que peu d'études existent dans les ports manutentionnant de la marchandise générale et des produits en vrac. Il convient donc de se demander comme première question de recherche, comment il est possible d'instaurer un système de rendez-vous dans un port manutentionnant des produits non conteneurisés ? La mise en place d'un système de rendez-vous nous amène aussi à réfléchir sur le non-respect de ces rendez-vous (camion en retard, absent, etc.) et à se poser une deuxième question de recherche : comment est-il possible de gérer le non-respect des rendez-vous ?

1.3 Objectif principal

Ce mémoire a pour objectif d'analyser l'impact de l'instauration de système de rendez-vous et de différentes stratégies de gestion de non-respect des rendez-vous sur la congestion routière et plus particulièrement sur le temps d'attente des camions dans le contexte d'un port sans conteneurisation. Une étude de cas dans un port québécois est présentée. Ce port fait partie des ports stratégiques du Québec dû à sa localisation. Ce port, manutentionnant des marchandises générales et des produits en vrac, est non seulement bien situé entre deux grandes villes commerciales, mais il est à proximité d'un grand réseau ferroviaire et routier. Le port accueille chaque année plus de 250 navires dont 70% du tonnage provient de l'international, il comporte actuellement 2,7 km de quais et 80 000 m² de surface d'entreposage extérieur. Par contre, puisque le port est situé en pleine ville, les possibilités d'agrandissement sont plutôt restreintes.

1.4 Objectifs secondaires

Des objectifs secondaires ont aussi été déterminés à partir des questions de recherche. Le premier objectif est de vérifier la robustesse des systèmes de rendez-vous et des politiques de gestion concernant le non-respect des rendez-vous lorsque ces facteurs sont soumis à des bruits. Un bruit est un facteur incontrôlable qui peut influencer la performance d'un système, dans notre cas, le temps d'attente des camions. Les facteurs bruits qui sont étudiés dans cette

recherche sont le nombre de camions attendus par jour et la proportion de camions déviant de leur plage de rendez-vous.

Pour réaliser le deuxième objectif secondaire, un modèle de simulation à événements discrets de l'ensemble du trafic routier au port sera utilisé. Cet objectif est d'ordre plus pratique et consiste à tester divers scénarios avec le modèle de simulation afin de guider les administrateurs du port à l'étude dans leur prise de décision. En fait les questions suivantes seront répondues :

- 1) Pour le produit en vrac PG, déterminer si l'ajout d'un puits de déchargement (aux deux puits déjà existants) permettrait de décharger 120 camions/jour de 8H et 240 camions/jour de 16H. Déterminer aussi si la sonde d'échantillonnage pourrait fournir les trois puits de déchargement.
- 2) Déterminer si le trafic routier engendré par l'entreposage d'un nouveau produit PX a un impact sur le trafic routier actuel.

Ce mémoire présente les principales étapes réalisées pour atteindre les objectifs présentés précédemment. Une revue de littérature permettant d'identifier les moyens proposés pour diminuer la congestion routière ainsi que les différents systèmes de rendez-vous proposés sera présentée au chapitre 2. La méthodologie employée sera présentée au chapitre 3 et les expérimentations faites sur le terrain seront présentées au chapitre 4. Les résultats du plan d'expérience seront présentés et analysés au chapitre 5 ainsi que des recommandations. Enfin, une conclusion qui permettra de présenter les contributions scientifiques et pratiques de ce projet ainsi que les avenues futures sera présentée au chapitre 6.

Chapitre 2 : Revue de littérature

De façon générale, la congestion routière résulte d'un déséquilibre entre le nombre de véhicules en circulation et la capacité d'un réseau (routier, port, etc.) à les accueillir. Ce déséquilibre est causé par différents facteurs, dont l'environnement économique et les nouvelles pratiques logistiques (Moustakbal, 2009). Selon Mineta (2006), la prospérité économique de la société moderne est une cause directe de la congestion routière et celle-ci constitue un fléau, autant pour les citoyens que pour les entreprises, puisqu'elle engendre des pertes de temps énormes. Cherry et Adalakun (2012) affirment que le coût relié aux ajustements d'itinéraire afin d'éviter la congestion est plus élevé que le coût associé à la congestion ce qui explique pourquoi 42% des camionneurs ne modifient pas leur itinéraire.

Le trafic croissant de camions dans les ports suscite un intérêt marqué pour l'élaboration de nouvelles politiques afin d'éviter la congestion et assurer la fluidité et la sécurité de la circulation. Les deux raisons majeures qui expliquent les travaux sur la congestion routière sont les pertes de temps causé par les temps d'attente dans les zones portuaires (Guan et Liu, 2009) ainsi que les problèmes environnementaux causés par l'émission de CO₂ des véhicules lourds en attente dans le port (Phan et Kim, 2016).

En effet, puisque la majorité des camionneurs sont payés au nombre de livraisons qu'ils font dans une journée et non à l'heure, les temps d'attente dans les zones portuaires diminuent les revenus que les camionneurs obtiennent et ainsi, diminuent les impôts perçus par les gouvernements (Guan & Liu, 2009). Il y aurait donc un intérêt, pour le grand public, à diminuer le temps d'attente des véhicules lourds dans les zones portuaires, car toute la chaîne logistique est perturbée lorsque les temps d'attente sont élevés, ce qui entraîne une augmentation des coûts des produits. Dans son étude, Moustakbal (2009) mentionne que le coût d'un véhicule lourd en attente, estimé par le *Federal Highway Administration (FHWA)* et le *Texas Transportation Institute study*, est de 32,15\$ par heure.

Moustakbal (2009) affirme également qu'au Canada, en 2002, la congestion routière dans les principales zones urbaines a coûté entre 2,3 milliards de dollars et 3,7 milliards de dollars. De ce montant, 90% proviendrait du temps perdu par les véhicules en circulation et environ 7% de ce montant représenterait le carburant consommé inutilement. Il est à noter que ces statistiques tiennent compte de l'ensemble de la congestion routière et non seulement de la congestion dans les zones portuaires. De plus, Kim et al. (2003) affirme que le temps d'attente des véhicules lourds dans un port est le principal indicateur du service à la clientèle. Ceci signifie que l'administration portuaire doit travailler à diminuer le temps de passage des véhicules pour attirer de nouveaux clients et conserver ses clients actuels.

Phan et Kim (2016) affirment qu'une des raisons principales pour lesquelles des études portent sur le trafic routier dans les ports est que la congestion routière dans les zones portuaires cause de sérieux problèmes environnementaux dus à l'émission de CO₂ des véhicules en attente. Selon Lee et al. (2009), le transport de marchandises des ports de Los Angeles et de Long Beach représente 10% des émissions de NO (monoxyde d'azote) de l'état de la Californie. Ils affirment que les particules émises par les véhicules au diesel causent de sérieux problèmes pour la santé de la population, entre autres, des problèmes respiratoires et la mort prématurée. De plus, les particules émises par les véhicules lourds venant livrer de la marchandise aux ports seraient responsables de 70% des cancers causés par la pollution de l'air dans la région. Des constatations semblables ont été faites dans les ports de Piraeus en Grèce (Tzannatos, 2010) et en Belgique (De Meyer et al., 2008).

La littérature sur les ports peut être divisée en deux grandes catégories : les ports avec marchandises conteneurisées et ceux sans marchandises conteneurisées. Bien que cette étude porte sur les ports sans conteneurisation, il est tout de même intéressant de connaître les travaux réalisés dans les ports avec conteneurs afin d'identifier les diverses solutions mises en place, leurs impacts sur les temps

d'attente et vérifier celles pouvant être implantées dans les ports sans conteneurisation.

2.1 Ports manutentionnant des marchandises conteneurisées

La littérature sur les ports manutentionnant des marchandises conteneurisées comporte plusieurs études sur la mise en place de systèmes de rendez-vous et d'autres, plus diversifiées, sur la mise en place de pratiques concernant les activités de chargement et de déchargement, de pesée et de communication. Cette section est donc divisée en 2 parties.

2.1.1 Diverses solutions pour diminuer la congestion

Plusieurs solutions sont étudiées dans la littérature pour diminuer le trafic routier dans les zones portuaires. Certains auteurs proposent de modifier certaines pratiques. Voici quelques exemples :

Kulick et Garcia (2005) ont utilisé la simulation à événements discrets afin de déterminer si un système portuaire agile pouvait augmenter les revenus. Un système portuaire est agile lorsque les conteneurs sont chargés dans le navire à partir d'un wagon et que les conteneurs à décharger du même navire sont chargés directement sur le wagon qui vient d'être déchargé. De cette manière, un seul wagon est nécessaire pour l'expédition et la réception d'un conteneur et le conteneur est prêt à être livré directement à son destinataire (si la livraison se fait par train) sans avoir à utiliser un autre mode de transport (le camion, par exemple). Cela permet de limiter le nombre de manipulations et ainsi diminuer les temps d'attente. Ils concluent qu'un système portuaire agile peut augmenter les gains monétaires (en diminuant, entre autre, les coûts reliés au transport) mais qu'il demande une grande coordination entre les intervenants et que le nombre de ressources requises (main-d'œuvre et matériels) peut être estimé avec l'outil de simulation. Kia et al. (2002) ont fait sensiblement les mêmes travaux et arrivent aux mêmes conclusions sans toutefois parler de système portuaire agile.

Dekker et al. (2013) ont utilisé la simulation à événements discrets afin de déterminer si la méthode CET (*Chassis Exchange Terminal*) pouvait diminuer significativement le temps d'attente des camions aux zones de déchargement.

Cette méthode implique que le camion laisse sa remorque chargée de conteneurs au lieu de déchargement dans le port. Par la suite, le véhicule, sans sa remorque, se rend à la zone de chargement, pour attacher une autre remorque sur laquelle se trouvent déjà des conteneurs. Il quitte donc le port avec une nouvelle remorque en n'ayant pratiquement pas attendu puisque les conteneurs qu'il a livrés au port seront déchargés lorsque la ressource sera disponible et les conteneurs chargés étaient déjà prêts à être expédiés. Avec leur modèle de simulation, les auteurs ont pu déterminer que cette méthode permettait de diminuer significativement le temps d'attente des camions ainsi que les ressources nécessaires pour la mettre en place, car bien entendu, le nombre de conteneurs disponibles à la manutention devra augmenter.

Le port de Shahid Rajaei (Iran) a constaté une augmentation des temps d'attente des véhicules lourds devant être pesés due à la demande grandissante du port. Kiani et al. (2010) ont développé un modèle de simulation à événements discrets dans le but de déterminer l'impact de certaines modifications (installation d'une nouvelle balance, réparation d'une balance défectueuse et modification au processus de pesée) sur le nombre de véhicules en attente pour être pesés. Grâce à leur modèle, ils ont conclu que la modification du processus de pesée était l'option qui diminuait le plus le nombre de véhicules en attente et ainsi, qui diminuait le plus le temps de passage des véhicules lourds au port. Cette modification consiste à demander aux camionneurs de rester dans leur véhicule lors de la pesée. Par contre, les balances doivent être adaptées pour permettre aux camionneurs d'avoir accès à leur résultat de pesée sans sortir de leur véhicule. Les auteurs concluent que cette solution est la plus efficace en plus d'être la moins coûteuse. De plus, cette technologie a déjà été un succès dans les ports de Southampton, Felixtow, Liverpool et Singapore.

Sharif et al. (2011) propose une nouvelle approche pour diminuer les temps d'attente aux guérites durant les heures de pointe. Ils ont posé comme hypothèse que si les compagnies de transport ont accès en temps réel aux vidéos de surveillance des guérites, les temps d'attente diminueront puisque les compagnies

de transport planifieront l'arrivée de leurs véhicules en fonction du taux d'occupation des guérites. Pour déterminer si leur hypothèse était bonne, les auteurs ont développé un modèle de simulation et ont déterminé que cette technique pouvait effectivement diminuer le temps d'attente des véhicules aux guérites à condition que les chauffeurs changent leur comportement avec cette méthode.

Afin de diminuer le temps de passage des véhicules lourds dans un port, Chen et al. (2011) ont utilisé un modèle de programmation non linéaire pour déterminer le cycle optimal du taux d'arrivée des véhicules lourds en fonction des temps de service (stochastiques), mais ils ne précisent pas quel est le cycle optimal. Dans le but de faire respecter ce cycle optimal d'arrivée des camions, ils proposent d'instaurer un frais supplémentaire pour tous véhicules se présentant au port durant les heures d'achalandage. Par contre, aucune information n'est donnée sur les modalités de paiements.

Afin de déterminer si le port de Séville (port où la marchandise est conteneurisée) pouvait absorber une augmentation des produits transitant annuellement par le port, Cortés et al. (2007) ont développé un modèle de simulation à événements discrets. Ils ont utilisé les prévisions de la demande de marchandises et déterminé l'impact de celles-ci sur le temps de passage des navires dans le système, le taux d'utilisation des ressources et le temps des navires à quai. Ce modèle leur a permis de conclure que le port pourrait généralement absorber l'augmentation de la demande puisque les résultats de la simulation étaient concluants.

Thiers et Janssens (1998) se sont servis de la simulation pour déterminer l'impact de l'augmentation du trafic, d'une nouvelle planification de l'utilisation des quais, de l'ajout d'un quai et de l'ajout de pannes sur le temps d'attente des navires. Leur modèle leur a permis de prendre des décisions quant à la planification des quais et du programme de maintenance. Enfin, ils affirment que leur modèle est un excellent outil d'aide à la décision pour tous les projets futurs dans ce port.

2.1.2 Instauration de rendez-vous ou de fenêtres de rendez-vous

L'objectif visé par l'implémentation d'un système de rendez-vous est le contrôle du taux d'arrivée des camions au port. Pour mesurer l'impact des systèmes de rendez-vous sur le trafic routier, certains auteurs ont utilisé la simulation à événements discrets et d'autres la recherche opérationnelle. L'instauration de rendez-vous ou de fenêtres de rendez-vous pour les véhicules lourds venant livrer ou chercher de la marchandise dans un port a été plusieurs fois étudiée dans la littérature pour les ports manutentionnant de la marchandise conteneurisée (Guan & Liu, 2009; Huynh & Walton, 2008; Phan & Kim, 2016; Schulte et al., 2015; Zhang et al., 2013).

Guan et Liu (2009) ont élaboré un modèle mathématique à multiples serveurs pour évaluer les files d'attente aux guérites dans un port. Le modèle se base sur le fait que les camionneurs préfèrent que le temps d'attente aux guérites soit le plus faible possible et que les gestionnaires des ports préfèrent garder le nombre de guérites en fonction le plus bas possible tout en offrant un bon service aux camionneurs (dans le but de réduire les coûts d'opération des guérites). Ils ont donc établi un modèle pour déterminer le juste milieu entre le temps d'attente des camionneurs aux guérites et les coûts d'opération des guérites. Afin de valider leur modèle, ils ont étudié le port de New York/New Jersey, car le taux d'arrivée des camions dans ce port est très variable et le temps de service des guérites est plus ou moins stable. Ce port reçoit en moyenne 966 véhicules lourds entre 7h00 et 16h00 par jour. Grâce à leur modèle, ils concluent que l'implantation d'un système de rendez-vous permet de contrôler le taux d'arrivée des véhicules et ainsi diminuer le temps d'attente des véhicules aux guérites. Par contre, leur modèle ne tient pas compte des temps d'attente dans le reste de la zone portuaire. En effet, leur système de rendez-vous tient compte seulement de l'impact sur l'engorgement des guérites.

Chen et Yang (2010) proposent un modèle d'optimisation avec fenêtres de rendez-vous afin de minimiser le temps d'attente des véhicules lourds sur le terminal. Ils posent comme hypothèse que le taux d'arrivée des véhicules à l'intérieur du port est constant puisqu'il est contrôlé à la guérite. Le modèle permet de déterminer la

taille optimale des fenêtres de rendez-vous (pour venir décharger un conteneur) en fonction des navires qui se présentent au port. Pour résoudre leur modèle, ils ont utilisé un algorithme génétique et les données recueillies dans un port manutentionnant des produits conteneurisés de Chine. Ils concluent que l'optimisation des fenêtres de rendez-vous permet d'uniformiser le taux d'arrivée des véhicules lourds sur les terminaux lorsqu'un navire est en voie de chargement ainsi qu'une diminution des temps d'attente des camionneurs ce qui entraîne une diminution des émissions de CO₂ des véhicules lourds.

D'autres méthodes ont été étudiées dans le but de contrôler le taux d'arrivée des véhicules lourds dans un port. La méthode *vessel dependant time windows* (VDTW) permettant de contrôler l'arrivée de véhicules lourds au port a été développée par Chen, Govindan, et Yang (2013). Cette méthode consiste à déterminer le nombre de camions à affecter à une fenêtre de rendez-vous. La méthode se divise en trois étapes : 1) prédire l'arrivée des véhicules en se basant sur les fenêtres de rendez-vous 2) estimer la longueur des files d'attente engendrée par ces véhicules aux guérites 3) déterminer les fenêtres de rendez-vous pour minimiser les coûts totaux du système ce qui inclut, entre autres, les pertes de temps des camionneurs et la consommation de carburant des véhicules en attente. Pour déterminer si cette méthode permet d'uniformiser ou non le taux d'arrivée des véhicules, les auteurs ont réalisé une étude de cas dans un port à conteneurs en Chine pour alimenter leur algorithme génétique (modèle mathématique). Ils concluent que la méthode VDTW permet d'uniformiser le taux d'arrivée des véhicules. Par contre, ils affirment que cette méthode ne pourrait pas s'appliquer à tous les ports, car chaque port possède ses propres caractéristiques (type de produits manutentionnés, nombre de véhicules transitant par le port par jour, nombre de ressources disponibles ...). Enfin, ils soulignent que leur méthode permet seulement de minimiser le temps de passage aux guérites, et que régler ce problème ne règle pas nécessairement celui de la congestion à l'intérieur même du port. Ils suggèrent donc de créer un modèle multi objectifs pour tenir compte de la minimisation du temps d'attente à la guérite, mais aussi des opérations à l'intérieur du port.

Puisqu'une des grandes causes de la congestion routière dans les ports est le taux d'arrivée des véhicules variable et inconnu, Yang et al. (2010) ont travaillé à développer un modèle mathématique permettant de déterminer le taux d'arrivée des véhicules en fonction de certaines conditions (présence d'un navire à quai, température ...) pour l'ensemble des ports chinois. Pour ce faire, ils ont étudié les données sur les taux d'arrivée des véhicules dans les ports et ils ont distribué des questionnaires aux compagnies de transport dans le but de comprendre comment ils planifient leur déplacement vers les ports. Par la suite, ils ont trouvé les distributions qui représentent le mieux les données recueillies, autant dans les bases de données que dans le sondage, pour les situations les plus probables au port (navire à quai, forte pluie...). Ils ont conclu que leur modèle représentait bien la réalité spécialement lors des périodes de pointe, mais son utilisation n'est pas spécifiée.

Le fait de contrôler le taux d'arrivée des camions n'apporte pas seulement des gains économiques, il apporte aussi des gains environnementaux. En effet, Chen, Govindan, et Golias (2013) concluent, suite à l'utilisation de l'algorithme génétique avec des données recueillies dans un port en Chine, que de diminuer de 4% le taux d'arrivée des véhicules durant les heures d'achalandage peut diminuer du tiers l'émission de particules des véhicules en attente. Ils affirment qu'il est donc primordial de coordonner l'arrivée des véhicules au port afin de rendre le système plus efficient et diminuer les émissions des véhicules lourds en attente.

De plus, Do et al. (2014) proposent une nouvelle approche pour instaurer des fenêtres de rendez-vous afin de diminuer les émissions de gaz à effet de serre. En effet, ils proposent que chaque véhicule obtienne plusieurs fenêtres de rendez-vous et qu'il se présente au moment qui lui convient le mieux parmi ses fenêtres de rendez-vous. Cette méthode s'appelle *limited entering time slots (LETS)* et se base sur deux méthodes soit l'instauration de fenêtres de rendez-vous *terminal appointment system (TAS)* et la méthode proposée par (Chen, Govindan, Yang, et al., 2013) *vessel-dependant time windows (VDTW)*. Afin de déterminer si leur méthode pouvait réduire l'attente des véhicules lourds, les auteurs ont utilisé un

logiciel de simulation à événements discrets suivi d'un algorithme génétique pour déterminer comment affecter de manière optimale les fenêtres de rendez-vous aux camionneurs. Ils concluent que leur méthode permet de diminuer les émissions dégagées par les véhicules en attente dans le port. Par contre, leur étude se base seulement sur les conteneurs devant être importés (pour les véhicules qui viennent chercher des conteneurs au port). Enfin, les auteurs affirment qu'aucune analyse économique n'a été faite et qu'il serait important de le faire dans une prochaine étude pour s'assurer que l'implantation de cette méthode serait rentable. (Do et al., 2014)

Bien que l'instauration d'un système de rendez-vous semble donner de bons résultats (diminution du temps de passage des véhicules lourds, diminution du nombre de véhicules en attente, diminution des émissions de CO₂ des véhicules...), plusieurs compagnies de transport ont certaines résistances face à l'implantation de ce système. En effet, ce système restreint les compagnies de transport dans leur planification des véhicules lourds au port, car elle les oblige à respecter des fenêtres de rendez-vous. Pour contrer cette opposition, Phan et Kim (2016) proposent un système de rendez-vous collaboratif. Cette nouvelle approche est validée par les auteurs grâce à un modèle mathématique dans lequel chaque entreprise de transport représente un sous-modèle. Selon les auteurs, ce modèle permettrait de contrer les réticences des entreprises face à l'instauration d'un système de rendez-vous. Par contre, pour augmenter les chances de succès, les auteurs suggèrent d'instaurer des pénalités pour tous camionneurs ne respectant pas l'horaire de rendez-vous.

Le temps de passage et le taux d'émission de gaz à effet de serre ne sont pas les seuls indicateurs de performance étudiés dans la littérature. Zhao et Goodchild (2010) ont utilisé la simulation pour déterminer l'impact de l'instauration de systèmes de rendez-vous sur une variable dépendante différente : le nombre de doubles manutentions nécessaires des conteneurs (déplacer plus d'une fois un conteneur). Ils ont établi que de connaître seulement une partie de l'information sur l'arrivée des véhicules contribuait grandement à faire diminuer le nombre de

doubles manutentions. En effet, les conteneurs peuvent être disposés sur le terminal à un emplacement optimal si l'information sur le contenu des conteneurs suivants est disponible (type de produits à l'intérieur du conteneur). Ils ont donc amené un autre avantage à l'instauration d'un système de rendez-vous, soit la connaissance des produits à venir pour optimiser l'entreposage des conteneurs.

La majorité des articles pose comme hypothèse que les ressources pour charger ou décharger un conteneur sont continuellement disponibles alors que Zehendner et Feillet (2014) affirment, quant à eux, que la planification des rendez-vous des camions doit être faite en tenant compte du fait que les ressources sont aussi utilisées pour charger ou décharger des wagons ou des navires (elles ne sont donc pas constamment disponibles). Ils proposent donc un modèle mathématique de programmation linéaire en nombres entiers pour déterminer le nombre de camions pouvant être admis dans une plage horaire donnée en tenant compte de la disponibilité des ressources dans le but de diminuer le temps de passage des véhicules, des wagons et des navires. Par la suite, un modèle de simulation a été bâti pour valider que les résultats obtenus grâce à la recherche opérationnelle demeuraient valides lorsque l'on y ajoutait de l'incertitude (problème stochastique). Ils concluent que l'instauration de rendez-vous permet d'optimiser le taux d'utilisation des ressources tout en diminuant le temps d'attente des camions, des wagons et des navires, puisqu'il permet de programmer l'arrivée des camions au moment où les ressources (grues, débardeurs, etc.) sont disponibles.

Deux types de systèmes de rendez-vous sont proposés dans la littérature : le système de rendez-vous statique et le système de rendez-vous dynamique. Chen, Govindan, Yang, et al. (2013) ont évalué l'impact de ces deux types de systèmes de rendez-vous sur le temps d'attente des véhicules. La différence entre les deux est que le système de rendez-vous dynamique permet de connaître en temps réel le temps d'attente. Les camionneurs peuvent donc modifier leur rendez-vous afin de s'ajuster à la situation réelle du terminal. Les auteurs concluent que le système de rendez-vous dynamique est beaucoup plus flexible que le système de rendez-vous statique. Ils concluent aussi qu'une simple diminution dans le taux d'arrivée

des véhicules peut amener une diminution significative de la file d'attente aux guérites même avec un système de rendez-vous statique.

L'ensemble de ces articles ne tient pas compte des véhicules en retard, absents ou se présentant sans un rendez-vous au port. Li et al. (2016) affirment que plusieurs facteurs peuvent entraîner un retard ou une absence d'un véhicule lourd à son rendez-vous pour charger ou décharger un conteneur dans un port : un retard dans la livraison de la marchandise, la congestion routière, la température, etc. Ces retards ou absences peuvent causer un déséquilibre à la planification des rendez-vous réalisée par le port. Ils affirment qu'il y a 4 cas possibles d'arrivée des véhicules : en retard, en avance, sans rendez-vous ou à l'heure. Ils proposent donc 4 méthodes pour gérer l'ordre de passage au chargement ou au déchargement des véhicules entrant dans un port fonctionnant avec un système de rendez-vous. La première méthode consiste à gérer les véhicules dans une formule *First come first serve* (premier arrivée premier servi). Dans ce scénario, le premier camion se présentant à la guérite est celui qui sera déchargé en premier. Le deuxième scénario proposé consiste à attribuer une priorité à chacun des véhicules entrant dans le port. Les auteurs proposent 4 niveaux de priorité. Le niveau 1 (priorité la plus élevée) est attribué aux véhicules qui franchissent la guérite durant leur plage de rendez-vous (véhicules à l'heure). La priorité 2 est attribuée aux véhicules qui franchissent la guérite moins de 2 heures avant ou après leur plage de rendez-vous alors que la priorité 3 est donnée aux véhicules qui la franchissent 2 heures ou plus avant ou après leur plage de rendez-vous. Enfin, la priorité 4 est donnée aux véhicules qui franchissent la guérite sans rendez-vous. Dans ce scénario, aucun véhicule d'une priorité inférieure n'est servi avant que l'ensemble des véhicules de la (ou des) catégorie(s) supérieure(s) ne soit servi et les camions sont servis sur une base premier arrivée premier servi pour les véhicules d'une même priorité. Le but est d'inciter les camionneurs à respecter leur fenêtre de rendez-vous. Ce scénario est appelé PRIO par les auteurs. Le troisième scénario proposé tient compte du mouvement horizontal des grues. Ce scénario est proposé par les auteurs, car lorsque les véhicules viennent charger ou décharger un conteneur, une grue doit être utilisée. Le taux d'utilisation de cette grue est primordial, car il

est directement lié à la productivité du port. Comme les véhicules ne sont pas tous déchargés ou chargés au même endroit, les auteurs proposent dans leur 3^e scénario de prioriser les véhicules qui se trouvent le plus près de la grue. Ce scénario est appelé MMDY par les auteurs et ils affirment qu'il représente le plus la méthode utilisée dans les ports. Le quatrième scénario proposé par les auteurs est un mélange du scénario 2 (PRIO) et du scénario 3 (MMDY). Ils proposent donc d'attribuer une priorité selon les mêmes critères que le scénario 2 aux véhicules pénétrant dans le port, mais plutôt que de les servir sur une base premier arrivée premier servi pour une même priorité, ils proposent de servir le véhicule se situant le plus près de la grue, mais possédant la plus haute priorité. Les indicateurs de performance utilisés sont le temps de passage total des véhicules à l'heure à leur rendez-vous seulement et le taux d'émission de CO₂. Dans le but de déterminer le meilleur moyen de gérer un système de rendez-vous, ils ont utilisé un modèle de programmation linéaire afin de calculer l'impact des 4 scénarios sur leurs indicateurs de performance. Ils ont utilisé des temps d'opération fixes (pas stochastiques). De plus, pour obtenir une solution robuste, ils ont fait varier 3 variables différentes soient : le nombre de conteneurs devant être chargés ou déchargés dans chaque espace de chargement ou déchargement, le pourcentage de véhicules se présentant à l'heure, en retard ou en avance de moins de 2 heures et en retard ou en avance de plus de 2 heures en gardant fixe (5%) le pourcentage de véhicules se présentant sans rendez-vous ainsi que le taux d'utilisation des grues. Leurs résultats démontrent que le scénario premier arrivé premier servi est celui qui obtient les moins bons résultats alors que le scénario 4 (PRIO + MMDY) obtient des résultats 60% à 80% meilleurs que le scénario premier arrivé premier servi.

2.1.3 Résultats des ports ayant déjà implanté un système de rendez-vous pour les véhicules lourds

Plusieurs ports ont instauré des systèmes de rendez-vous à travers le monde. Dans cette section, l'implantation et les résultats obtenus dans 3 de ces ports seront abordés.

1) Le port de Hongkong (instauration en 1997)

Le port de Hongkong était, en 2005, le port le plus occupé au monde. Il recevait en moyenne 10 000 véhicules lourds et 15 navires par jour. Étant donné la demande grandissante pour l'exportation et l'importation de conteneurs dans cette partie de l'Asie, l'espace très limité pour agrandir le port et la forte concurrence des autres ports, les dirigeants du port de Hongkong ont décidé de mettre en place plusieurs améliorations pour augmenter la productivité du port. Une des améliorations relatées par Murty et al. (2005) est l'instauration de rendez-vous (plages de 30 minutes) pour les véhicules venant livrer des conteneurs entre 8h00 et 17h00 seulement. Le but de ce système de rendez-vous est de diminuer le temps de passage des véhicules ainsi que de diminuer le nombre de véhicules en attente dans le port durant les heures où l'achalandage est élevé (entre 8h00 et 17h00). Pour y arriver, ils ont déterminé le nombre de véhicules pouvant être accueillis dans le port pour chaque plage de 30 minutes en fonction de l'utilisation des grues et du temps d'attente des véhicules. Cette partie constitue la pièce maitresse de l'instauration de rendez-vous, car si trop de véhicules lourds ont un rendez-vous dans la même fenêtre de 30 minutes, le temps de passage et le nombre de véhicules en attente ne seront pas optimaux. Par contre, si ce nombre est trop faible, les taux d'utilisation des ressources (grues) seront trop faibles et ainsi, les installations seront moins rentables. Ils ont donc utilisé la simulation pour déterminer le nombre optimal de véhicules à autoriser dans le port pour chaque plage de 30 minutes. Ils ont obtenu qu'il ne devrait jamais y avoir plus de 6 véhicules en attente dans une zone de chargement à la fois. De plus, ils ont élaboré une politique pour les véhicules qui se présentent sans rendez-vous. Ils ont donc établi que les camionneurs qui se présenteraient au port sans rendez-vous devraient se rendre à la centrale de rendez-vous et se procurer le prochain

rendez-vous disponible. Ils devraient donc attendre qu'il y ait une place libre à l'horaire pour pouvoir charger leur véhicule. Malgré une augmentation du débit de véhicules de 50%, les terminaux sont moins engorgés depuis l'instauration des fenêtres de rendez-vous. De plus, le temps d'attente des véhicules a diminué de 30% passant de 60 minutes à 40 minutes en moyenne. Enfin, le taux d'utilisation des grues a augmenté ce qui a occasionné une diminution des coûts de manutention de 35%.

2) Port de Vancouver (instauration en 1999)

Le port de Vancouver est très sollicité grâce à l'augmentation du commerce entre le marché nord-américain et asiatique. Ceci générerait des retards importants dans la livraison de la marchandise transitant par ce port (Morais & Lord, 2006). La congestion se fait donc de plus en plus sentir au sein du port et, puisque les possibilités d'agrandissement sont minces, l'amélioration de la productivité est la voie prise pour diminuer la congestion dans le port. Grâce au développement des technologies, le port de Vancouver a mis sur pied en 1999 un système de rendez-vous pour les véhicules lourds dans le but de diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES) et le temps d'attente des véhicules lourds. Par contre, aucune information n'est donnée sur le type de rendez-vous instauré. Morais et Lord (2006) ont publié leur étude concernant l'analyse des résultats obtenus suite à l'implantation de ce système de rendez-vous. Ils affirment que le système de rendez-vous ainsi que la prolongation des heures d'ouverture des guérites ont été efficaces pour réduire les émissions des GES des véhicules. Ils émettent des recommandations afin d'implanter un système de rendez-vous de manière efficace. Premièrement, ils affirment que ce type de système fonctionne bien si des efforts sont mis pour expliquer clairement les bénéfices à tous les intervenants (compagnies de transport, débardeurs ...). Ils affirment que la communication est la compréhension des besoins de chacun des intervenants est primordiale lors de l'implantation d'un tel système. Ils suggèrent aussi de faire évoluer le système de rendez-vous avec la technologie dans le but d'améliorer sans cesse le processus de rendez-vous. (Morais & Lord, 2006)

3) Ports de Los Angeles et Long Beach (instauration en 2003)

Les raisons pour lesquelles un système de rendez-vous a été instauré en juillet 2003 aux ports de Los Angeles et de Long Beach sont toutes autres. En effet, l'état de la Californie a instauré une nouvelle règle (AB 2650) qui impose une amende de 250\$ au port pour chaque véhicule en attente pendant plus de 30 minutes pour traverser la guérite du port. L'instauration de rendez-vous et la prolongation des heures d'opération des guérites ont donc été les solutions retenues pour atteindre cet objectif. Par contre, aucune information n'est donnée sur le type de système de rendez-vous implanté ou sur la prolongation des heures d'opération. Cette législation a été instaurée puisque le tonnage annuel de marchandise transitant par les ports des États-Unis était en constante augmentation (Bureau of Transportation Statistics, 2006) et que le sud de la Californie est l'endroit où le plus de conteneurs étaient traités chaque année aux États-Unis. Cette augmentation du nombre de véhicules lourds a occasionné une augmentation des véhicules en attente pour entrer dans l'enceinte portuaire. Ces véhicules dégagent plusieurs particules toxiques et les répercussions sur la santé de la population commençaient à se faire sentir. Giuliano et O'Brien (2007) ont étudié l'implantation de ce système ainsi que ses répercussions. Leur première constatation est que, puisque l'instauration d'un système de rendez-vous était imposée aux gestionnaires de terminaux, la plupart de ceux-ci avaient une réticence face au projet et n'y voyaient aucun avantage. Afin de contrer ce problème, tous les terminaux du port ont géré l'implantation de ce système de la manière qui leur convenait le mieux. Il en résulte que différentes politiques de rendez-vous ont été instaurées en fonction du terminal. Les compagnies de transport doivent donc respecter les règles propres à chaque terminal, ce qui rend la gestion des rendez-vous beaucoup plus complexe pour les compagnies de transport. De plus, aucune politique n'a été mise en vigueur pour les véhicules ne respectant pas le système de rendez-vous, ce qui a incité les compagnies de transport à sous-utiliser les

systèmes de rendez-vous. En effet, aucune priorité n'est donnée à un véhicule qui se présente au port en respectant son rendez-vous.

Suite à divers sondages auprès des compagnies de transport et des gestionnaires de terminaux, les auteurs concluent que la perception générale du système des rendez-vous est qu'il n'améliore pas les conditions de travail des camionneurs. Les personnes sondées devaient noter sur une échelle de 1 à 5 (1 étant pas efficient et 5 étant exceptionnellement efficient) l'efficacité du système de rendez-vous. La moyenne des résultats se situe entre 1,4 et 2,3. De plus, il était impossible pour les auteurs de comparer de manière quantitative la diminution du temps d'attente des véhicules aux guérites, car aucune donnée n'était disponible avant l'instauration de ce système.

Les auteurs concluent donc qu'il ne semble pas y avoir d'effet bénéfique sur l'émission de particules toxiques suite à l'instauration d'un système de rendez-vous aux ports de Long Beach et de Los Angeles. Cette conclusion se base sur le fait que la perception des utilisateurs du système n'est pas positive et que le nombre de véhicules se présentant aux ports avec un rendez-vous est très faible. Par contre, les auteurs affirment qu'un système de rendez-vous pourrait effectivement contribuer à diminuer le temps d'attente des véhicules, mais que certaines conditions d'implantation doivent être respectées. Ils affirment que si le projet émerge des gestionnaires du port, que des mesures sont instaurées pour gérer les véhicules se présentant sans rendez-vous et que l'ensemble des véhicules utilise le système de rendez-vous, le système pourrait apporter une diminution des temps d'attente.

2.2 Ports manutentionnant des marchandises générales et en vrac

La littérature concernant les ports manutentionnant de la marchandise générale et en vrac est très limitée (Dragović et al. (2016)). Néanmoins, certains auteurs se sont penchés sur la question. Fioroni et al. (2015) ont utilisé la simulation pour déterminer le meilleur emplacement des entrepôts lors du transport du grain entre la ferme et le port en prévision d'une augmentation de la demande d'ici 2019. Leur

modèle permet de déterminer le positionnement optimal des entrepôts dans le but de s'adapter à la température et aux types de grain manutentionné.

Dans le but d'évaluer si le port de Séville pouvait assumer une augmentation de la demande de produits manutentionnés, Cortés et al. (2007) ont simulé les activités portuaires en augmentant le nombre de produits transigeant par le port. Le modèle de simulation leur a permis de déterminer que le port pourrait assumer l'augmentation de la demande dans la majorité des cas.

Le port de Shahid Rajaei (Iran) a constaté une augmentation des temps d'attente des véhicules lourds devant être pesés due à un nombre grandissant de camions circulant au port. Kiani et al. (2010) ont développé un modèle de simulation dans le but de déterminer l'impact de certaines modifications (installation d'une nouvelle balance, réparation d'une balance défectueuse et modification au processus de pesée) sur le nombre de véhicules en attente pour être pesés. Grâce à leur modèle, ils ont conclu que la modification du processus de pesée était l'option qui diminuait le plus le nombre de véhicules en attente et ainsi, qui diminuait le plus le temps de passage des véhicules lourds au port. Cette modification consiste à demander aux camionneurs de rester dans leur véhicule lors de la pesée. Par contre, les balances doivent être adaptées pour permettre aux camionneurs d'avoir accès à leur résultat de pesée sans sortir de leur véhicule. Les auteurs concluent que cette solution est la plus efficace en plus d'être la moins coûteuse. De plus, cette technologie a déjà été un succès dans les ports de Southampton, Felixtow, Liverpool et Singapour.

2.3 Constats suite à la revue de littérature

La littérature permet de faire plusieurs constatations. Premièrement, deux grandes familles d'indicateurs ont été utilisées dans le domaine portuaire : les indicateurs sur l'efficience des opérations et concernant l'émission de particules nocives à l'environnement. Li et al. (2016) propose, au Tableau 1 un résumé des différents indicateurs de performance qui ont été utilisés dans les six dernières années dans le domaine portuaire. De plus, le Tableau 2 présente les facteurs qui ont été étudiés dans la littérature.

Tableau 1 : Indicateurs utilisés dans le domaine portuaire

	Type d'indicateur de performance	Quali	Terrain	Guérite	Références
Indicateur d'efficacité opérationnelle	Temps d'attente des camions		x		Phan and Kim (2015)
				x	Chen et al. (2013a)
			x		Guo et al. (2011)
	Temps de service des camions		x	x	Zehendner and Feillet (2014)
			x		Zhao and Goodchild (2013)
		x	x		Asperen et al. (2011)
	Coût d'ajustement du temps d'arrivée	-	-	-	Phan et Kim (2015)
		-	-	-	Chen et al. (2013b)
	Utilisation de la guérite			x	Rashidi and Tsang (2013)
	Charge de travail de la grue		x		Asperen et al. (2011)
	Retard (camions, trains, navires)	x	x	x	Zehendner and Feillet (2014)
Indicateur d'environnement	Temps d'entreposage des conteneurs		x		Rashidi and Tsang (2013)
			x		Chen et al. (2013a)
	Émission des grues		x		Do et al. (2014)
	Émission des camions en attente		x	x	Do et al. (2014)
			x	x	Chen et al. (2013b)

Tableau 2 : Facteurs utilisés dans le domaine portuaire

Auteurs	Type de marchandises	Variables indépendantes					Nombre de camions
		Système de RDV non identifié	Système RDV durée plage	Pratiques balance	Gestion des avances et retard	Proportions	
Kiani et al. (2010)	Conteneur			X			
Guan et Liu (2009)	Conteneur	X					
Chen et Yang (2010)	Conteneur		X				
Chen, Govindan, et Yang (2013)	Conteneur	X					
Do et al. (2014)	Conteneur	X					
Zehendner et Feillet (2014)	Conteneur	X					
Chen, Govindan, Yang, et al. (2013)	Conteneur	X					
Li et al. (2016)	Conteneur	X			X		X

Il est intéressant de constater que l'ensemble des articles recensés concerne les ports manutentionnant des produits conteneurisés. De plus, la majorité des articles concernent l'instauration d'un système de rendez-vous sans toutefois en détailler

l'implémentation concrète sur le terrain. Enfin, il est possible de constater qu'un seul article présente plus d'un aspect à la fois.

Deuxièmement, la simulation à événements discrets semble être un bon outil pour étudier le trafic routier en général et dans le domaine portuaire, car elle a été maintes fois utilisée dans les ports avec conteneurs et sans conteneurs. D'ailleurs, Dragović et al. (2016) propose une revue de littérature dans laquelle ils ont recensé 226 articles sur l'utilisation de la simulation dans le domaine portuaire. Ils concluent que la simulation à événements discrets a été très utilisée dans les ports dont la marchandise est conteneurisée, mais très peu dans les autres ports. De plus, ils concluent que le logiciel Arena est celui qui est le plus utilisé pour faire de la simulation dans l'industrie portuaire.

Troisièmement, il y a très peu de travaux sur l'analyse du trafic routier dans les ports sans conteneurisation. Cependant, nos travaux peuvent s'inspirer de ceux effectués dans les ports dont la marchandise est conteneurisée ou concernant le trafic routier en général. Pour les ports dont la marchandise est conteneurisée, le taux d'utilisation des grues constitue un des enjeux les plus importants tout comme le temps des navires à quai. Dans le cas d'un port sans conteneurisation, les enjeux sont davantage au niveau de la circulation des camions, du lieu d'entreposage des produits ainsi que des temps de chargement et de déchargement des produits. La littérature désigne le temps de passage, le temps d'attente des camions et le taux d'utilisation des ressources comme principales variables dépendantes pour les deux types de ports. Pour ce qui est des variables indépendantes, l'instauration de rendez-vous ou de fenêtres de rendez-vous, l'augmentation de la demande ou du nombre de camions et l'augmentation des ressources disponibles semblent être les variables les plus étudiées.

Le projet présenté dans ce mémoire consiste à étudier un flux de trafic moyennement élevé (150 véhicules par jour) avec un niveau de détails important (chaque camion circulant dans le port doit être modélisé). La simulation à événements discrets est donc l'approche la plus appropriée. De plus, le modèle de simulation pourra être bonifié à la fin de ce projet afin d'être utilisé dans d'autres

projets futurs (évaluation d'autres variables indépendantes sur d'autres mesures de performance).

L'objectif principal de ce mémoire est de déterminer si l'instauration d'un système de rendez-vous dans un port sans conteneurisation peut être bénéfique et si oui, quelles mesures de gestion de rendez-vous il faut instaurer pour que le système soit le plus efficient possible. L'analyse de la littérature a permis de déterminer clairement les variables dépendantes et indépendantes de ce mémoire. En effet, il a été possible de conclure que les fenêtres de rendez-vous ont été maintes fois étudiées dans la littérature, mais, à la connaissance de l'auteur, ces articles ne décrivent pas la taille des fenêtres de rendez-vous ni la répartition de l'arrivée des camions dans ces fenêtres. Dans cette étude, deux variables indépendantes contrôlables (durée des plages de rendez-vous et méthode de gestion des camions en avance ou en retard à leur rendez-vous) et deux variables indépendantes incontrôlables dits facteurs bruits (nombre de camions se présentant au port par jour et proportion des camions arrivant en avance ou en retard à leur rendez-vous) sont étudiées. Enfin, deux variables dépendantes ont été retenues soit le temps de passage des camions et le taux d'utilisation des ressources.

Chapitre 3 : Méthodologie de la recherche

L'objectif de cette étude est d'analyser l'impact de l'instauration d'un système de rendez-vous et de différentes stratégies de gestion de non-respect des rendez-vous sur la congestion routière et, plus particulièrement, sur le temps d'attente des camions dans le contexte d'un port sans conteneurisation. La méthodologie employée pour réaliser cette étude consiste à développer un modèle de simulation à événements discrets afin de reproduire les activités de camionnage dans un port sans conteneurisation et à utiliser ce modèle pour exécuter diverses expériences entourant l'instauration d'un système de rendez-vous et différentes stratégies de gestion de non-respect des rendez-vous.

Tout d'abord, les activités du port à l'étude sont décrites brièvement et l'étendue de l'étude est déterminée. Par la suite, le modèle de simulation est présenté, de sa conception jusqu'à sa validation. Le modèle de simulation a servi à répondre à certaines questions des administrateurs du port à l'étude. Ces expérimentations d'ordre plus pratique ont permis de tester divers scénarios et ont contribué à déterminer les niveaux des variables choisies dans le plan d'expérience.

Finalement, le choix des variables ainsi que le plan d'expériences sont détaillés.

3.1 Étude de cas : présentation du port à l'étude

Le port à l'étude est situé entre Montréal et Québec et fait partie des ports stratégiques du Québec. Il est situé à proximité d'un grand réseau ferroviaire et routier. Grâce à son réseau multimodal et sa localisation, le port accueille chaque année plus de 250 navires dont 70% du tonnage provient de l'international. La marchandise transitant dans le port est non conteneurisée. Le port comporte actuellement 2,7 km de quais, 54 100 m² de surface d'entreposage intérieur, 80 000 m² de surface d'entreposage extérieur et des réservoirs pouvant recevoir 250 000 m³ de vrac liquide. Ce port est utilisé par cinq entreprises appelées utilisateurs du port. Le Tableau 3 résume les types de marchandises et les produits

manutentionnés par les utilisateurs. Pour des raisons de confidentialité, les utilisateurs ainsi que leurs produits n'ont pas été identifiés.

Tableau 3 : Utilisateurs et produits manutentionnés

Utilisateurs	Type de marchandises	Produits
UL	Marchandises générales sans conteneurs	PCA, PAC, PE
USc	Vrac solide	PZ, PN, PU, PSE, PCI
USk	Vrac liquide	PF, PM, PSC, PGL
UA	Vrac solide	PCO, PAL
UG	Vrac solide	PG (PG1 et PG2)

Pour bien comprendre les activités du port, des entrevues, des cartographies et des diagrammes de circulation ont été réalisés avec les utilisateurs. Au total 23 cartographies ont été réalisées pour les différentes trajectoires empruntées par les produits (Annexe 1). Ces cartographies ont permis d'identifier les modes de transport des produits et leur lieu d'entreposage. Le Tableau 4 présente les modes de transport associés à la réception et l'expédition et le type d'infrastructure pour l'entreposage de chacun des produits.

Tableau 4: Modes de transport et entreposage des produits

Produits	Mode de transport		Entreposage
	Réception	Expédition	
PCA	Maritime	Routier	Hangar
PAC (95%)	Maritime	Routier	Extérieur
PN (85%)	Maritime	Routier	Hangar
PZ (75%)	Maritime	Routier	Hangar
PSE	Maritime	Routier	Extérieur
PU	Maritime	Routier	Hangar
PF (95%)	Maritime	Routier	Réservoirs
PM	Maritime	Routier	Réservoirs
PGL	Maritime	Routier	Réservoirs
PSC (50%)	Maritime	Routier	Réservoirs
PG (5%)	Maritime	Routier	Silos
PAC (5%)	Routier	Maritime	Extérieur
PE	Routier	Maritime	Extérieur
PCI	Routier	Maritime	N/A
PF (5%)	Ferroviaire	Routier	Réservoirs
PN (15%)	Ferroviaire	Maritime	Hangar
PG (14%)	Ferroviaire	Maritime	Silos
PZ (25%)	Maritime	Ferroviaire	Hangar
PSC (50%)	Maritime	Ferroviaire	Réservoirs
PG (7%)	Maritime	Ferroviaire	Silos
PG (60%)	Maritime	Maritime	Silos

Dans certain cas, par exemple le produit PAC, deux trajectoires peuvent être associées au même produit. En effet, 95% des produits PAC ont une trajectoire réception maritime – expédition routier et 5% réception routier- expédition maritime. La trajectoire Réception maritime – Expédition routier est suivie par 69,6% des produits. La trajectoire Réception routier – Expédition maritime est suivie par 16,9% des produits. La trajectoire Réception ferroviaire – Expédition routier est suivie par 0,4% des produits. Pour le produit PCI, il n'y a pas de zone d'entreposage puisque le produit est déchargé directement dans le navire.

Dans ce projet, seul le trafic routier des produits dont la demande est importante est analysé. Le Tableau 5 présente le trafic maritime et routier pour l'année 2016. Une intensité de trafic classée « régulier » signifie que le trafic routier pour ces produits est relativement stable à chaque mois de l'année et ce, peu importe le nombre de navires par année. Une intensité de trafic classée « navire » signifie qu'il y a du trafic routier pour ces produits lorsqu'un navire est à quai pour y être chargé. Pour certains produits, l'intensité du trafic routier est plus élevée durant certaines saisons. C'est le cas des produits PU et PF.

Tableau 5 : Trafic maritime et routier pour l'année 2016

Produits (Utilisateur)	Navires/ année	Camions/ année	Intensité du trafic durant l'année
PCA (UL)	4	805	Régulier
PA (UL)	8	1698	Régulier
PE (UL)	7	345	Navire
PN (USc)	14	1304	Régulier
PZ (USc)	12	7153	Régulier
PU (USc)	9	587	Printemps/Automne
PCI (USc)	15	2406	Navire
PS (USc)	5	5000	Hiver
PF (USk)	16	1601	Printemps
PGL (USk)	5	1898	Régulier
PM (USk)	1	1428	Régulier
PSC (USk)	11	574	Régulier
PG1 (UG)	44	12 710	Navire
PG2 (UG)		1170	Régulier
Total	147	38 679	

38 679 camions ont circulé dans le port en 2016 et les activités des utilisateurs USc et UG ont généré, à elles seules, près de 80% du trafic routier. Les données du Tableau 5 montre que le trafic engendré par les produits PG2, PCA, PAC, PN, PZ, PGL, PM et PSC est relativement régulier avec un nombre relativement stable de camions par jour (trafic régulier). Cependant, pour les autres produits, le trafic de camions dans la zone portuaire dépend de la présence d'un navire à quai pour chargement (produits PG1, PCI, PE) ou de la saison (produits PF, PU, PSE). Lorsqu'un navire est à quai, le trafic de camions peut commencer quelques semaines ou quelques jours avant l'arrivée du navire et se poursuivre tant que le

navire est à quai. Pour le produit PG1, environ 100 camions/jour viennent au port pour être déchargés lorsqu'un navire est à quai. Dans le cas du produit PCI, le chargement se fait principalement durant les fins de semaine avec un trafic d'environ 300 camions en 50 heures. Le trafic du produit PE est moins important avec 4 camions/jour, mais puisque ces produits (PE) sont de taille imposante, ils occupent beaucoup d'espace dans la zone portuaire. Dans le cas des produits saisonniers (PF, PU, PSE), le trafic de camions est intense (entre 60 et 120 camions/jour) généralement durant 2 semaines. Cette période de 2 semaines peut survenir au cours des mois de mai et juin, selon la température.

Évidemment, la problématique du temps d'attente des camions survient lorsque plusieurs trafics de camions transportant différents produits se croisent. Ces périodes de forte circulation de camions sont susceptibles de se produire lorsqu'un navire pour les produits PG1 et PCI est à quai pour chargement, lorsqu'un navire de produits PE est à quai ou attendu dans les jours prochains ou que la température est propice à l'utilisation des produits PF, PU ou PSE. C'est dans ce contexte et pour ces types de produits qu'un système de rendez-vous pourrait être mis en place afin d'éviter les temps d'attente.

3.2 Conception du modèle de simulation

Le modèle de simulation a été développé avec le logiciel ARENA. Cette section présente les données concernant les étapes du processus de déchargement ou de chargement du produit, des taux d'arrivée des camions, des temps de chargement et de déchargement.

3.2.1 Modélisation

3.2.1.1 Entités du modèle et taux d'arrivée des camions

Les entités qui circulent dans le modèle de simulation sont les camions qui viennent charger ou décharger un produit au port.

Aucune donnée n'était disponible en ce qui concerne le taux d'arrivée des camions, les temps de chargement et de déchargement, les temps de pesée aux balances, etc. Ces données ont dû être mesurées et collectées directement sur le terrain. Pour déterminer le taux d'arrivée des camions, une journée a été identifiée

pour observer le trafic routier où, en plus du trafic régulier des produits (PM, PGL, PZ, PN, PCA, PAC, PSC, etc.), il y avait un trafic de camions provenant du fait qu'un navire était à quai pour chargement (produits PG1) et un trafic de camions saisonnier (produits PF). Durant cette journée, 222 camions ont circulé dans la zone portuaire et environ 80% de ce trafic routier est attribuable aux produits PG1 et PF. C'est pourquoi l'étude de la mise en place d'un système de rendez-vous se consacre uniquement à ces deux produits. Le Tableau 6 présente le nombre de camions aux guérites lors de cette journée d'observation alors que la Figure 1 présente la répartition des taux d'arrivée des camions durant la journée, les répartitions du nombre total de camions et celles des camions du produit PG et du produit PF.

Tableau 6 : Nombre de camions observés aux guérites

Produits	Nombre de camions observés aux guérites	Pourcentage
PF	100	45,0%
PG1	76	34,2%
PZ	24	10,8%
PG2	6	2,7%
PM	4	1,8%
PE	3	1,35%
PU	3	1,35%
PSC	3	1,35%
PCA	1	0,45%
PAC	1	0,45%
PGL	1	0,45%
Total	222	100%

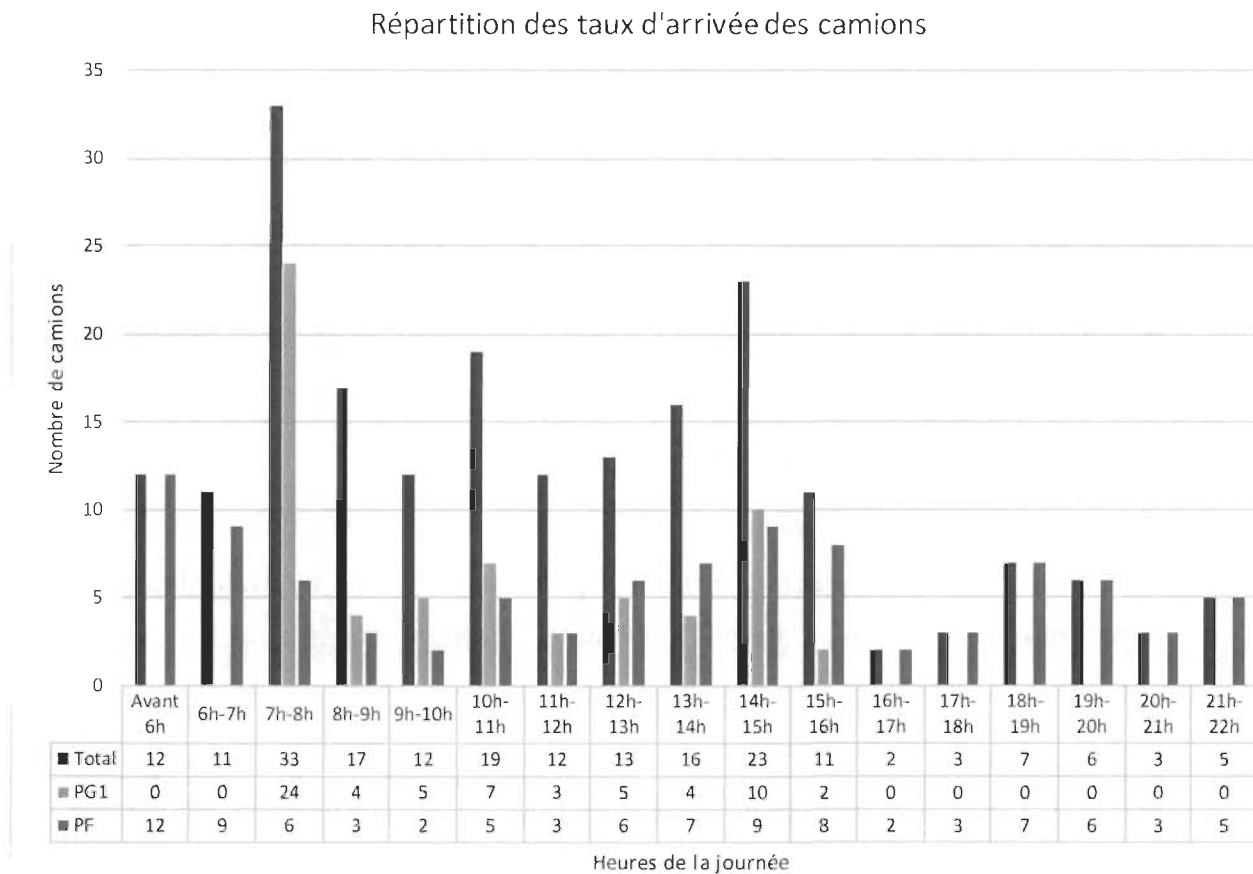


Figure 1 : Répartition des taux d'arrivée des camions

Le taux d'arrivée des camions varie d'une heure à l'autre et d'un produit à l'autre. La compilation des taux d'arrivée à l'heure montre qu'un nombre important de camions sont déjà en attente dans le port avant même que les activités de chargement ou de déchargement débutent. Dans le cas du produit PG1, les activités débutent à 8h00 et 24 camions étaient déjà en attente avant 8h00. Les activités de chargement du produit PF débutent à 6h00 et déjà 12 camions étaient en attente. Pour ces deux produits, le taux d'arrivée des camions est plus important tôt le matin et il l'est moins durant le reste de la journée. Pour le produit PG1, les heures d'opérations sont de 8h à 16h alors que pour le produit PF, les heures d'opération sont de 6h à 22h. À l'intérieur d'une même heure, l'arrivée des camions est aléatoire. Les taux d'arrivées des camions sont présentés à la Figure 1. Comme plusieurs camions sont déjà en file à l'ouverture, car ils veulent s'assurer d'être servis rapidement et ainsi pouvoir faire plus d'un voyage dans la

même journée, ceux-ci sont tous créés dans le modèle de simulation à l'heure d'ouverture des stations de chargement ou de déchargement des produits. Il est important de noter qu'une variation dans le nombre de camions observé sur le terrain et compilé dans la base de données par le port a été observée ce qui explique la différence entre le nombre total de camions ayant circulé au port ainsi que la raison pour laquelle les données ont été collectées sur le terrain. En effet, plus de camions se sont présentés à la guérite que le nombre de camions indiqué dans la base de données. Pour l'étude, seuls les camions pour lesquels les temps de passage étaient disponibles ont été analysés.

Dans le modèle de simulation, un module CREATE basé sur des SCHEDULE est créé pour simuler le taux d'arrivée des camions pour chacun des produits séparément, selon le taux d'arrivée constaté durant les observations sur le terrain.

3.2.1.2 Déplacement et trajectoires suivies par les entités dans le modèle

Les cartographies (Annexe 1) ont permis de visualiser les étapes suivies par les camions tandis que les diagrammes de circulation (Annexe 2) ont permis de visualiser les trajets empruntés par les camions. Certains produits peuvent suivre deux trajets selon l'endroit où ils sont chargés ou selon l'endroit où le camion est pesé. Les informations recueillies avec les cartographies montrent que 72% des camions entrent par la guérite principale et 28% par la guérite secondaire, 51% des camions sont pesés (27% à la balance 1 et 24% à la balance 2) et que 75% des camions sortent par la guérite principale et 25% par la guérite secondaire. Les diagrammes de circulation ont aussi permis de calculer la distance parcourue par les camions pour chacun des produits. Des observations sur le terrain ont permis de collecter des temps d'opération (chargement, déchargement et pesé) pour les différentes étapes suivies par les camions. Des distributions statistiques sur les temps requis ont ensuite été déterminées avec *l'input analyzer* du logiciel ARENA pour chacune de ces étapes.

La première étape consiste à traverser la guérite (principale ou secondaire). Pour ce faire, le camionneur doit présenter sa carte d'accès au port devant le lecteur optique afin que la barrière se lève. Lorsque le camionneur présente sa carte, son

nom ainsi que son heure d'arrivée sont enregistrés dans le système informatique du port. Par contre, il est impossible de savoir si un camionneur vient livrer ou chercher un produit, ni quel produit il manutentionne. Dans certain cas, les camionneurs n'ont pas de carte. Un module ASSIGN permet de déterminer si le camionneur a une carte d'accès ou non du port (20% des camionneurs n'en ont pas). Les camionneurs qui en possèdent une viennent plus de 10 fois par année au port. Lorsque cela est le cas, le camionneur présente sa carte et traverse la guérite. Lorsque le camionneur n'a pas de carte, il peut traverser la guérite en demandant l'accès à un préposé via un intercom, stationner son camion sur le côté et aller s'identifier à l'intérieur. Un module DELAY est utilisé pour représenter le temps requis pour stationner son véhicule, s'enregistrer et retourner à son véhicule. Le Tableau 7 présente les distributions statistiques associées aux temps d'opérations pour franchir la guérite (indépendamment de la guérite utilisée ou de l'entrée et la sortie du camion) et de s'enregistrer si le camionneur ne possède pas de carte d'accès.

Tableau 7 : Distributions statistiques associées à la guérite

Étapes	n	Min	Max	Moyenne	Écart-type	Distribution (en minutes)
Franchir la guérite	40	0,38	2,25	0,66	0,35	0.03 + EXPO(0.434)
Délai supplémentaire pour guérite sans carte	12	3,03	8,00	4,58	1,50	3 + EXPO(1.45)

Par la suite, 51% des camions sont pesés soit à la balance 1 ou à la balance 2. Ils doivent donc se déplacer jusqu'à la balance et être pesés. Le Tableau 8 présente les distributions statistiques pour le temps de ces activités en fonction du produit pesé. Les distributions statistiques sont différentes en fonction du produit pesé,

car la pesée diffère d'un produit à l'autre (pesée libre-service pour le produit PSC et standard (avec un employé de la pesée) pour les autres produits)

Tableau 8: Distributions statistiques associées au temps passé à la balance

Étapes	n	Min	Max	Moyenne	Écart-type	Distribution (en minutes)
Pesée standard	39	0,75	6,10	2,98	1,30	ERLA(0.548, 5)
Pesée libre-service (produit PSC seulement)	17	1,20	1,93	5,93	1,20	1.16 + LOGN(2.08, 1.36)

Ensuite, les camions se dirigent vers le leur lieu de chargement ou de déchargement. Le Tableau 9 présente les temps de chargement ou de déchargement chronométrés pour chacun des produits ainsi que les distributions associées.

Tableau 9 : Temps de chargement et de déchargement par produit observés

Produits	n (nombre d'observations)	Min	Max	Moyenne	Écart-type	Distributions (min)
PCA	6	13.93	42.95	26.46	10.56	13 + EXPO(13.5)
PAC	2	33.18	38.27	35.73	3.59	UNIF(33,39)
PE	2	65	97	81	22.63	UNIF(65,97)
PZ	34	3	15.97	7.36	3.91	2 + 14 * BETA(0.776, 1.25)
PU	10	5.5	27.93	11.75	7.35	5 + LOGN(7.08, 10.5)
PCI	20	30.28	88.5	49.93	16.11	TRIA(30, 30.3, 89)
PSE	5	2.38	5.63	3.41	1.27	2 + LOGN(1.26, 1.36)
PF	33	11.15	40.65	29.56	7.03	TRIA(11, 30.5, 41)
PGL	2	36.02	39.5	37.76	2.46	UNIF(36.02,39.5)
PM	2	27.13	46.02	36.58	13.35	UNIF(27.08,46.01)
PSC	12	25.23	43.77	31.34	5.58	TRIA(25, 29.7, 44)
PG1	38	5.98	23.33	11.50	3.87	5 + WEIB(7.33, 1.79)
PG2	8	6.07	10	7.83	1.38	UNIF(6, 10)

Le produit PG1 doit subir un contrôle de la qualité avant d'être déchargé. Le contrôle qualité consiste à prélever un échantillon du produit afin de valider s'il

satisfait les spécifications. Pour ce faire, une sonde est utilisée. Une fois le déchargement terminé, le camionneur quitte la zone de déchargement et se rend au lieu spécifié pour obtenir les papiers attestant qu'il a déchargé le produit ainsi que la quantité de produits déchargés. Les distributions utilisées pour les temps de ces étapes sont présentées au Tableau 10.

Tableau 10 : Distributions statistiques spécifiques au produit PG1

Étapes	N (nombre d'observations)	Min	Max	Moyenne	Écart-type	Distribution
Échantillonner un camion de PG1	43	2,75	16,62	5,75	2,97	2 + LOGN(3.97, 2.56)
Attendre les papiers de déchargement du produit PG1	37	0,65	6,38	2,83	1,38	2 + WEIB(2.57, 1.78)

3.2.1.3 Ressources

Les horaires de travail des ressources (employés) varient en fonction du produit. Pour le produit PG1, les heures d'opération sont de 8h à 16h sans arrêt, alors que pour le produit PF, l'horaire d'opération est de 6h à 22h sans arrêt.

Une seule ressource est disponible à chaque pompe lors du chargement du produit PF. Pour le produit PG1, 2 files de camions sont créées pour l'échantillonnage et le déchargement, mais un seul camion peut être échantillonné ou déchargé à la fois. La deuxième file permet d'éliminer les temps de préparation avant l'échantillonnage et le déchargement (enlever la toile sur le camion)

Pour les autres produits, les heures d'opération sont de 8h à 16h excepté pour le produit PGL (ouvert 24 heures sur 24) et les produits PSC et PM (ouvert de 5h à 16h).

Pour l'ensemble des produits (excepté le PG1), le nombre de ressources disponibles est de 1.

Les paramètres qui ont été considérés fixes dans l'étude sont :

- La vitesse des camions qui a été établie à 5 km/h.
- Aucune panne des ressources.
- Aucune pause des ressources.

3.2.1.4 Statistiques obtenus par les tests avec le modèle de simulation

Lorsqu'un camion quitte le port, le module DECIDE permet de séparer les camions en fonction du produit chargé ou déchargé afin de collecter des statistiques pour chacun des produits individuellement. Deux statistiques sont calculées grâce aux modules RECORD. La première est le temps de passage calculé à l'aide de l'attribut du camion lors de son entrée au port et la deuxième est le nombre de camions ayant quitté le port.

3.2.2 Animation du modèle de simulation

Afin de rendre l'ensemble du modèle plus visuel et ainsi aider à sa compréhension, une animation a été effectuée. Dans cette animation, il est possible de constater en temps réel quelles ressources sont utilisées et combien de camions sont en attente dans le port. De plus, l'animation a été utile pour faire une validation visuelle des trajets empruntés par les camions ainsi que de l'horaire de travail des ressources.

3.2.3 Horizon de simulation

Puisque les activités au port sont réalisées dans un horizon fini, aucune période de réchauffement n'est nécessaire. Afin d'obtenir des résultats non biaisés par le phénomène de l'aléatoire, 100 répliques ont été faites, les résultats sont donc basés sur une moyenne de 100 répliques et non sur une seule.

3.2.4 Validation du modèle de simulation

Une première validation a été faite afin de s'assurer que le bon nombre d'entités étaient créées dans le modèle et que ces entités empruntaient le bon trajet. De plus, les horaires des ressources ainsi que les horaires de l'arrivée des camions ont été validés. Pour faire ces validations, l'animation ainsi que les modules d'enregistrement présents dans le logiciel (module RECORD) ont été utilisés et les valeurs générées par le modèle ont été comparées aux valeurs souhaitées. L'ensemble des statistiques générées par la simulation donnait exactement le nombre voulu.

Afin de s'assurer que le modèle est valide, les résultats obtenus par simulation ont été comparés à ceux recueillis sur le terrain. Le principal indicateur utilisé est le temps de passage total des camions (de l'entrée par la guérite à la sortie par la guérite). Le Tableau 11 présente les résultats.

Tableau 11 : Temps de passage moyen observé et simulé

Produit	Temps de passage		
	Observé (min)	Simulé (min)	Écart absolu (%)
PG1	86,55	81,34	5%
PF	77,66	76,79	1%
PZ	28,05	31,12	11%
PG2	41,93	23,40	44%
PM	94,19	94,06	0%
PE	124,14	90,12	27%
PU	83,86	37,75	55%
PSC	58,27	65,07	12%
PCA	57,53	42,55	26%
PAC	44,9	45,72	2%
PGL	44,92	50,07	12%

Les écarts entre les temps simulés et les temps observés sont relativement faibles pour les produits engendrant un grand nombre de camions, comme les produits PG1 et PF. Ceci s'explique par la grande taille des échantillons qui a permis d'augmenter la précision des résultats. Pour les produits engendrant un plus faible nombre de camions se présentant au port par jour (PU, PCA et PG2), les écarts entre les temps de passage sont plus importants. Étant donné la difficulté de recueillir les données (cueillette manuelle) et le faible impact de ces produits sur la congestion au port, ces écarts ont été acceptés. Le modèle a été développé en gardant en tête qu'il faudrait obtenir, dans une deuxième phase, plus de données si une étude devait être faite spécifiquement sur ces produits. Il est possible de conclure que la validité interne du modèle est bonne (validité du modèle pour la journée étudiée). Par contre, comme les données sur les temps de passage et les taux d'arrivée des camions ont été collectées durant une seule journée, la validité externe (les résultats sont valables pour l'ensemble de l'année) du modèle reste à démontrer. Puisque la collecte de données doit se faire manuellement et demande énormément de ressources, il a été déterminé qu'une seule journée serait utilisée pour cette analyse. Les recommandations seront donc valables seulement pour cette journée et reste à être validées pour le reste de l'année. En contrepartie, la journée choisie a été bien ciblée afin d'obtenir des données lors d'une journée type au port.

Le modèle de simulation développé est une représentation simplifiée de la réalité sachant que les activités au port sont très complexes et comportent leur lot de variabilité. Par contre, la validité du modèle ayant été établie avec des écarts entre 1% et 5%, le modèle est fiable pour poursuivre les objectifs de cette étude.

3.3. Étendue de l'expérimentation

Comme il a été expliqué à la section 3.1, la problématique du temps d'attente des camions survient lorsque plusieurs trafics de camions transportant différents produits se croisent. Ces périodes de forte circulation de camions sont susceptibles de se produire lorsqu'un navire pour les produits PG1 et PCI est à quai pour chargement, lorsqu'un navire de produits PE est à quai ou attendu dans les jours prochains ou que la température est propice à l'utilisation des produits

PF, PU ou PSE. Le modèle de simulation a été développé sur un trafic de camions provenant de la présence d'un navire à quai pour chargement (produits PG1) et d'un trafic saisonnier de camions (produits PF). Ainsi, les expériences terrain et le plan d'expériences décrit aux sections 3.4 et 3.5 ont été réalisés pour les produits PG1 et PF. Les résultats et l'analyse seront donc faits pour ces deux produits.

3.4 Scénarios préliminaires

Le modèle de simulation a d'abord été utilisé pour tester diverses hypothèses émises par les administrateurs du port. Ces tests ont permis de mieux comprendre certaines variables et ont éclairé les choix pour la réalisation des expériences décrites à la section 3.5. Les scénarios testés sont décrits dans cette section mais le détail de la méthodologie et les résultats sont donnés au chapitre 4.

3.4.1 Scénario 1 : mise en place d'un système de rendez-vous

Le scénario 1 permet de vérifier si la mise en place d'un système de rendez-vous peut réduire le temps de passage moyen des camions dans la zone portuaire. Quatre systèmes de rendez-vous ont été évalués.

- À heure fixe (distribution équilibrée ou parfaite de l'arrivée des camions sur l'ensemble de la journée de travail)
- Plages de 4 heures - aléatoire (arrivée aléatoire des camions durant ces 4 heures)
- Plages de 4 heures - 80/20 (80% des camions arrivent dans la 1ère heure*).
- Plages de 2 heures - (80% des camions arrivent dans la 1ère heure*)

*L'arrivée de 80% des camions dans la première heure a pour objectif de reproduire le comportement des camionneurs.

3.4.2 Scénario 2 : Ajout d'un puits de déchargement (produit PG1)

Le scénario 2 consiste à vérifier avec le modèle de simulation si, pour le produit PG1, l'ajout d'un puits de déchargement (aux deux puits déjà existants) permet de décharger 120 camions/jour de 8H et 240 camions/jour de 16H

Pour ce test, certaines hypothèses ont été émises.

- Une seule sonde pour l'échantillonnage et les 3 puits
- La sonde fonctionne sans interruption (pas de pannes, etc.)

- Le temps de déchargement au nouveau puits est identique à celui des puits actuels
- L'affectation des camions aux puits de déchargement se fait selon la file d'attente la plus courte.

3.4.3 Scénario 3 : Ajout d'un trafic routier (produit PX)

Le troisième scénario consiste à vérifier si l'ajout d'un trafic routier engendré par l'entreposage d'un nouveau produit à un terminal a un impact sur le trafic routier actuel.

Pour ce test, certaines hypothèses ont été émises.

- Produit similaire au déchargement du produit PG1
- Un puits de déchargement : 40 camions maximum pouvant être déchargés en 8H
- Arrivée des camions selon les observations réalisées le 15 juin 2016 pour le déchargement du produit PG1
- Temps d'échantillonnage basé sur les observations du déchargement du produit PG1

Une analyse de sensibilité est effectuée en fonction de la capacité d'attente sur le terminal qui est, pour l'instant, inconnue.

3.5 Conception du plan d'expérience

3.5.1 Variables indépendantes contrôlables

3.5.1.1 *Système de rendez-vous*

La première variable qui sera utilisée dans le plan d'expériences est le type de système de rendez-vous (RDV). Une fenêtre de rendez-vous consiste en un intervalle de temps durant lequel le camionneur doit se présenter au port. Cette variable aura les niveaux suivants :

2H80% : Fenêtre de rendez-vous de 2 heures avec 80% des camions qui se présentent la 1^{re} heure

4H80% : Fenêtre de rendez-vous de 4 heures avec 80% des camions qui se présentent la 1^{re} heure

Fixe : Rendez-vous à heure fixe

Il a été déterminé que 80% des camions allaient arriver à la 1^{ere} heure dans le but de reproduire le comportement des camionneurs. En effet, l'analyse de données et les discussions avec les experts en la matière, ont permis de conclure qu'actuellement une grande majorité de camionneurs arrivent très tôt le matin et au début de l'après-midi. Il est possible de croire qu'en instaurant des fenêtres de rendez-vous, ce comportement se reproduira.

3.5.1.2 *Politique de gestion des avances et des retards*

La deuxième variable qui sera prise en compte est la politique de gestion des camions se présentant en avance ou en retard sur leur plage horaire (Gestion A/R). La mise en place d'un système de rendez-vous a pour objectif de mieux répartir les camions durant la journée. Cependant, la littérature a démontré que plusieurs facteurs peuvent entraîner un retard ou une absence d'un véhicule lourd à son rendez-vous (trafic, conditions météorologiques, etc.) d'où l'importance pour

les ports de se doter d'une politique de gestion des avances et des retards. Cette variable aura les trois niveaux suivants :

FIFO : Aucune gestion des avances et des retards, donc premier arrivé premier servi (FIFO)

PRIORITÉ : Instauration d'un système de priorité en fonction du respect ou non de la plage de rendez-vous

REFUS : Tous les camions en avance (de plus de 15 minutes) ou en retard sont refusés

Lorsque les camions se présentent au port à l'intérieur de leur plage de rendez-vous, la priorité 1 leur est accordée. Si un camion se présente au port en avance ou en retard de sa plage de rendez-vous, il se verra attribuer la priorité 2. Il ne pourra pas être servi (pesé, chargé ou déchargé) tant que tous les camions de priorité 1 n'auront pas été servis. Cette mesure se veut incitative, elle invite les camionneurs à être à l'heure le plus possible pour être servis rapidement. Par contre, si un camion se présente au port avec une avance de moins de 15 minutes, la priorité 1 lui sera attribuée même s'il est en avance, dans le but d'inciter les camionneurs à ne pas arriver en retard et de ne pas pénaliser les camions qui sont légèrement en avance.

3.5.2 Variables indépendantes incontrôlables (bruits)

Deux variables bruits sont susceptibles d'affecter la robustesse de la solution obtenue par l'analyse des variables précédentes. En effet, le nombre de camions peut varier d'une journée à l'autre ainsi que la proportion de camions qui sont en avance ou en retard à leur rendez-vous. L'objectif de cette partie de l'expérience est de reproduire certaines conditions susceptibles de se produire et de vérifier comment ces variables bruits affectent la performance des politiques choisies.

3.5.2.1 Nombre de camions attendus au port par jour

La première variable bruit qui sera prise en compte dans le plan d'expérience est le nombre des camions attendus par jour au port (Volume). Les valeurs choisies pour cette variable sont :

MAX : Capacité maximale

85%MAX : 85% de la capacité maximale

70%MAX : 70% de la capacité maximale

La valeur maximale correspond au nombre de camions observés lors de notre journée d'observation (tableau 7). Le Tableau 12 résume les valeurs du nombre de camions attendus par jour en fonction du type de produit et du pourcentage de la capacité maximale.

Tableau 12 : Nombre de camions attendus par jour en fonction du type de produit et du pourcentage de la capacité maximale

Produits	MAX	85 % MAX	70 % MAX
PG1	64	54	47
PF	96	82	67

3.5.2.2 Proportion des camions déviant de leur plage de rendez-vous

La deuxième variable bruit prise en compte dans le plan d'expérience est la proportion des camions qui dévient de leur plage de rendez-vous (PROPORTION). Les valeurs choisies pour cette variable sont :

5-90-5: 5% des camions en avance, 90% des camions à l'intérieur de la plage de rendez-vous, 5% des camions en retard

10-80-10 : 10% des camions en avance, 80% des camions à l'intérieur de la plage de rendez-vous, 10% des camions en retard

15-70-15 : 15% des camions en avance, 70% des camions à l'intérieur de la plage de rendez-vous, 15% des camions en retard

3.5.3 Variables dépendantes

Dans cette étude, le temps de passage total a été choisi comme indicateur, car il inclut le temps d'attente des camions et, par conséquent, le coût relié à l'attente, le temps de service des camions et l'émission de particules nocives qui découle directement du temps de passage. Ce temps de passage a été calculé pour l'ensemble des camions se présentant au port.

Le temps de passage est calculé à partir du moment où le camionneur présente sa carte au lecteur optique ou demande au préposé de lever la barrière de la guérite pour entrer au port et se termine lorsque le camionneur présente sa carte une deuxième fois mais, cette fois, pour sortir du port. Il comprend donc l'ensemble du temps durant lequel le camion a été présent dans l'enceinte du port.

De plus, un indicateur concernant les taux d'utilisation des ressources au chargement ou au déchargement a été retenu puisqu'il permet d'évaluer si les ressources sont sous ou sur utilisées. Les indicateurs concernant la guérite n'ont pas été considérés, car dans la présente étude de cas, aucune congestion à la guérite n'a été constatée, la congestion est plutôt présente dans l'enceinte même du port.

3.5.4 Modèles mathématiques des plans d'expérience

Pour analyser l'effet des variables indépendantes sur le temps de passage des camions au port, deux analyses sont effectuées. Pour les facteurs contrôlables (A et B) un premier plan L_9 sera effectué. Le modèle mathématique utilisé pour ce plan d'expérience est le suivant :

$$Y_{ijk} = (\mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ijk})$$

où

Y_{ijk} = Temps de passage moyen par produit ou Taux d'utilisation des ressources

μ = Moyenne de la population

A_i = Type de système de rendez-vous où $i = 1,2,3$

B_j = Politique de gestion de l'avance et du retard où $j = 1,2,3$

A_iB_j = Interaction entre la taille de la fenêtre de rendez-vous et la politique de gestion de l'avance ou du retard

ε_{ijk} = Erreur d'expérimentation

Le seuil de signification est fixé à $\alpha = 0,05$.

Le nombre de réplications par expérience est de 3.

Par la suite, ce plan sera croisé avec un deuxième plan L_9 pour les facteurs bruits (C et D). Le modèle mathématique utilisé pour ce plan d'expérience est le suivant :

$$Y_{ijklmo} = (\mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ijk})(\mu + C_l + D_m + \varepsilon_{lmo})$$

où

Y_{ijklmo} = Temps de passage moyen par produit ou Taux d'utilisation des ressources

μ = Moyenne de la population

A_i = Type de système de rendez-vous où $i = 1,2,3$

B_j = Politique de gestion de l'avance et du retard où $j = 1,2,3$

A_iB_j = Interaction entre la durée de la fenêtre de rendez-vous et la politique de gestion de l'avance ou du retard

C_l = Nombre de camions se présentant au port par jour où $l = 1,2,3$

D_m = Proportion des camions déviant de leur plage de rendez-vous où $m = 1,2,3$

ε_{ijk} = Erreur d'expérimentation

ε_{lmo} = Erreur d'expérimentation

Le seuil de signification est fixé à $\alpha = 0,05$.

Le nombre de réplications par expérience est de 1.

Chapitre 4 : Résultats et analyse des scénarios préliminaires

Divers scénarios proposés par les utilisateurs ont été réalisées sur les produits PG1 et PF. Ces premières expérimentations ont permis de mieux cibler les niveaux des facteurs étudiés dans les plans d'expérience proposés dans cette étude. C'est pourquoi elles sont présentées en premier. Tout d'abord, cette section présente les étapes suivies par les camions lors du chargement et déchargement des produits PG1 et PF. Par la suite, les scénarios testés sont présentés et les résultats sont analysés.

4.1 Trajectoires des produits PG1 et PF

La Figure 2 présente la cartographie du produit PG1. Cette cartographie représente le cas d'un camion se présentant au port pour décharger le produit PG1, qui quittera le port par navire. La première étape consiste à traverser la guérite principale. Pour ce faire, le camionneur doit présenter sa carte d'accès au port devant le lecteur optique ou parler au préposé s'il n'a pas de carte afin que la guérite se lève. Lorsque le camionneur présente sa carte, son nom ainsi que son heure d'arrivée sont enregistrés dans le système informatique du port. Par contre, il est impossible de savoir si un camionneur vient livrer ou chercher un produit ni quel produit il manutentionne. Par la suite, le camionneur se rend au lieu d'échantillonnage. Avant d'y arriver, la probabilité est très élevée qu'il doive attendre en file, car le taux d'arrivée des camions est plus élevé que le taux de service pour la majorité de la journée. L'échantillonnage consiste à prélever un échantillon du produit afin de valider s'il satisfait les spécifications. Pour ce faire, une sonde est utilisée. Si la qualité du produit est adéquate, le camionneur peut se déplacer à la zone d'attente de déchargement. Si le test n'est pas concluant, une entente est établie entre le vendeur et l'acheteur (modification de prix ou rejet de la marchandise). Si la solution retenue est le rejet de la marchandise, le camion quitte le port sans décharger sa marchandise. Une fois dans la zone d'attente de déchargement, le camion peut se déplacer dans la zone de déchargement

seulement lorsque le camion précédent quitte cette zone. Pour effectuer le déchargement, le camionneur installe son camion au-dessus de la trappe de déchargement et vide le contenu de son camion dans celle-ci. Le produit est, par la suite, pesé sur une balance à l'intérieur de la zone d'entreposage. Une fois le déchargement terminé, le camionneur quitte la zone de déchargement et se rend au lieu spécifié pour obtenir les papiers attestant qu'il a déchargé le produit ainsi que la quantité de produits déchargés et quitte le port par la guérite principale (en présentant encore sa carte au lecteur optique). Le produit est entreposé à l'endroit voulu jusqu'à l'arrivée du navire. Lorsque le navire est à quai, le produit y est chargé. Dans le cas où un camion vient décharger son produit lorsqu'un navire est à quai (environ 25% du temps), le produit est déchargé directement dans le navire après la réception des résultats d'échantillonnage. Afin d'accélérer le processus d'échantillonnage et de déchargement, deux files sont créées à partir de la zone d'attente d'échantillonnage. La Figure 3 présente le schéma de la zone d'échantillonnage et de déchargement. Les cercles verts représentent les zones d'attente (2 zones), d'échantillonnage et de déchargement. Lorsque le cercle est vert, la ressource est disponible et lorsque le cercle devient rouge, la ressource n'est plus disponible.

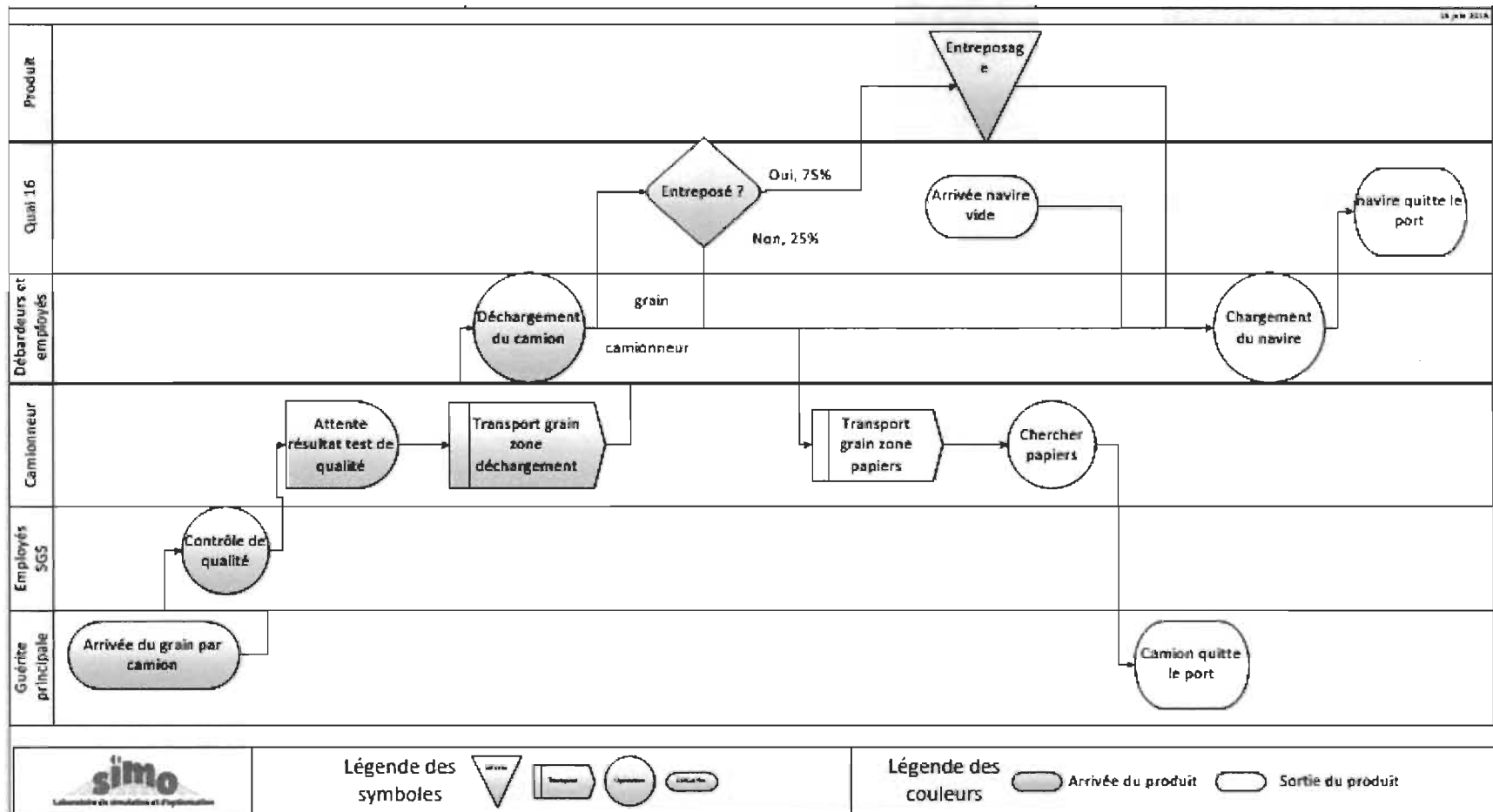


Figure 2 : Cartographie du produit PG1

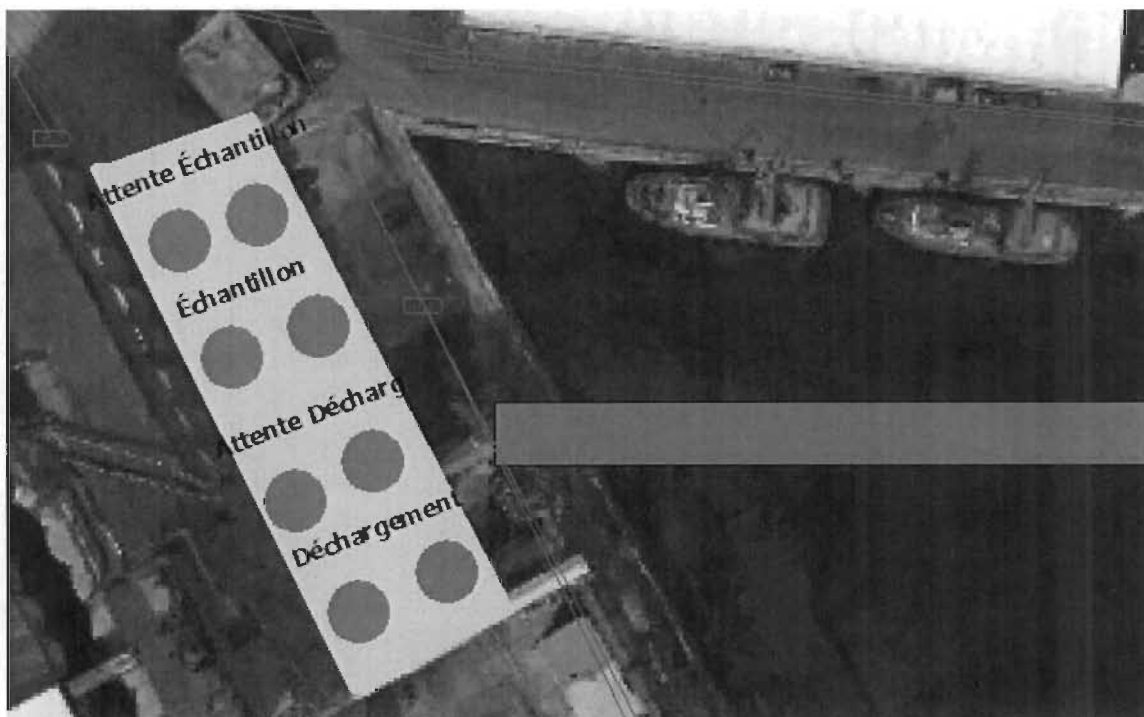


Figure 3 : Schéma de la zone d'échantillonnage et de déchargement du produit PG1

De la même manière, une cartographie a été effectuée pour le produit PF. La Figure 4 présente cette cartographie. Cette cartographie représente le cas où le produit arrive par navire et quitte par camion.

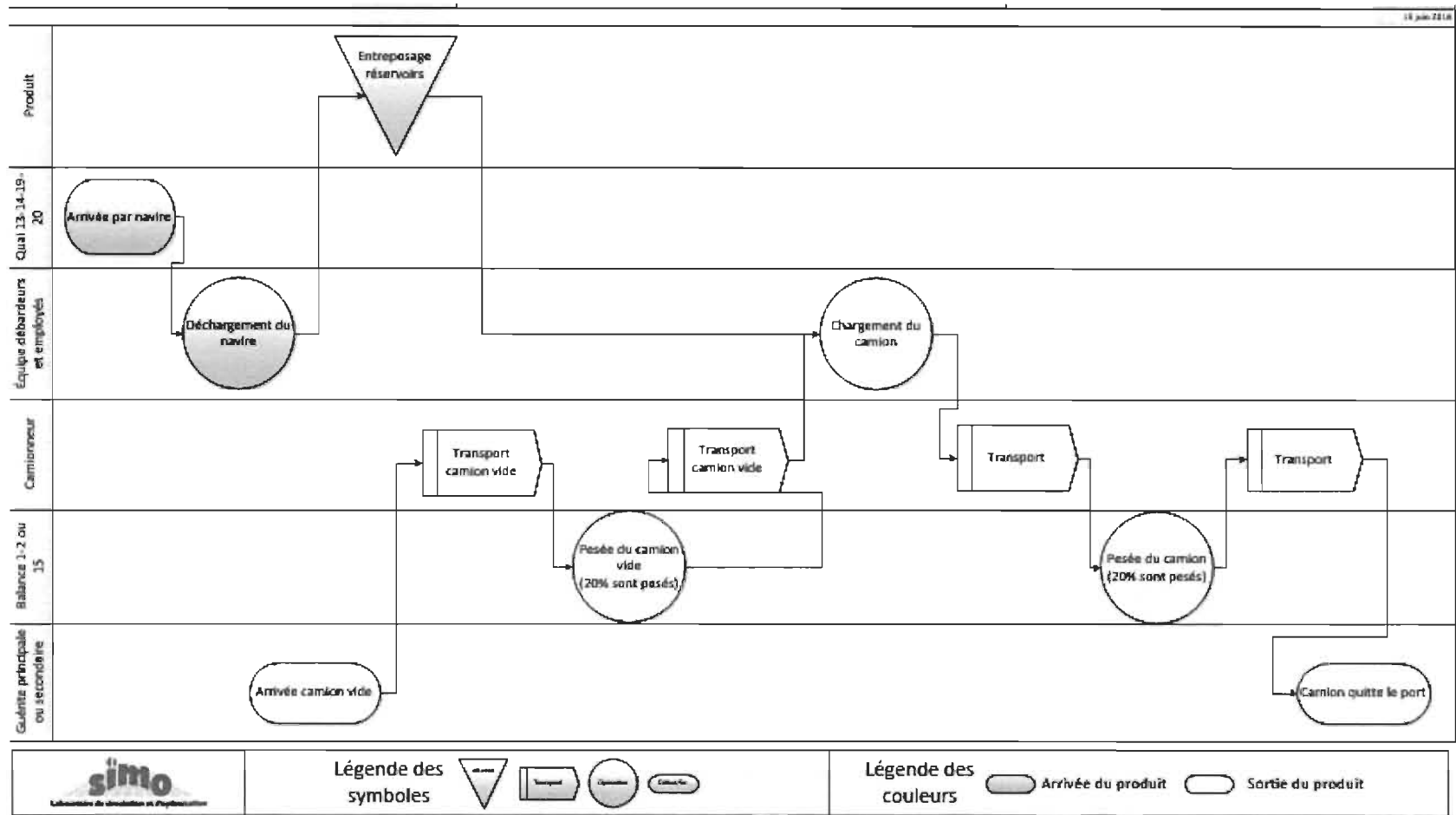


Figure 4 : Cartographie du produit PF

Lorsque le navire est à quai, le produit est déchargé directement dans les réservoirs à l'aide de pompes et y est entreposé jusqu'à ce qu'un camion vienne chercher le produit. Lorsqu'un camion se présente au port, il entre par la guérite principale et doit présenter sa carte comme l'ensemble des camionneurs. Par la suite, il se dirige vers la balance s'il doit être pesé (environ 20% des camions sont pesés). S'il ne doit pas être pesé, il se présente à l'aire de chargement directement. Les camions qui doivent être pesés sont ceux qui chargent ou déchargent un produit dans un lieu où aucune balance certifiée par Poids et Mesures Canada n'est disponible. Chaque camionneur connaît le numéro de la pompe à laquelle il doit charger et, au total, 3 pompes sont disponibles. Les camionneurs se placent donc en attente sur le côté de la rue jusqu'à ce que la pompe soit disponible. Une fois le camion chargé, si le camionneur a pesé son camion avant le chargement, il doit retourner à la balance pour être pesé de nouveau afin de calculer la quantité exacte de liquide contenu dans son camion. Sinon, il se présente directement à la guérite principale et quitte le port.

Une fois les cartographies élaborées, un diagramme de circulation pour chacun des deux produits a été élaboré afin de visualiser les trajets empruntés. L'information a été recueillie lors des entrevues avec les utilisateurs et lors d'observations sur le terrain. La Figure 5 présente ce diagramme pour le produit PG1 alors que la Figure 6 présente le diagramme pour le produit PF.

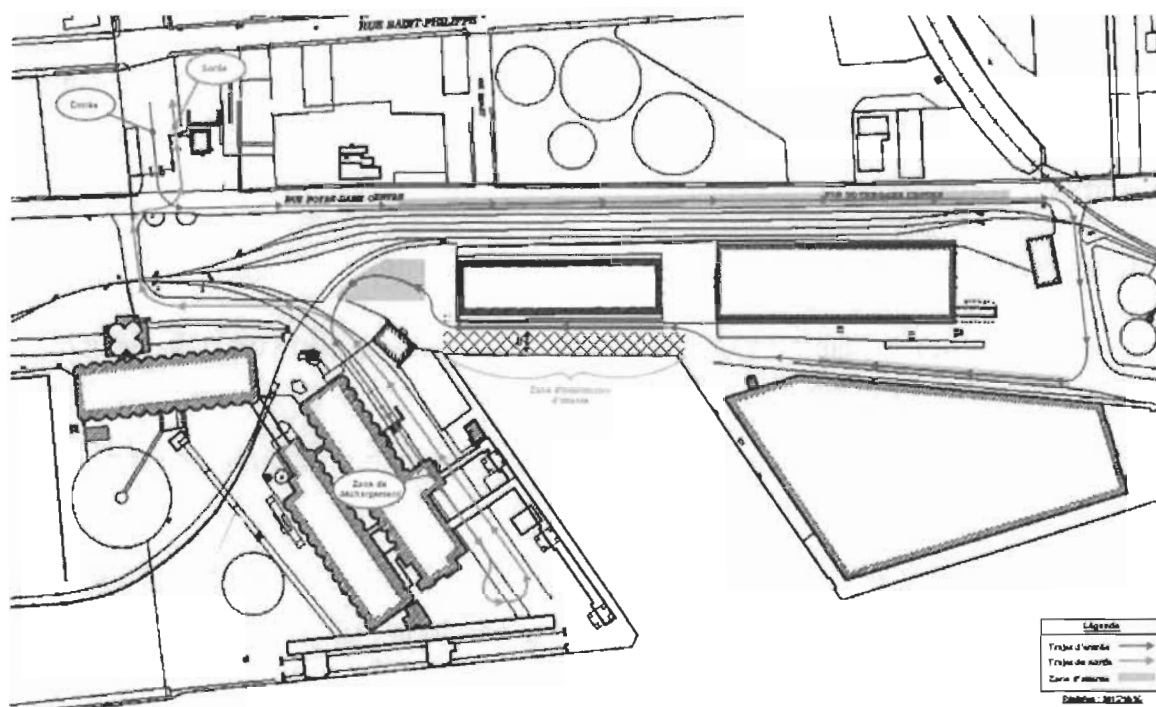


Figure 5 : Diagramme de circulation du produit PG1

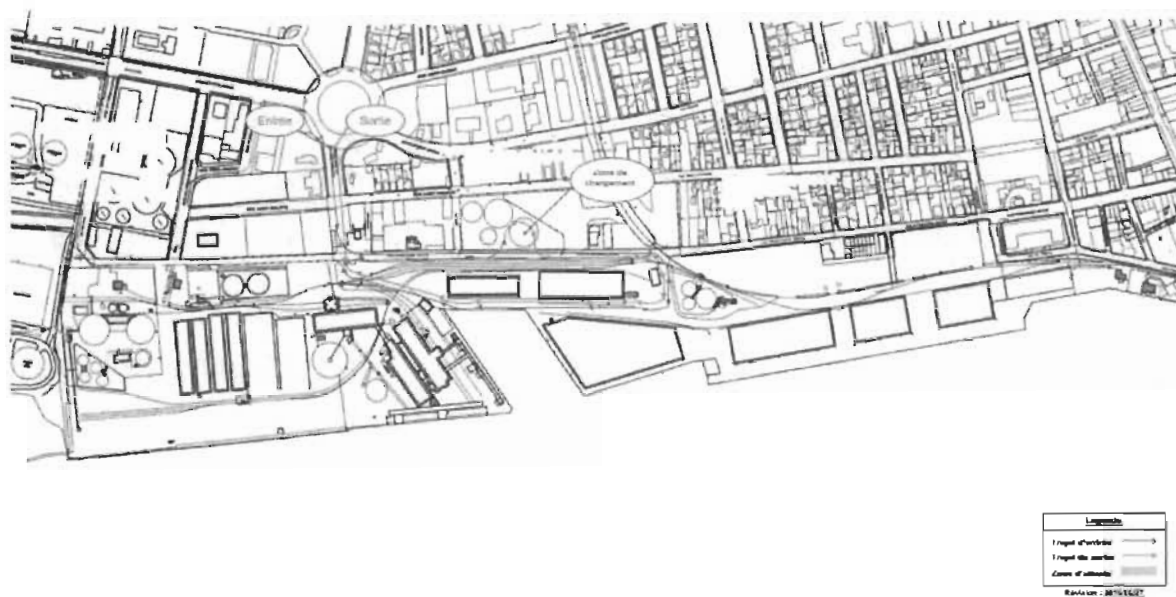


Figure 6 : Diagramme de circulation du produit PF

4.2 Scénario 1 : système de rendez-vous

L'objectif de ce scénario est de vérifier si la mise en place d'un système de rendez-vous permet de réduire le temps de passage moyen des camions dans la zone portuaire

Les 4 systèmes de rendez-vous suivants ont été testés :

- À heure fixe (distribution équilibrée ou parfaite de l'arrivée des camions sur l'ensemble de la journée de travail)
- Plages de 4 heures - aléatoire (arrivée aléatoire des camions durant ces 4 heures)
- Plages de 4 heures - 80/20 (80% des camions arrivent dans la 1ère heure)
- Plages de 2 heures - 80/20 (80% des camions arrivent dans la 1ère heure)

4.2.1 Système de rendez-vous à heure fixe

Pour simuler le système de rendez-vous à heure fixe pour le produit PG1, 480 minutes (durée de la journée de travail) ont été divisées par 64 camions (nombre de camions de PG1 observés durant la collecte de données). Ainsi l'arrivée d'un camion devait être planifiée toutes les 7,5 minutes.

Puisque les horaires pour les deux produits diffèrent, pour le produit PF, 960 minutes ont été divisées par 96 camions (nombre de camions observés durant la collecte de données). Ainsi l'arrivée d'un camion devait être planifiée à toutes les 10 minutes.

Ce scénario génère les temps de passage moyens qui sont présentés au Tableau 13.

Tableau 13 : Temps de passage et nombre de camions en attente pour rendez-vous à heure fixe

Système de rendez-vous	Temps de passage moyen (minutes)		Nombre de camions en attente		
	Camions de PG1	Camions de PF	Moyenne	Moyenne des 100 maximums	Écart-type des 100 maximums
Sans rendez-vous (situation actuelle)	81,34	76,79	10,69	35,88	3,67
Heure fixe	36,09	35,13	2,10	4,71	0,91
Impact	↓ 56%	↓ 54%	↓ 80%	↓ 87%	↓ 75%

4.2.2 Système de rendez-vous plages de 4 heures avec arrivée aléatoire

Pour simuler le système de rendez-vous (Plages de 4 heures – arrivée aléatoire), les 64 camions du produit PG1 ont été divisés en 2 groupes de 32 camions. Dans chacun des groupes, 10 séries de nombres aléatoires ont été générées représentant les heures d'arrivée des camions entre 8h et 12h et entre 12h et 16h.

De même, les 96 camions de PF ont été divisés en 4 groupes de 24 camions. Dans chacun des groupes, 10 séries de nombres aléatoires ont été générés représentant les heures d'arrivée des camions entre 6h et 22h.

Les heures d'arrivée générées pour chaque série ont été regroupées en un nombre de camions par plage d'une heure.

Par exemple, 7 camions arrivent aléatoirement entre 8h à 9h et ainsi de suite.

Chaque série a été simulée 100 fois. Le Tableau 14 et le Tableau 15 présentent le nombre moyen de camions générés chaque heure pour les 10 séries ainsi que le nombre minimum et maximum de camions arrivant par heure.

Tableau 14 : Nombre de camions de PG1 générés par heure pour système de rendez-vous 4 heures aléatoires

Nombre de camions de PG1 (10 séries)			
Heures	Minimum	Moyenne	Maximum
8h-9h	5	8,2	12
9h-10h	6	8,3	10
10h-11h	6	7,8	11
11h-12h	5	7,7	12
12h-13h	5	8,1	13
13h-14h	3	7,4	11
14h-15h	5	8,2	14
15h-16h	4	8,3	13
TOTAL	N/A	64	N/A

Tableau 15 : Nombre de camions de PF générés par heure pour système de rendez-vous 4 heures aléatoires

Nombre de camions de PF (10 séries)			
Heures	Minimum	Moyenne	Maximum
6h-7h	1	5,2	8
7h-8h	4	6	10
8h-9h	4	6	10
9h-10h	3	6,8	10
10h-11h	2	5,6	9
11h-12h	4	5,7	9
12h-13h	4	6,2	10
13h-14h	4	6,5	11
14h-15h	4	5,2	8
15h-16h	0	6	10
16h-17h	4	6,9	9
17h-18h	3	5,9	8
18h-19h	3	6,3	10
19h-20h	2	4,5	7
20h-21h	5	7,3	9
21h-22h	2	5,9	10
TOTAL	N/A	96	N/A

Le Tableau 16 présente les résultats de la simulation des 10 séries de nombres aléatoires répliquées 100 fois chacune pour les deux produits.

Tableau 16 : Résultats de la simulation des 10 séries de nombres aléatoires pour système de rendez-vous 4 heures aléatoires

Système de rendez-vous	Temps de passage (en minutes)		Nombre de camions en attente		
	Camions de grain	Camion de fertilisants	Moyenne	Moyenne des 100 Maximums	Écart-type des 100 maximums
Sans rendez-vous (situation actuelle)	82,94	76,79	10,69	35,88	3,67
Plages de 4 heures (aléatoire)	42,96	56,45	4,26	11,90	4,34
Impact	↓ 48%	↓ 26%	↓ 60%	↓ 67%	↑18%

4.2.3 Système de rendez-vous plages de 4 heures 80/20

Pour simuler ce système de rendez-vous (Plages de 4 heures – 80/20) les 64 camions de PG1 ont été divisés en 2 groupes de 32 camions. Les camions arrivent de façon aléatoire durant ces plages d'une heure. Le Tableau 17 présente le nombre de camions par heure.

Tableau 17 : Nombre de camions de PG1 simulé par heure pour système de rendez-vous 4 heures 80/20

Heures	Nombre de camions	Heures	Nombre de camions
8h à 9h	26	12h à 13h	26
9h à 10	2	13h à 14h	2
10h à 11h	2	14h à 15h	2
11h à 12h	2	15h à 16h	2
Total	32	Total	32

Aussi, les 96 camions de PF ont été divisés en 4 groupes de 24 camions. Les camions arrivent de façon aléatoire durant ces plages d'une heure. Le Tableau 18 présente le nombre de camions par heure.

Tableau 18 : Nombre de camions de PF simulé par heure pour système de rendez-vous 4 heures 80/20

Heures	Nombre de camions	Heures	Nombre de camions	Heures	Nombre de camions	Heures	Nombre de camions
6h à 7h	19	10h à 11h	19	14h à 15h	19	18h à 19h	19
7h à 8h	2	11h à 12h	2	15h à 16h	2	19h à 20h	2
8h à 9h	2	12h à 13h	2	16h à 17h	2	20h à 21h	2
9h à 10h	1	13h à 14h	1	17h à 18h	1	21h à 22h	1
Total	24	Total	24	Total	24	Total	24

Le Tableau 19 présente les résultats de la simulation avec 100 répliques.

Tableau 19 : Résultats de la simulation pour système de rendez-vous 4 heures 80/20

Système de rendez-vous	Temps de passage (en minutes)		Nombre de camions en attente		
	Camions de PG1	Camions de PF	Moyenne	Moyenne des 100 Maximums	Écart-type des 100 maximums
Sans rendez-vous (situation actuelle)	82,94	76,79	10,69	35,88	3,67
2 plages de 4 heures (80%)	75,6	89,33	10,88	20,58	5,21
Impact	↓ 9%	↑ 16%	↑ 2%	↓ 43%	↑ 42%

4.2.4 Système de rendez-vous 2 heures 80/20

Pour simuler ce système de rendez-vous (Plages de 2 heures – 80/20), les 64 camions de PG1 ont été divisés en 4 groupes de 16 camions. Les camions arrivent de façon aléatoire durant ces plages d'une heure. Le Tableau 20 présente les valeurs simulées.

Tableau 20 : Nombre de camions de PG1 simulé par heure pour système de rendez-vous 2 heures 80/20

Heures	Nombre de camions	Heures	Nombre de camions	Heures	Nombre de camions	Heures	Nombre de camions
8h à 9h	13	10h à 11h	13	12h à 13h	13	14h à 15h	13
9h à 10h	3	11h à 12h	3	13h à 14h	3	15h à 16h	3
Total	16	Total	16	Total	16	Total	16

Aussi, les 96 camions de PF ont été divisés en 8 groupes de 12 camions. Dans chacun des groupes, les arrivées des camions ont été générées de la façon présentée au Tableau 21.

Tableau 21 : Nombre de camions de PF simulé par heure pour système de rendez-vous 2 heures 80/20

Heures	Nombre de camions	Heures	Nombre de camions	Heures	Nombre de camions	Heures	Nombre de camions
6h à 7h	10	8h à 9h	10	10h à 11h	10	12h à 13h	10
7h à 8h	2	9h à 10h	2	11h à 12h	2	13h à 14h	2
Total	12	Total	12	Total	12	Total	12
Heures	Nombre de camions	Heures	Nombre de camions	Heures	Nombre de camions	Heures	Nombre de camions
14h à 15h	10	16h à 17h	10	18h à 19h	10	20h à 21h	10
15h à 16h	2	17h à 18h	2	19h à 20h	2	21h à 22h	2
Total	12	Total	12	Total	12	Total	12

Le Tableau 22 présente les résultats de la simulation avec 100 répliquations.

Tableau 22 : Résultats de la simulation pour système de rendez-vous 2 heures 80/20

Système de rendez-vous	Temps de passage (en minutes)		Nombre de camions en attente		
	Camions de grain	Camion de fertilisants	Moyenne	Moyenne des 100 Maximums	Écart-type des 100 maximums
Sans rendez-vous (situation actuelle)	82,94	76,79	10,69	35,88	3,67
4 plages de 2 heures (80%)	45,76	57,76	4,22	11,5	3,4
Impact	↓ 45%	↓ 25%	↓ 61%	↓ 68%	↓ 7%

4.2.5 Constats suite au scénario concernant l'instauration d'un système de rendez-vous

Le Tableau 23 résume les résultats obtenus pour les systèmes de rendez-vous

Tableau 23 : Résumé des résultats obtenus pour le scénario 1

Systèmes de rendez-vous	Temps de passage moyen (en minutes)		Nombre de camions en attente		
	Camions PG1	Camions PF	Moyenne	Moyennes des 100 Maximums	Écart-type des 100 maximums
Situation actuelle	82,94	76,79	10,69	35,88	3,67
Plages de 4 heures (80%)	75,6	89,33	10,88	20,58	5,21
Plages 2 heures (80%)	45,76	57,76	4,22	11,50	3,40
Plages 4 heures (aléatoire)	42,96	56,45	4,26	11,90	4,34
À heure fixe	36,09	35,13	2,10	4,71	0,91

Sans grande surprise, il est possible de constater que pour les deux produits, le système de rendez-vous à heure fixe est celui qui permet d'obtenir le temps de passage le plus faible et le nombre de camions en attente moyen et maximum le plus faible. Par contre, il est intéressant de constater que le système de rendez-vous de 2 heures 80/20 donne sensiblement les mêmes résultats que les plages de 4 heures aléatoires. Il a donc été choisi de continuer l'étude avec les plages de 2 heures 80/20 seulement étant donné qu'elles risquent de représenter plus fidèlement le comportement des camionneurs. Il est intéressant de constater que pour le produit PF, les plages de rendez-vous de 4 heures 80/20 font augmenter les valeurs des indicateurs. Ceci pousse à croire que, pour la journée observée, la répartition des camions se présentant au port pour venir charger ce produit était plus lissée que le 80/20 proposée.

4.3 Scénario 2 : ajout d'un puits

L'objectif est de déterminer si l'ajout d'un puits de déchargement (aux deux puits déjà existants) permettrait de décharger 120 camions/jour de 8H et 240 camions/jour de 16H pour le produit PG1.

Il sera aussi possible de déterminer si une seule sonde (probe) serait suffisant pour recevoir les camions provenant des trois puits de déchargement.

Pour simuler ce scénario, un camion arrive toutes les minutes afin de s'assurer qu'il y ait toujours un camion prêt pour le déchargement.

Le nombre de camions déchargés entre 8h et 16h pour une journée de 8 heures et entre 8h et minuit pour une journée de 16 heures a été calculé.

100 répliques du modèle de simulation ont été exécutées.

Le Tableau 24 présente les résultats obtenus à l'aide de la simulation.

Tableau 24 : Résultats obtenus avec la simulation pour le scénario 2

Indicateurs	Journée de 8h	Journée de 16h
Nombre de camions déchargés aux puits actuels	82,91	164,47
Nombre de camions déchargés au nouveau puit	40,36	80,98
Total	123,27	243,83

Il est donc possible de conclure, qu'il serait envisageable de décharger 120 camions en 8 heures et 240 en 16 heures dans les conditions étudiées.

Il a été observé, grâce au modèle de simulation, qu'il y a en moyenne 6 camions en attente pour chaque puit de déchargement. Il faudrait donc laisser suffisamment d'espace entre la sonde et les puits pour que la file d'attente au déchargement ne génère pas d'engorgement à l'étape d'échantillonnage.

Le temps moyen d'échantillonnage est de 6,04 minutes/camion et le temps moyen de déchargement est de 11,50 minutes/camion ce qui laisse croire que le goulot est le déchargement.

4.4 Scénario 3 : ajout d'un produit PX

L'objectif est de déterminer si le trafic routier engendré par l'entreposage d'un nouveau produit PX à un nouveau terminal a un impact sur le trafic routier actuel.

Puisqu'il s'agit d'un produit fictif, plusieurs hypothèses ont dû être émises :

- Produit similaire au déchargement du produit PG1
- Un puits de déchargement pouvant décharger 40 camions maximum en 8H
- L'arrivée des camions est déterminée selon les observations réalisées le 15 juin 2016 pour le déchargement du produit PG1.
- Temps d'échantillonnage basé sur les observations du déchargement du produit PG1.

Deux cas ont été simulés : arrivée de 32 camions/8 heures (nombre de camions observé durant la journée d'observation) et de 40 camions/8 heures (capacité maximale). Les taux d'arrivée des camions par heure utilisés sont similaires à ceux observés au déchargement du produit PG1 et sont présentés au Tableau 25.

Tableau 25 : Nombre de camions simulés selon le scénario 3

		Nombre de camions (déchargement du nouveau produit PX)	
Heures	Nombre de camions observés (déchargement du PG)	La moitié du nombre de camions observés (déchargement du PG)	Le nombre maximum possible pour un puit de déchargement
Avant 8h	24	12	15
8h-9h	4	4	3
9h-10h	5	2	3
10h-11h	7	4	4
11h-12h	3	2	2
12h-13h	5	2	3
13h-14h	4	2	3
14h-15h	10	5	6
15h-16h	2	2	1
Total	64	32	40

100 répliques du modèle de simulation ont été exécutées afin de mesurer le nombre de camions maximum en attente sur le terminal. Les temps de passage et la longueur des files d'attente sont présentés au Tableau 26.

Tableau 26 : Temps de passage et longueur des files d'attente pour le produit PX

		32 camions/8 heures	40 camions /8 heures
Temps de passage moyen (en minutes)		83,04	122,69
Longueur maximale de la file d'attente (en nombre de camions)	Minimum	11	14
	Moyenne et écart-type	11,72 ± 0,75	15,76 ± 1,9
	Maximum	14	22
	Quartile 1	11	14,75
	Quartile 2	12	15
	Quartile 3	12	16

Ne sachant pas exactement combien de camions pourront attendre au terminal sans déborder dans la zone d'attente des camions du produit PG1 (voir Figure 3), le pourcentage du temps que cela se produise pour différentes capacités a été calculée. (Tableau 27)

Tableau 27 : Probabilité de débordement à l'extérieur du terminal en fonction de la capacité de la zone d'attente

Capacité de la zone d'attente sur le terminal	% du temps qu'il y a débordement à l'extérieur du terminal	
	Arrivée de 32 camions/8 heures	Arrivée de 40 camions/8 heures
6 camions	33%	61%
9 camions	18%	47%
12 camions	2%	30%
15 camions	0%	10%
18 camions	0%	2%
21 camions	0%	0%

Il est possible d'interpréter les résultats de la façon suivante : si la capacité du terminal est de 6 camions, il y aura débordement à l'extérieur du terminal dans 33% du temps si 32 camions/8 heures sont attendus et 61% si 40 camions/8 heures sont attendus.

Ces scénarios ont permis d'apporter des indications sur la capacité de la zone d'attente du terminal aux administrateurs du port à l'étude. Les connaissances acquises lors de la simulation de ces scénarios ont été utilisées pour pousser plus loin l'étude des systèmes de rendez-vous dans les ports sans conteneurisation. En effet, l'implantation de rendez-vous implique que les camions peuvent être en retard ou en retard. Le chapitre suivant présente les résultats des plans d'expériences.

Chapitre 5 : Résultats et analyse des plans d'expériences

Avec le modèle de simulation valide et les plans d'expériences, des analyses ont été faites sur le temps de passage total et le taux d'utilisation des ressources. Deux analyses sont effectuées. La première consiste à déterminer la solution qui minimise le temps de passage des camions ou qui maximise le taux d'utilisation des ressources. La deuxième analyse consiste à trouver une solution robuste c'est-à-dire qui sera moins sensible aux variations du nombre de camions attendus par jour et de la proportion de camions déviant de leur plage de rendez-vous. De plus, une analyse plus approfondie sur chaque produit est présentée.

5.1 Analyses pour le produit PG1

5.1.1 Analyse du temps de passage total

Le temps moyen de passage actuel des camions transportant du PG1 est 81,34 minutes dans des conditions où il n'y a aucun système de rendez-vous en place ni de politique de gestion des avances et des retards. Les camions sont traités actuellement selon la règle FIFO. Pour cette analyse, le modèle mathématique suivant a été utilisé : $Y_{ijk} = (\mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ijk})$. Puisque la variable Politique de gestion de l'avance et de retard (B) implique des politiques pour composer avec les retards et les avances des camions, les paramètres suivants ont été fixés : 5% des camions sont en avance, 90% des camions sont à l'heure et 5% des camions sont en retard. Ce choix a été fait étant donné que ce serait la cible à atteindre grâce aux mesures dissuasives proposées par le port (refus ou priorité plus basse des camions en avance ou en retard). Le Tableau 28 présente les résultats de cette simulation pour les trois répliques effectuées. Le temps de passage inclut le temps d'attente des camions à l'heure à leur rendez-vous et celui des camions en avance de plus de 15 minutes ou en retard.

Tableau 28 : Temps de passage obtenu grâce à la simulation

		Temps de passage (min)		
RDV (A)	Gestion trafic (B)	Réplication 1	Réplication 2	Réplication 3
2H80%	FIFO	47.79	53.33	42.17
2H80%	Priorités	47.79	53.33	42.17
2H80%	Refus	38.24	42.17	43.10
4H80%	FIFO	55.34	72.27	61.23
4H80%	Priorités	55.34	72.27	61.23
4H80%	Refus	64.77	67.90	51.24
Fixe	FIFO	39.56	40.31	43.33
Fixe	Priorités	39.56	40.31	43.33
Fixe	Refus	36.84	41.06	36.32

Le Tableau 29 présente les résultats de l'analyse de la variance effectuée à partir des résultats de la simulation pour le temps de passage total des camions du produit (annexe 3).

Tableau 29 : Analyse de la variance pour le produit PG1 concernant le temps de passage total

Facteurs	DL	SS	MS	F	Table de F	Significatif
RDV	2	2436,61	1218,31	35,39	3,56	*
Gestion A/R	2	84,08	42,04	1,22	3,56	
RDV * Gestion A/R	4	26,19	6,55	0,19	2,94	
Erreur	18	619,57	34,42			
Total	26	3166,45				

L'analyse de la variance démontre que les politiques de rendez-vous sont significatifs à un seuil de 5% et que la variable gestion A/R et l'interaction ne sont pas significatifs.

L'analyse de Newmans-Keuls démontre, pour le facteur RDV, que le système de rendez-vous de 2 heures avec 80% des camions qui arrivent la 1ere heure (temps de passage moyen = 45,57 minutes) et qu'un système à heures fixes (temps de

passage moyen = 40,06 minutes) sont équivalents statistiquement et permettent de minimiser le temps d'attente total des camions. Le système de rendez-vous de 4 heures avec 80% des camions qui arrivent la 1^{ère} heure occasionne le plus long temps d'attente (temps de passage moyen = 62,40 minutes). Donc, pour minimiser le temps de passage total avec le nombre actuel de camions, deux choix s'offrent au port :

- les plages de rendez-vous de 2 heures avec n'importe quelle politique de gestion des A/R ou
- les rendez-vous à heure fixe avec n'importe quelle politique de gestion des A/R

La Figure 7 présente ces résultats.

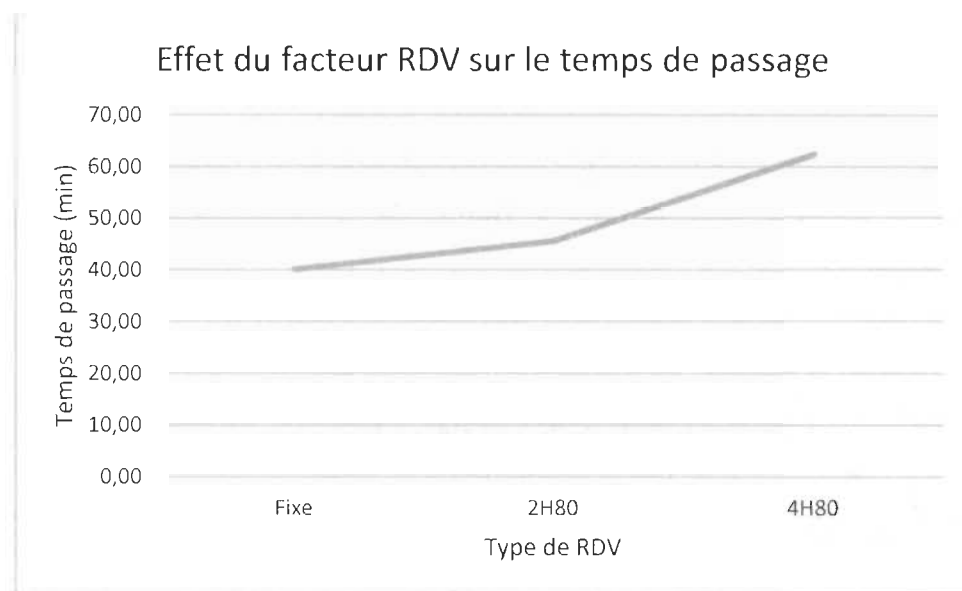


Figure 7 : effet du facteur RDV sur le temps de passage PG1

Une politique de gestion des rendez-vous avec des plages de 2 heures a l'avantage d'être plus flexible et d'être plus appréciée par les camionneurs qu'une politique de gestion des rendez-vous à heure fixe. Évidemment, il est probable que les administrateurs n'instaurent aucune politique de gestion des A/R et conservent leur politique actuelle soit FIFO.

Afin de déterminer quels niveaux des facteurs permettent d'obtenir un temps de passage le plus robuste (stable) possible en fonction de la variation des facteurs bruits, un plan d'expérience Taguchi croisé a été effectué : $Y_{ijklmo} = (\mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ijk})(\mu + C_l + D_m + \varepsilon_{lmo})$

Le Tableau 30 présente les résultats de cette simulation. Le temps de passage inclut le temps d'attente des camions à l'heure à leur rendez-vous et celui des camions en avance de plus de 15 minutes ou en retard.

Tableau 30 : Temps de passage obtenu grâce à la simulation PG1

		Proportion (D)										Temps passage moyen
		Volume (C)	5-90-5	10-80-10	15-70-15	5-90-5	10-80-10	15-70-15	5-90-5	10-80-10	15-70-15	
RDV (A)	Gestion A/R (B)		Max	Max	Max	85% Max	85% Max	85% Max	70% Max	70% Max	70% Max	
2H80%	FIFO		41,96	47,4	45,39	55,53	47,44	44,3	36,71	39,33	36,46	43,84
2H80%	Priorités		40,38	47,76	35,15	44,32	42,46	37,16	40,21	39,03	40,85	40,81
2H80%	Refus		45,49	46,12	35,35	38,59	35,45	34,42	37,17	38,36	32,82	38,20
4H80%	FIFO		74,84	63,63	46,81	65,75	68,78	43,98	46,89	52,92	52,39	57,33
4H80%	Priorités		77,97	71,07	65,11	68,26	50,39	80,54	49,43	46,09	54,45	64,81
4H80%	Refus		59,31	60,93	60,04	67,22	50,84	57,23	47,76	44,51	48,15	55,11
Fixe	FIFO		44,02	42,12	39	44,19	45,18	39,12	44,12	46,25	37,28	42,36
Fixe	Priorités		44,02	42,12	38,92	44,19	45,18	39,12	44,12	46,25	37,28	42,36
Fixe	Refus		35,07	39,46	35,53	38,6	36,87	33,41	37,8	34,93	35,32	36,33

Le Tableau 31 montre l'analyse de la variance effectuée à partir des résultats de la simulation pour le temps de passage total des camions du produit (annexe 3).

Tableau 31 : Analyse de la variance pour le produit PG1 concernant le temps de passage total

Facteurs	DL	SS	MS	F	Table de F	Significatif
RDV	2	6122,23	3061,12	62,72	3,14	*
Gestion A/R	2	549,25	274,63	5,63	3,14	*
RDV*Gestion A/R	4	277,15	69,29	1,42	2,52	
Volume	2	794,96	397,48	8,14	3,14	*
Proportion	2	410,55	205,27	4,21	3,14	*
Erreur	68	3319,06	48,81			
Total	80	11473,21				

L'analyse de la variance démontre que les facteurs Volume et Proportion sont significatifs à un seuil de 5% et qu'ils ont un impact sur le temps de passage des camions. Il est donc intéressant de faire l'analyse des rapports signal/bruit afin de déterminer la combinaison des facteurs RDV et Gestion A/R la plus robuste. Pour minimiser le temps de passage moyen, la formule suivante a été utilisée :

$$S/N = -10\log(\sum(y^2)/n)$$

où

y représente les données collectées

n le nombre de données collectées

S/N le rapport signal/bruit

Le Tableau 32 présente les ratios signal/bruit calculés pour chaque essai. Le ratio le plus élevé produit le moins de variation (en gris dans le tableau).

Tableau 32 : Rapport signal/bruit pour le temps de passage total pour le produit PG1

Facteur RDV	Facteur Gestion A/R	Ratio S/N
2H80%	FIFO	-32,91
2H80%	PRIORITÉ	-32,25
2H80%	REFUS	-31,70
4H80%	FIFO	-35,31
4H80%	PRIORITÉ	-36,49
4H80%	REFUS	-34,90
FIXE	FIFO	-32,56
FIXE	PRIORITÉ	-32,56
FIXE	REFUS	-31,22

Cette analyse montre qu'en mettant en place la politique de rendez-vous à heures fixes et que refuser systématiquement les camions en avance de plus de 15 minutes et en retard permet d'obtenir le temps de passage total le moins sensible aux variations du nombre de camions attendus par jour et de la proportion des camions déviant de leur plage de rendez-vous. Cependant la mise en place d'un système de rendez-vous à heure fixe et d'une politique de refus des camions en retard ou en avance pourrait sembler bien rigide aux yeux des administrateurs du port.

5.1.2 Analyse du taux d'utilisation des ressources

Le taux d'utilisation actuel de la ressource (déchargement) pour le produit PG1 est de 70% dans des conditions où il n'y a aucun système de rendez-vous en place ni de politique de gestion des avances et des retards. Les camions sont traités actuellement selon la règle FIFO. Pour cette analyse, l'équation mathématique $Y_{ijk} = (\mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \epsilon_{ijk})$ a été utilisé ainsi que les paramètres suivants : 5% des camions sont en avance, 90% des camions sont à l'heure et 5% des camions sont en retard. Comme mentionné précédemment, ce choix a été fait étant donné que ce serait la cible à atteindre grâce aux mesures dissuasives proposées par le port (refus ou priorité plus basse des camions en avance ou en retard). Le Tableau 23 présente les résultats cette simulation pour les trois répliques effectuées.

Tableau 33 : Taux d'utilisation obtenus grâce à la simulation

		Taux d'utilisation (%)		
RDV (A)	Gestion trafic (B)	Réplication 1	Réplication 2	Réplication 3
2H80%	FIFO	0.6735	0.8182	0.6305
2H80%	Priorités	0.6735	0.8182	0.6305
2H80%	Refus	0.4868	0.6789	0.7156
4H80%	FIFO	0.5947	0.7531	0.6517
4H80%	Priorités	0.5947	0.7531	0.6517
4H80%	Refus	0.61	0.6592	0.4675
Fixe	FIFO	0.5409	0.5796	0.6149
Fixe	Priorités	0.5409	0.5796	0.6149
Fixe	Refus	0.5653	0.6342	0.5889

Le Tableau 34 présente l'analyse de la variance effectuée à partir des résultats de la simulation pour le temps de passage total des camions du produit PG1. Les résultats obtenus sont présentés en annexe 3.

Tableau 34 : Analyse de la variance pour le produit PG1 concernant le taux d'utilisation des ressources

Facteurs	DL	SS	MS	F	Table de F	Significatif
RDV	2	0,04185091	0,02092545	3,07769051	3,566	
Gestion A/R	2	0,0150467	0,00752335	1,10652547	3,566	
RDV * Gestion A/R	4	0,01382122	0,0034553	0,50820207	2,946	
Erreur	18	0,12238338	0,00679908			
Total	26	0,19310221				

L'analyse de la variance démontre qu'aucun facteur n'est significatif au seuil de 5% (colonne significatif vide). Cela signifie que les administrateurs de port peuvent choisir n'importe quel système de rendez-vous et n'importe quelle politique de

gestion de retards et des avances. Ces deux facteurs n'affectent pas le taux d'utilisation des ressources.

Dans une deuxième analyse, des facteurs bruits ont été introduits. Un plan d'expérience Taguchi croisé a été effectué : $Y_{ijklmo} = (\mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ijk})(\mu + C_l + D_m + \varepsilon_{lmo})$. Le Tableau 35 présente les résultats de la simulation.

Tableau 35 : Taux d'utilisation obtenus grâce à la simulation pour le produit PG1

RDV (A)	Gestion A/R (B)	Proportion (D)	5-90-5	10-80-10	15-70-15	5-90-5	10-80-10	15-70-15	5-90-5	10-80-10	15-70-15	Taux d'utilisation moyen
		Volume (C)	Max	Max	Max	85% Max	85% Max	85% Max	70% Max	70% Max	70% Max	
2H80%	FIFO		0,6	0,8	0,65	0,77	0,72	0,5	0,46	0,5	0,51	0,61
2H80%	Priorités		0,63	0,77	0,54	0,6	0,65	0,54	0,59	0,53	0,6	0,61
2H80%	Refus		0,62	0,7	0,53	0,59	0,51	0,43	0,52	0,47	0,33	0,52
4H80%	FIFO		0,64	0,55	0,49	0,61	0,57	0,4	0,42	0,43	0,48	0,51
4H80%	Priorités		0,87	0,63	0,59	0,64	0,5	0,63	0,44	0,43	0,49	0,58
4H80%	Refus		0,55	0,5	0,43	0,56	0,3	0,34	0,44	0,35	0,38	0,43
Fixe	FIFO		0,68	0,6	0,64	0,63	0,55	0,57	0,54	0,5	0,5	0,58
Fixe	Priorités		0,68	0,6	0,64	0,63	0,55	0,56	0,54	0,5	0,5	0,58
Fixe	Refus		0,6	0,64	0,66	0,68	0,47	0,38	0,4	0,43	0,42	0,52

Le Tableau 36 présente l'analyse de la variance effectuée à partir des résultats de la simulation pour le taux d'utilisation des ressources.

Tableau 36 : Analyse de la variance pour le produit PG1 concernant le taux d'utilisation des ressources

Facteurs	DL	SS	MS	F	p-value	Significatif
RDV	2	0,079	0,039	8,133	3,139	*
Gestion A/R	2	0,143	0,072	14,823	3,139	*
RDV*Gestion A/R	4	0,027	0,007	1,389	2,519	
Volume	2	0,316	0,158	32,701	3,139	*
Proportion	2	0,0898	0,045	9,286	3,139	*
Erreur	68	0,329	0,005			
Total	80	0,984				

L'analyse de la variance démontre que les facteurs Volume et Proportion sont significatifs à un seuil de 5% et qu'ils ont un impact sur le taux d'utilisation des ressources. Il est donc intéressant de faire l'analyse des rapports signal/bruit afin de déterminer la combinaison des facteurs RDV et GESTION A/R la plus robuste. Pour maximiser la variable dépendante, la formule suivante a été utilisée :

$$S/N = -10\log\left(\sum \frac{1}{(y^2)} / n\right)$$

où y représente les données collectées et n le nombre de données collectées.

Le Tableau 37 présente les ratios signal/bruit calculés pour chaque essai. Le ratio le plus élevé produit le moins de variation.

Tableau 37 : Rapport signal/bruit pour le taux d'utilisation des ressources pour le produit PG1

A	B	Ratio S/N
2H80%	FIFO	-4,75
2H80%	PRIORITÉ	-4,51
2H80%	REFUS	-6,23
4H80%	FIFO	-6,18
4H80%	PRIORITÉ	-5,29
4H80%	REFUS	-7,93
FIXE	FIFO	-4,88
FIXE	PRIORITÉ	-4,90
FIXE	REFUS	-6,31

Cette analyse montre qu'en mettant en place des fenêtres de rendez-vous de 2 heures et la méthode de gestion des priorités permet d'obtenir le taux d'utilisation le plus robuste. En effet, c'est dans ces conditions que le taux d'utilisation des ressources variera le moins si le nombre de camions attendus par jour et la proportion des camions déviant de leur plage de rendez-vous varient.

5.1.3 Conclusion de l'analyse pour le produit PG1

Finalement, le Tableau 38 présente les solutions obtenues pour minimiser le temps de passage des camions et pour maximiser le taux d'utilisation des ressources pour le produit PG1. Les solutions les meilleures parmi celles générées ont été simulées 100 fois afin de déterminer un temps de passage et un taux

d'utilisation attendus plus précis et pour atténuer le phénomène aléatoire de la simulation.

Tableau 38: Résumé des résultats de l'analyse de la variance et des rapports signal/bruit pour le produit PG1

Temps de passage total	RDV	GESTION A/R	Temps de passage attendu (min)	Half width Temps de passage attendu	% d'utilisation de la ressource goulot attendu	Half width % d'utilisation de la ressource goulot attendu
Solution « optimale » (minimise le temps d'attente)	2H80 ou Fixe	Pas significatif	45.84* 39.56*	1.22* 0.56*	61%* 60%*	2%* 3%*
Solution robuste	FIXE	REFUS	38.45	N.A	52%	N.A
Taux d'utilisation des ressources	RDV	GESTION A/R	Temps de passage attendu (min)	Half width Temps de passage attendu	% d'utilisation de la ressource goulot attendu	Half width % d'utilisation de la ressource goulot attendu
Solution « optimale » (maximise le taux d'utilisation)	Pas significatif	Pas significatif	N.A	N.A	N.A	N.A
Solution robuste	2H80%	PRIORITÉ	40.81	N.A	61%	N.A

* Données obtenues avec niveau du facteur Gestion A/R égal à FIFO

Tout d'abord, puisque les facteurs RDV et Gestion A/R ne sont pas significatifs pour maximiser le taux d'utilisation des ressources, il est recommandé de considérer la solution optimale qui minimise le temps de passage soit de mettre en place un système de rendez-vous 2H80% et n'importe quelle règle de gestion A/R. Il est probable que les administrateurs choisiront le statu quo et conserveront la règle FIFO. Dans ce cas, le temps de passage attendu est de 45,84 minutes, ce qui représente une amélioration de 47% par rapport au temps de passage actuel

de 82,94 minutes. Le taux d'utilisation des ressources attendu est de 61%, ce qui est légèrement plus bas que le taux actuel de 70%.

Les solutions robustes sont différentes. Pour minimiser le temps de passage, il est recommandé de mettre en place un système de rendez-vous fixe et de refuser les camions en avance ou en retard. La mise en place de ces politiques permettrait d'obtenir un temps de passage de 38,45 minutes soit une amélioration de 54% par rapport au temps de passage actuel et un taux d'utilisation de 52%. Il est un peu utopique de croire à la possibilité d'instaurer des rendez-vous fixes étant donné les facteurs incontrôlables auxquels font face les camionneurs (trafic routier, température, retard dans les opérations à effectuer en amont...). Aussi, il est peu probable que les camions soient refusés systématiquement étant donné le coût engendré par un navire à quai en attente d'être chargé. Pour maximiser le taux d'utilisation des ressources, il est recommandé de mettre en place un système de rendez-vous 2H80% et de faire une gestion des A/R par priorités. La mise en place de ces politiques permettrait d'obtenir un temps de passage de 40,81 minutes et un taux d'utilisation des ressources de 61%. Le temps de passage est un peu plus élevé qu'avec la solution robuste qui minimise le temps de passage mais permet une amélioration de 51% par rapport au 82,94 minutes actuelles.

Pour le produit PG1, deux solutions sont à retenir :

- 1) Système de rendez-vous : 2h80% et Gestion A/R : FIFO
- 2) Système de rendez-vous : 2h80% et Gestion A/R : PRIORITÉ

5.2 Analyse pour le produit PF

5.2.1 Analyse du temps de passage total

Le temps de passage actuel des camions est 76,79 minutes dans des conditions où il n'y a aucun système de rendez-vous en place ni de politique de gestion des avances et des retards. Les camions sont traités actuellement selon la règle FIFO. Pour cette analyse, le modèle mathématique suivant a été utilisé : $Y_{ijk} = (\mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ijk})$. Comme mentionné précédemment, les paramètres suivants ont été utilisés : 5% des camions en avance, 90% des camions à l'heure et 5% des

camions en retard. Ce choix a été fait étant donné que ce serait la cible à atteindre grâce aux mesures dissuasives proposées par le port (refus ou priorité plus basse des camions en avance ou en retard). Le Tableau 39 présente les résultats cette simulation pour les trois répliques effectuées. Le temps de passage inclut le temps d'attente des camions à l'heure à leur rendez-vous et celui des camions en avance de plus de 15 minutes ou en retard.

Tableau 39 : Temps de passage obtenus grâce à la simulation pour le produit PF

		Temps de passage (min)		
RDV (A)	Gestion trafic (B)	Réplication 1	Réplication 2	Réplication 3
2H80%	FIFO	40.30	64.86	76.88
2H80%	Priorités	40.30	64.86	76.88
2H80%	Refus	40.98	41.41	41.7149
4H80%	FIFO	59.01	58.95	70.98
4H80%	Priorités	59.01	58.95	70.98
4H80%	Refus	57.73	61.69	60.30
Fixe	FIFO	41.04	39.96	42.78
Fixe	Priorités	41.04	39.96	42.78
Fixe	Refus	26.08	26.05	24.77

Le Tableau 40 montre l'analyse de la variance effectuée à partir des résultats de la simulation pour le temps d'attente total des camions du produit PF (annexe 4).

Tableau 40 : Analyse de la variance pour le produit PF concernant le temps de passage total

Facteurs	DL	SS	MS	F	Table de F	Significatif
RDV	2	3184,39	1592,19	17,91	3,56	*
Gestion A/R	2	963,26	481,63	5,41	3,56	*
RDV * Gestion A/R	4	289,90	72,48	0,81	2,94	
Erreur	18	1600,08	88,89			
Total	26	6037,63				

L'analyse de la variance démontre que le facteur RDV et Gestion A/R sont significatifs à un seuil de 5% et que l'interaction entre les deux facteurs ne l'est pas.

L'analyse de Newmans-Keuls démontre, pour le facteur RDV, qu'un système à heures fixes (temps de passage moyen = 36,05 minutes) permet de minimiser le temps d'attente total des camions tandis que des plages de rendez-vous de 2 heures avec 80% des camions qui arrivent la 1^{ère} heure (temps de passage moyen = 54,24 minutes) et des plages de rendez-vous de 4 heures avec 80% des camions qui arrivent la 1^{ère} heure (temps de passage moyen = 61,96 minutes) occasionnent le plus long temps d'attente. Ces résultats sont présentés à la Figure 8. Donc, pour minimiser le temps d'attente total il faudrait instaurer un système de rendez-vous à heure fixe. Les résultats de cette analyse sont présentés en annexe 4.

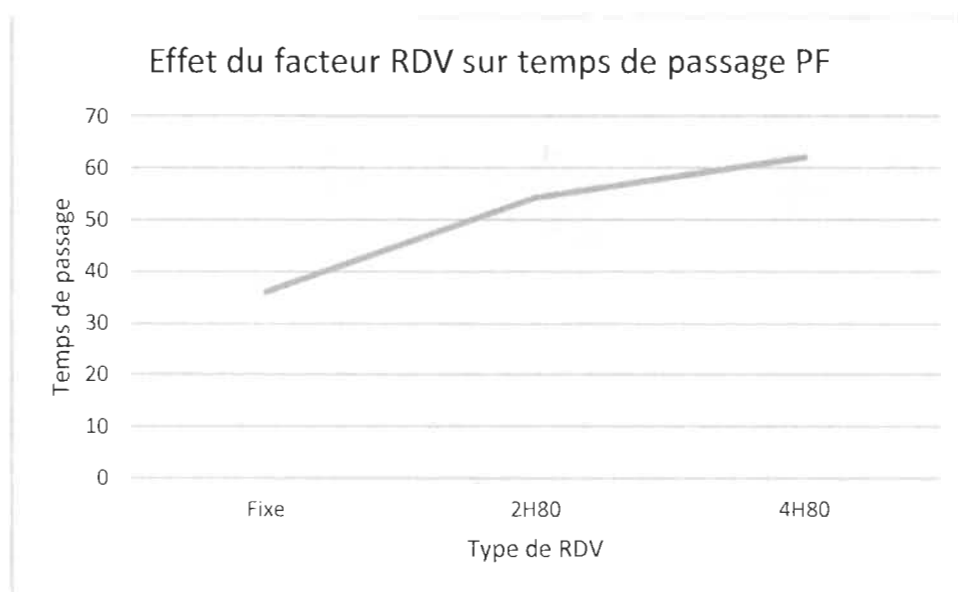


Figure 8 : Effet du facteur RDV sur temps de passage PF

L'analyse de Newmans-Keuls démontre, pour le facteur Gestion A/R, que de refuser les camions (temps de passage moyen = 42,30 minutes) permet de minimiser le temps d'attente total des camions tandis que le système de gestion FIFO (temps de passage moyen = 54,97 minutes) et le système de gestion des

priorités (54,97 minutes) occasionnent le plus long temps d'attente. Donc, pour minimiser le temps d'attente total, il faudrait instaurer un système de refus des camions. La Figure 9 présente les résultats. Les résultats de l'analyse de Newmans-Keuls sont présentés en annexe 4.

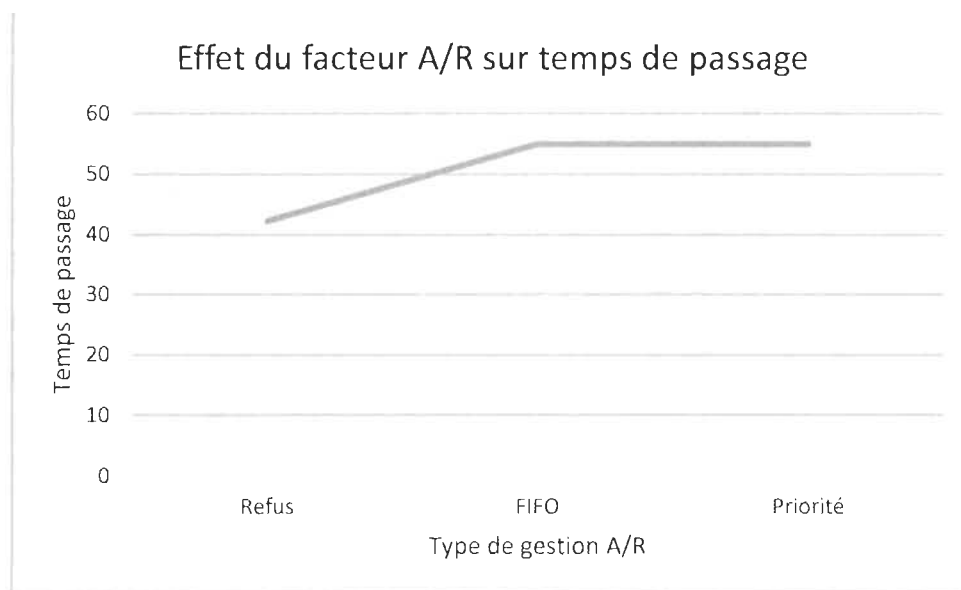


Figure 9 : Effet du facteur Gestion A/R sur le temps de passage PF

Donc, pour minimiser le temps d'attente total avec le nombre de camions actuel, un choix s'offre au port :

- L'instauration de rendez-vous à heure fixe et le refus systématique des camions en retard ou en avance de plus de 15 minutes.

Afin de déterminer quels niveaux des facteurs permettent d'obtenir un temps de passage le plus robuste possible en fonction de la variation des facteurs bruits, un plan d'expérience Taguchi croisé a été effectué : $Y_{ijklmo} = (\mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ijk})(\mu + C_l + D_m + CM_{lm} + \varepsilon_{lmo})$. Le Tableau 42 présente les résultats de cette simulation. Le temps de passage inclut le temps d'attente des camions à l'heure à leur rendez-vous et celui des camions en avance de plus de 15 minutes ou en retard.

Tableau 41 : Temps de passage obtenus grâce à la simulation pour le produit PF

RDV (A)	Gestion trafic (B)	Proportion (D)	Volume (C)									Temps passage moyen
			5-90-5	10-80-10	15-70-15	5-90-5	10-80-10	15-70-15	5-90-5	10-80-10	15-70-15	
			Max	Max	Max	85% Max	85% Max	85% Max	70% Max	70% Max	70% Max	
2H80%	FIFO		47,28	37,95	35,86	40,63	36,93	39,83	42,63	28,85	27,22	37,46
2H80%	Priorités		47,28	37,95	35,86	40,63	36,93	39,83	42,63	28,85	27,22	37,46
2H80%	Refus		36,89	34,65	35,75	36,16	32,78	30,89	35,99	30,79	29,14	33,67
4H80%	FIFO		87,36	85,57	47,37	63,54	90,07	41,22	41,13	64,18	35,63	61,79
4H80%	Priorités		87,36	85,57	47,37	47,37	90,07	41,22	41,13	64,18	35,63	59,99
4H80%	Refus		65,64	103,33	47,49	80,8	47,98	50,11	44,49	56,34	42,49	59,85
Fixe	FIFO		32,6	30,89	32,56	27,08	35,72	30,29	32,19	28,73	29,15	31,02
Fixe	Priorités		32,6	30,89	32,56	27,08	35,72	30,29	32,19	28,73	29,15	31,02
Fixe	Refus		34,31	30,57	28,03	30,67	27,04	29,09	28,29	26,51	28,47	29,22

Le Tableau 42 montre l'analyse de la variance effectuée à partir des résultats de la simulation pour le temps d'attente total des camions du produit PF (annexe 4).

Tableau 42 : Analyse de la variance pour le produit PF concernant le temps de passage total

Facteurs	DL	SS	MS	F	Test du F	Significatif
RDV	2	13798,27	6899,13	57,79	3,14	*
Gestion A/R	2	92,80	46,40	0,39	3,14	
RDV*Gestion A/R	4	34,00	8,50	0,07	2,52	
Volume	2	1788,48	894,24	7,49	3,14	*
Proportion	2	1967,23	983,62	8,24	3,14	*
Erreur	68	8118,67	119,39			
Total	80	25799,46				

L'analyse de la variance démontre que les facteurs Volume et Proportion sont significatifs à un seuil de 5% et qu'ils ont un impact sur le temps d'attente des camions. Il est donc intéressant de faire l'analyse des rapports signal/bruit afin de déterminer la combinaison des facteurs RDV et GESTION A/R la plus robuste. Pour minimiser la variable dépendante, la formule suivante a été utilisée :

$$S/N = -10\log(\sum(y^2)/n)$$

où y représente les données collectées et n le nombre de données collectées

Le Tableau 44 présente les ratios signal/bruit calculés pour chaque essai. Le ratio le plus élevé produit le moins de variation (en gris dans le tableau).

Tableau 43 : Rapport signal/bruit pour le temps de passage total pour le produit PF

A	B	Ratio S/N
2H80%	FIFO	-31,58
2H80%	PRIORITÉ	-31,58
2H80%	REFUS	-30,57
4H80%	FIFO	-36,27
4H80%	PRIORITÉ	-36,06
4H80%	REFUS	-35,96
FIXE	FIFO	-29,86
FIXE	PRIORITÉ	-29,86
FIXE	REFUS	-29,34

Cette analyse montre, tout comme pour le produit PG1, qu'en mettant en place la politique de rendez-vous à heures fixes et que refuser systématiquement les camions en avance de plus de 15 minutes et en retard permettent d'obtenir le temps de passage total le moins sensible aux variations du nombre de camions attendus par jour et de la proportion des camions déviant de leur plage de rendez-vous. Cependant, la mise en place d'un système de rendez-vous à heure fixe et d'une politique de refus des camions en retard ou en avance pourrait sembler bien rigide aux yeux des administrateurs du port.

5.2.2 Analyse du taux d'utilisation des ressources

Le taux d'utilisation actuel de la ressource (chargement) pour le produit PF est de 88% dans des conditions où il n'y a aucun système de rendez-vous en place ni de politique de gestion des avances et des retards. Les camions sont traités actuellement selon la règle FIFO. Pour cette analyse le modèle mathématique $Y_{ijk} = (\mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ijk})$ a été utilisé ainsi que les paramètres suivants : 5% des camions en avance, 90% des camions à l'heure et 5% des camions en retard. Ce choix a été fait étant donné que ce serait la cible à atteindre grâce aux mesures dissuasives proposées par le port (refus ou priorité plus basse des camions en avance ou en retard). Le Tableau 44 présente les résultats de cette simulation pour les trois réplifications. Le temps de passage inclut le temps d'attente des camions à l'heure à leur rendez-vous et celui des camions en avance de plus de 15 minutes ou en retard.

Tableau 44 : Taux d'utilisation obtenus grâce à la simulation

		Taux d'utilisation (%)		
RDV (A)	Gestion trafic (B)	Réplication 1	Réplication 2	Réplication 3
2H80%	FIFO	0.7	0.8	0.9183
2H80%	Priorités	0.7	0.8	0.9183
2H80%	Refus	0.8	0.7444	0.6778
4H80%	FIFO	0.7111	0.7556	0.8333
4H80%	Priorités	0.7111	0.7556	0.8333
4H80%	Refus	0.6778	0.6444	0.6889
Fixe	FIFO	0.7164	0.7	0.7739
Fixe	Priorités	0.7164	0.7	0.7739
Fixe	Refus	0.6667	0.7	0.7889

Le Tableau 45 montre l'analyse de la variance effectuée à partir des résultats de la simulation pour le temps de passage total des camions du produit PF (annexe 3).

Tableau 45 : Analyse de la variance pour le produit PF concernant le taux d'utilisation des ressources

Facteurs	DL	SS	MS	F	Table de F	Significatif
RDV	2	0,018	0,009	9,98E-05	3,56	
Gestion A/R	2	0,020	0,010	0,0001	3,56	
RDV * Gestion A/R	4	0,007	0,002	2,06E-05	2,94	
Erreur	18	0,086	0,005			
Total	26	0,131				

L'analyse de la variance démontre qu'aucun facteur n'est significatif au seuil de 5%. Ceci signifie que les administrateurs de port peuvent choisir n'importe quel système de rendez-vous et n'importe quelle politique de gestion des retards et des avances. Ces deux facteurs n'affectent pas le taux d'utilisation des ressources.

Dans une deuxième analyse, des facteurs bruits ont été introduits. Un plan d'expérience Taguchi croisé a été effectué : $Y_{ijklmo} = (\mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ijk}) (\mu + C_l + D_m + CD_{lm} + \varepsilon_{lmo})$. Le Tableau 46 présente les résultats de la simulation.

Tableau 46 : Taux d'utilisation obtenus grâce à la simulation PF

		Proportion (D)	5-90-5	10-80-10	15-70-15	5-90-5	10-80-10	15-70-15	5-90-5	10-80-10	15-70-15	Taux d'utilisation moyen
		Volume (C)	Max	Max	Max	85% Max	85% Max	85% Max	70% Max	70% Max	70% Max	
RDV (A)	Gestion A/R (B)											
2H80%	FIFO		0,79	0,71	0,73	0,61	0,66	0,58	0,52	0,49	0,57	0,63
2H80%	Priorités		0,79	0,71	0,73	0,61	0,66	0,58	0,52	0,49	0,57	0,63
2H80%	Refus		0,64	0,5	0,49	0,58	0,48	0,47	0,54	0,4	0,39	0,50
4H80%	FIFO		0,72	0,74	0,71	0,64	0,63	0,62	0,49	0,51	0,43	0,61
4H80%	Priorités		0,72	0,74	0,71	0,71	0,63	0,62	0,49	0,51	0,43	0,62
4H80%	Refus		0,77	0,7	0,51	0,58	0,54	0,47	0,5	0,44	0,32	0,54
Fixe	FIFO		0,7	0,61	0,52	0,55	0,48	0,48	0,45	0,37	0,36	0,50
Fixe	Priorités		0,7	0,61	0,52	0,55	0,48	0,48	0,45	0,37	0,36	0,50
Fixe	Refus		0,57	0,51	0,29	0,54	0,36	0,34	0,46	0,33	0,21	0,40

Le Tableau 47 présente l'analyse de la variance effectuée à partir des résultats de la simulation pour le taux d'utilisation des ressources.

Tableau 47 : Analyse de la variance pour le produit PF concernant le taux d'utilisation des ressources

Facteurs	DL	SS	MS	F	Test du F	Significatif
RDV	2	0,25	0,13	46,87	3,14	*
Gestion A/R	2	0,19	0,095	35,36	3,14	*
RDV*Gestion A/R	4	0,008	0,002	0,79	2,52	
Volume	2	0,55	0,277	103,24	3,14	*
Proportion	2	0,14	0,067	25,24	3,14	*
Erreur	68	0,18	0,003			
Total	80	1,32				

L'analyse de la variance démontre que les Volume et Proportion sont significatifs à un seuil de 5% et qu'ils ont un impact sur le taux d'utilisation des ressources. Il est donc intéressant de faire l'analyse des rapports signal/bruit afin de déterminer

la combinaison des facteurs RDV et GESTION A/R la plus robuste. Pour maximiser la variable dépendante, la formule suivante a été utilisée :

$$S/N = -10\log\left(\sum \frac{1}{(y^2)} / n\right)$$

où y représente les données collectées et n le nombre de données collectées

Le Tableau 48 présente les ratios signal/bruit calculés pour chaque essai. Le ratio le plus élevé produit le moins de variation.

Tableau 48 : Rapport signal/bruit pour le taux d'utilisation des ressources pour le produit PF

A	B	Ratio S/N
2H80%	FIFO	-4,32
2H80%	PRIORITÉ	-4,32
2H80%	REFUS	-6,33
4H80%	FIFO	-4,73
4H80%	PRIORITÉ	-4,65
4H80%	REFUS	-6,19
FIXE	FIFO	-6,52
FIXE	PRIORITÉ	-6,52
FIXE	REFUS	-9,22

Cette analyse montre qu'en mettant en place un système de plages de rendez-vous de 2 heures avec 80% des camions qui arrivent la 1^{ere} heure et que d'utiliser une méthode de gestion des avances et des retards FIFO ou PRIORITÉ permettent d'obtenir le taux d'utilisation le plus robuste. En effet, c'est dans ces conditions que le taux d'utilisation des ressources variera le moins si le nombre de camions attendus par jour et la proportion des camions déviant de leur plage de rendez-vous varient.

5.2.3 Conclusion de l'analyse pour le produit PF

Finalement, le Tableau 49 présente les résultats des analyses du temps d'attente et ceux du taux d'utilisation pour le produit PF. Il est à noter que pour déterminer le temps de passage et le taux d'utilisation attendus pour la solution dite optimale, une simulation a été effectuée avec 100 réplifications pour obtenir une valeur la plus précise possible.

Tableau 49 : Résumé des résultats de l'analyse de la variance pour le produit PF

Temps de passage total	RDV	GESTION A/R	Temps de passage attendu (min)	Half width Temps de passage attendu	% d'utilisation de la ressource goulot attendu (chargement)	Half width % d'utilisation de la ressource goulot attendu
Solution « optimale » (minimise le temps d'attente)	FIXE	REFUS	26.04	0.24	70%	1%
Solution robuste	FIXE	REFUS	29.22	N.A	40%	N.A
Taux d'utilisation des ressources	RDV	GESTION A/R	Temps de passage attendu (min)	Half width Temps de passage attendu	% d'utilisation de la ressource goulot attendu	Half width % d'utilisation de la ressource goulot attendu
Solution « optimale » (maximise le taux d'utilisation)	Pas significatif	Pas significatif	N.A	N.A	N.A	N.A
Solution robuste	2H80%	FIFO Ou PRORITÉ	37.46	N.A	63% 63%	N.A

Tout d'abord, puisque les facteurs RDV et Gestion A/R ne sont pas significatifs pour maximiser le taux d'utilisation des ressources, il est recommandé de considérer la solution qui minimise le temps de passage soit de mettre en place un système de rendez-vous à heures fixes et de refuser les camions qui se

présentent en retard ou avec une avance de 15 minutes ou plus. Le temps de passage attendu est de 29,22 minutes, ce qui représente une amélioration de 62% par rapport au temps de passage actuel de 76,79 minutes. Le taux d'utilisation attendu est de 70%, ce qui est plus bas que le taux actuel de 88%, car certains des camions sont refusés.

Les solutions robustes sont différentes. Pour minimiser le temps de passage, il est recommandé de mettre en place un système de rendez-vous fixe et de refuser les camions en avance ou en retard. La mise en place de ces politiques permettrait d'obtenir un temps de passage de 29,22 minutes soit une amélioration de 62% par rapport au temps de passage actuel et un taux d'utilisation de 40%. Comme discuté précédemment, il est un peu utopique de croire à la possibilité d'instaurer des rendez-vous fixes étant donné les facteurs énumérés (congestion routière, température). Pour maximiser le taux d'utilisation des ressources, il est recommandé de mettre en place un système de rendez-vous de 2H80% et de faire une gestion des A/R par FIFO ou par priorité. La mise en place de ces politiques permettrait d'obtenir un temps de passage de 37,46 minutes et un taux d'utilisation des ressources de 63%. Le temps de passage est un peu plus élevé qu'avec la solution robuste qui minimise le temps de passage mais permet une amélioration de 51% par rapport aux 76,79 minutes actuelles.

Pour le produit PF, deux solutions sont à retenir :

- 1) Système de rendez-vous : 2H80% et Gestion A/R : FIFO
- 2) Système de rendez-vous : 2H80% et Gestion A/R : PRIORITÉ

5.3 Conclusion

Ces résultats démontrent que, pour les deux produits étudiés, le système de rendez-vous 2H80 et les méthodes de gestion des avances et des retards FIFO et PRIO sont les solutions suggérées étant donné qu'il est utopique de penser instaurer un système de rendez-vous à heure fixe et de refuser tous les camions se présentant avec une avance de plus de 15 minutes ou un retard à leur rendez-vous. Il est tout de même très intéressant de constater que le système de rendez-vous 2H80 avec la méthode FIFO ou PRIO donne des résultats statistiquement équivalents pour le produit PG1 tout en étant beaucoup plus simple à implanter.

Chapitre 6 : Conclusion

6.1 Synthèse de la recherche

Le but de la recherche était de déterminer l'impact de l'instauration d'un système de rendez-vous sur le temps de passage des camions et sur le taux d'utilisation des ressources dans un port ne manutentionnant pas de produits conteneurisés. Pour y arriver, une étude de cas a été réalisée dans un port québécois.

Suite à la revue de la littérature et aux observations faites sur le terrain, quatre variables indépendantes (deux variables principales et deux variables bruits) ont été retenues soient : la durée des plages de rendez-vous, la méthode de gestion des camionneurs qui sont en avance ou en retard à leur rendez-vous, le nombre de camions se présentant au port par jour et la proportion des camions déviant de leur plage de rendez-vous. Afin de tester l'impact de ces facteurs sur le temps de passage des camions et le taux d'utilisation des ressources, un plan d'expérience Taguchi croisé a été réalisé (L_9 croisé avec un L_9). Pour exécuter ce plan d'expérience, un modèle de simulation à événements discrets a été construit grâce aux données recueillies sur le terrain. Une fois le modèle validé et les résultats obtenus (temps de passage moyen), une analyse de la variance a été menée sur les facteurs principaux ainsi que sur l'interaction entre ces deux facteurs. Par la suite, une analyse de Newman-Keuls a été effectuée pour les facteurs significatifs. Pour tous les indicateurs, des plages de rendez-vous de deux heures ou des rendez-vous fixes semblent être le meilleur choix en ce qui concerne la durée des plages de rendez-vous et ce, pour les deux produits étudiés. Par contre, il semble beaucoup plus réaliste d'instaurer des plages de rendez-vous de 2 heures afin de laisser une marge de manœuvre aux chauffeurs qui peuvent subir des retards non volontaires (trafic sur les routes, mauvaise température...). En ce qui concerne la méthode de gestion des avances ou des retards, le résultat n'est pas aussi net. En effet, en fonction de l'indicateur et du produit étudié, les résultats varient. Ces solutions sont celles qui sont les plus optimales, mais pas nécessairement les plus robustes. Une analyse des rapports signal/bruit a été effectuée dans le but de

déterminer quelle solution était la plus robuste en fonction de la variation du nombre de camions par jour et de la proportion des camions déviants de leur plage de rendez-vous. La solution qui revient le plus souvent, tous produits confondus lorsque l'on parle de robustesse du modèle, est l'instauration de rendez-vous à heures fixes et de refuser les camions qui sont en avance de plus de 15 minutes ou en retard à leur rendez-vous. Par contre, il est illusoire de croire qu'un tel système de rendez-vous pouvait être instauré. Il a donc été conclu que le système de rendez-vous de 2H80% combiné à une méthode de gestion FIFIO ou PRIO sont les combinaisons qui sont les plus réalistes tout en améliorant les indicateurs. Dans tous les cas, il est possible de constater que l'instauration d'un système de rendez-vous permet de diminuer entre 22% et 62% le temps de passage en fonction de la durée des plages de rendez-vous et de la méthode de gestion choisies.

Il est évident que l'instauration d'un système de rendez-vous n'est pas chose simple. La collaboration des camionneurs, des utilisateurs du port et des gestionnaires du port est de mise pour que l'instauration d'un tel système soit un succès. Une possibilité pourrait être l'instauration d'un système de rendez-vous en plusieurs temps. Dans un premier temps, bien que le système de rendez-vous de plages de 4 heures donne de moins bons résultats, il pourrait être intéressant de l'instaurer afin d'inculquer la philosophie des systèmes de rendez-vous et de développer des bonnes habitudes. Par la suite, il serait possiblement plus facile d'instaurer un système de rendez-vous de 2 heures. Bref, pour que l'instauration d'un système de rendez-vous soit positive, la collaboration de tous est de mise.

6.2 Limitations de la recherche

Il est important de rappeler que l'ensemble de ces résultats est basé sur une seule journée d'observations, car la collecte de données manuelle était longue et difficile. De plus, pour certains produits engendrant un moins grand nombre de camions, quelques observations seulement ont été faites.

6.3 Contributions de la recherche

Tout d'abord, la recension des écrits sur les systèmes de rendez-vous dans les ports sans conteneurisation a montré que très peu de travaux avaient été faits en ce sens. Les travaux réalisés dans ce mémoire ont permis de décrire et détailler avec précision les systèmes de rendez-vous et de gestion des avances et retards, ce qui contribue à la littérature scientifique au niveau théorique.

La méthodologie proposée dans ce mémoire permet de trouver des solutions optimales parmi celles testées et des solutions robustes, ce qui permet de générer plusieurs options et d'offrir des choix aux gestionnaires de port.

Cette étude a permis de démontrer que, dans un port sans conteneurs, il est possible que les politiques de rendez-vous et de gestion des avances et des retards varient selon les produits: autant de produits différents peut occasionner la mise en place de politiques différentes, ce qu'on ne retrouve pas dans la littérature sur les ports avec conteneurs.

Finalement, cette recherche contribue à faire augmenter les connaissances sur l'impact de l'instauration d'un système de rendez-vous dans un port sans conteneurisation et sur les mesures à prendre pour l'instaurer. Dans une industrie en plein essor comme l'industrie portuaire au Québec, il est intéressant de connaître les possibilités qui s'offrent aux ports ainsi que de tester d'autres possibilités dans un modèle de simulation avant de l'instaurer.

6.4 Avenues futures de la recherche

Dans cette étude, l'impact d'un nombre de camions décroissant a été vérifié. Si le port décidait d'ajouter un puits de déchargement supplémentaire pour le produit PG1, tel que prévu au scénario 2 dans le chapitre 4, il faudrait alors mesurer l'impact d'une hausse du nombre de camion sur les politiques de rendez-vous et de gestion des avances et retards. En effet, une hausse du nombre de camions conduirait peut-être à des solutions optimales et robustes différentes.

Comme notre approche génère plusieurs solutions (optimales et robustes), elle pourrait être combinée à la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) pour comparer les solutions selon divers critères et ainsi aider les gestionnaires à choisir la solution qui correspond le plus à leurs préférences.

Il pourrait être intéressant de mesurer l'impact des autres modes de transport sur le trafic routier dans un port. En effet, les ports utilisent généralement trois types de transport : le camionnage, le ferroviaire et le maritime. Comme le transport par camion dépend, pour certains produits tel le produit PG1, de l'arrivée d'un navire, il serait intéressant d'intégrer, dans le modèle de simulation, l'arrivée de ces navires et baser les prévisions sur le nombre de camions en fonction de la présence d'un navire à quai. De plus, il serait intéressant d'ajouter le transport ferroviaire dans le modèle. En effet, comme le transport des wagons et des camions se fait dans les mêmes espaces, il serait intéressant de mesurer l'impact des wagons sur la congestion routière et déterminer si l'instauration d'un système de rendez-vous pour les camions permettrait de diminuer la congestion causée par le croisement des deux trafics.

Il serait aussi intéressant de développer une méthode de collecte de données systématique afin d'alimenter le modèle avec plus de données. En effet, une collecte de données à la main comme celle présentée dans ce travail, demande énormément de ressources et de temps pour arriver à une taille d'échantillon adéquate ce affecte la validité externe du modèle. De plus, si ce modèle pouvait être alimenté avec des données en temps réel, cela permettrait de prendre des décisions rapidement et à court et moyen terme concernant l'arrivée des camions au port. Enfin, il serait intéressant d'étudier les facteurs bruits à d'autres niveaux afin de déterminer leur effet sur le temps de passage ou le taux d'utilisation. Par exemple, il pourrait être intéressant d'analyser l'effet d'une augmentation du nombre de camions par jour sur leur temps de passage.

Enfin, une étude de cas dans un autre port manutentionnant seulement des produits non conteneurisés pourrait être effectuée afin de valider si les résultats peuvent être généralisés dans tous ces types de ports ou s'ils s'appliquent seulement au port étudié.

6.5 Conclusion

Ce mémoire de maîtrise constitue une étape dans la quête et le développement des connaissances dans le domaine de la gestion du trafic routier dans les ports sans conteneurisation. La poursuite des travaux dans ce domaine permettra de diminuer le temps d'attente des camions dans les ports et d'améliorer par le fait même, la compétitivité des ports.

Références

- Chen, G., Govindan, K., & Golias, M. M. (2013). Reducing truck emissions at container terminals in a low carbon economy: proposal of a queueing-based bi-objective model for optimizing truck arrival pattern. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 55, 3-22.
- Chen, G., Govindan, K., Yang, Z.-Z., Choi, T.-M., & Jiang, L. (2013). Terminal appointment system design by non-stationary M (t)/E k/c (t) queueing model and genetic algorithm. *International Journal of Production Economics*, 146(2), 694-703.
- Chen, G., Govindan, K., & Yang, Z. (2013). Managing truck arrivals with time windows to alleviate gate congestion at container terminals. *International Journal of Production Economics*, 141(1), 179-188.
- Chen, G., & Yang, Z. (2010). Optimizing time windows for managing export container arrivals at Chinese container terminals. *Maritime Economics & Logistics*, 12(1), 111-126.
- Chen, X., Zhou, X., & List, G. F. (2011). Using time-varying tolls to optimize truck arrivals at ports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6), 965-982.
- Cherry, C. R., & Adalakun, A. A. (2012). Truck driver perceptions and preferences: Congestion and conflict, managed lanes, and tolls. *Transport Policy*, 24, 1-9.
- Cortés, P., Muñuzuri, J., Ibáñez, J. N., & Guadix, J. (2007). Simulation of freight traffic in the Seville inland port. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(3), 256-271.
- De Meyer, P., Maes, F., & Volckaert, A. (2008). Emissions from international shipping in the Belgian part of the North Sea and the Belgian seaports. *Atmospheric Environment*, 42(1), 196-206.
- Dekker, R., van der Heide, S., van Asperen, E., & Ypsilantis, P. (2013). A chassis exchange terminal to reduce truck congestion at container terminals. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 25(4), 528-542.
- Do, N. A. D., Nielsen, I. E., Chen, G., & Nielsen, P. (2014). A simulation-based genetic algorithm approach for reducing emissions from import container pick-up operation at container terminal. *Annals of Operations Research*, 1-17.
- Dragović, B., Tzannatos, E., & Park, N. K. (2016). Simulation modelling in ports and container terminals: literature overview and analysis by research field, application area and tool.

Flexible Services and Manufacturing Journal, 1-31. <http://dx.doi.org/10.1007/s10696-016-9239-5>

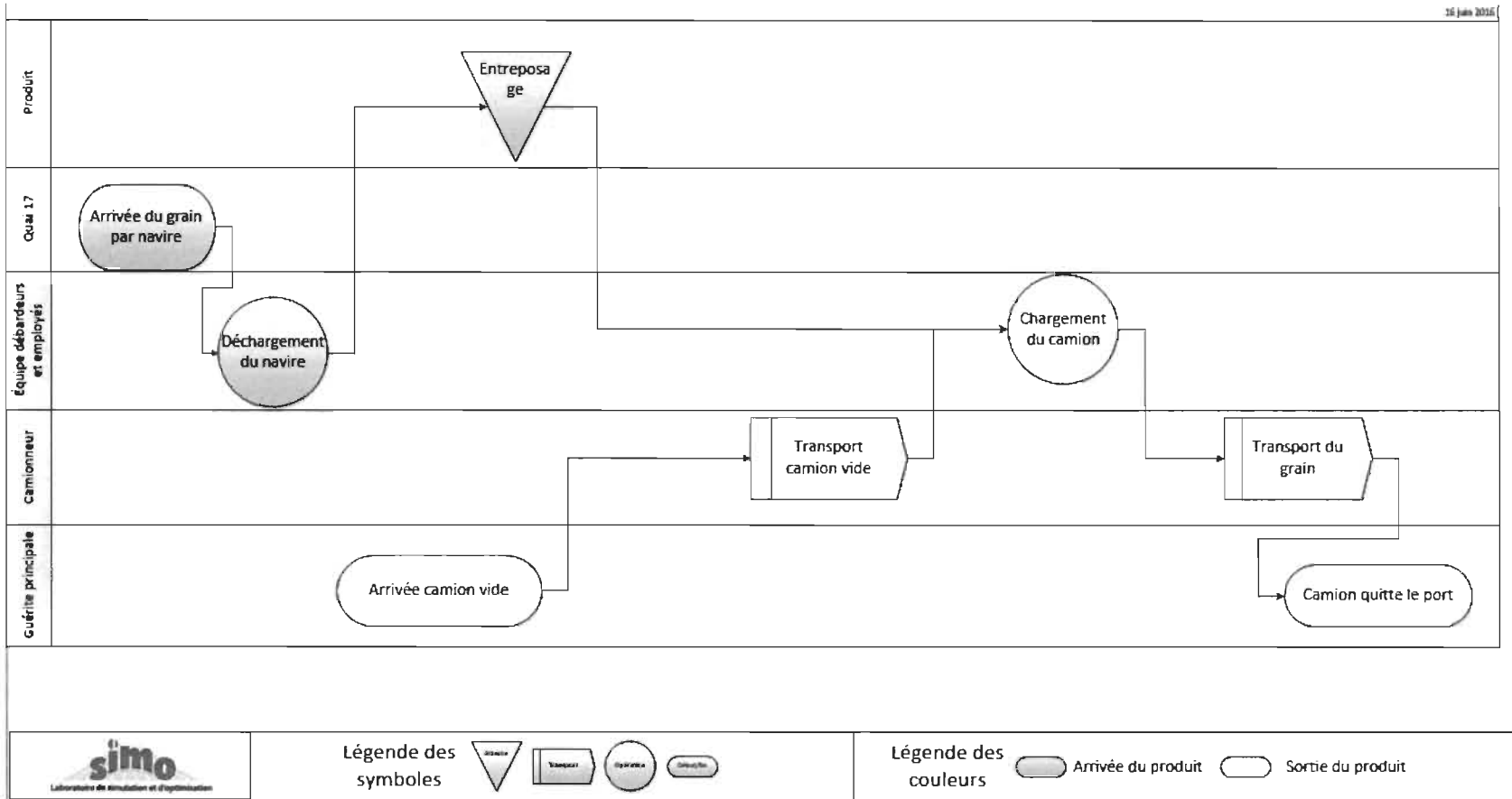
- Fioroni, M. M., Franzese, L. A. G., de Santana, I. R., Lelis, P. E. P., da Silva, C. B., Telles, G. D., . . . Varani, R. (2015). *From farm to port: simulation of the grain logistics in brazil*. Communication présentée 2015 Winter Simulation Conference (WSC).
- Giuliano, G., & O'Brien, T. (2007). Reducing port-related truck emissions: The terminal gate appointment system at the Ports of Los Angeles and Long Beach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(7), 460-473.
- Guan, C., & Liu, R. R. (2009). Container terminal gate appointment system optimization. *Maritime Economics & Logistics*, 11(4), 378-398.
- Huynh, N., & Walton, C. M. (2008). Robust scheduling of truck arrivals at marine container terminals. *Journal of Transportation Engineering*, 134(8), 347-353.
- Kia, M., Shayan, E., & Ghotb, F. (2002). Investigation of port capacity under a new approach by computer simulation. *Computers & Industrial Engineering*, 42(2), 533-540.
- Kiani, M., Sayareh, J., & Nooramin, S. (2010). A simulation framework for optimizing truck congestions in marine terminals. *Journal of Maritime Research*, 7(1), 55-70.
- Kim, K. H., Lee, K. M., & Hwang, H. (2003). Sequencing delivery and receiving operations for yard cranes in port container terminals. *International Journal of Production Economics*, 84(3), 283-292.
- Kulick, B., & Garcia, B. R. (2005). Keeping up with cargo: simulation provides alternative ports of call. *Industrial Engineer*, 37(12), 37-42.
- Lee, G., You, S., Ritchie, S. G., Saphores, J. D., Sangkapichai, M., & Jayakrishnan, R. (2009). Environmental impacts of a major freight corridor *Transportation Research Record* (pp. 119-128).
- Li, N., Chen, G., Govindan, K., & Jin, Z. (2016). Disruption management for truck appointment system at a container terminal: A green initiative. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*.
- Mineta, N. (2006). National strategy to reduce congestion on America's transportation network. *US Department of Transportation, Washington*.

- Morais, P., & Lord, E. (2006). Terminal appointment system study.
- Moustakbal, A. (2009). L'impact de la congestion routière sur l'industrie du camionnage dans la région de Montréal.
- Murty, K. G., Wan, Y.-w., Liu, J., Tseng, M. M., Leung, E., Lai, K.-K., & Chiu, H. W. (2005). Hongkong International Terminals gains elastic capacity using a data-intensive decision-support system. *Interfaces*, 35(1), 61-75.
- Phan, M.-H., & Kim, K. H. (2016). Collaborative truck scheduling and appointments for trucking companies and container terminals. *Transportation Research Part B: Methodological*, 86, 37-50.
- Schulte, F., González, R. G., & Voß, S. (2015). Reducing port-related truck emissions: Coordinated truck appointments to reduce empty truck trips *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 9335, pp. 495-509).
- Sharif, O., Huynh, N., & Vidal, J. M. (2011). Application of El Farol model for managing marine terminal gate congestion. *Research in Transportation Economics*, 32(1), 81-89.
- Thiers, G. F., & Janssens, G. K. (1998). A port simulation model as a permanent decision instrument. *Simulation*, 71(2), 117-125.
- Tzannatos, E. (2010). Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus–Greece. *Atmospheric Environment*, 44(3), 400-407.
- Yang, Z., Chen, G., & Moodie, D. R. (2010). Modeling road traffic demand of container consolidation in a Chinese port terminal. *Journal of Transportation Engineering*, 136(10), 881-886.
- Zehendner, E., & Feillet, D. (2014). Benefits of a truck appointment system on the service quality of inland transport modes at a multimodal container terminal. *European Journal of Operational Research*, 235(2), 461-469.
- Zhang, X., Zeng, Q., & Chen, W. (2013). Optimization model for truck appointment in container terminals. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 96, 1938-1947.
- Zhao, W., & Goodchild, A. V. (2010). The impact of truck arrival information on container terminal rehandling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(3), 327-343.

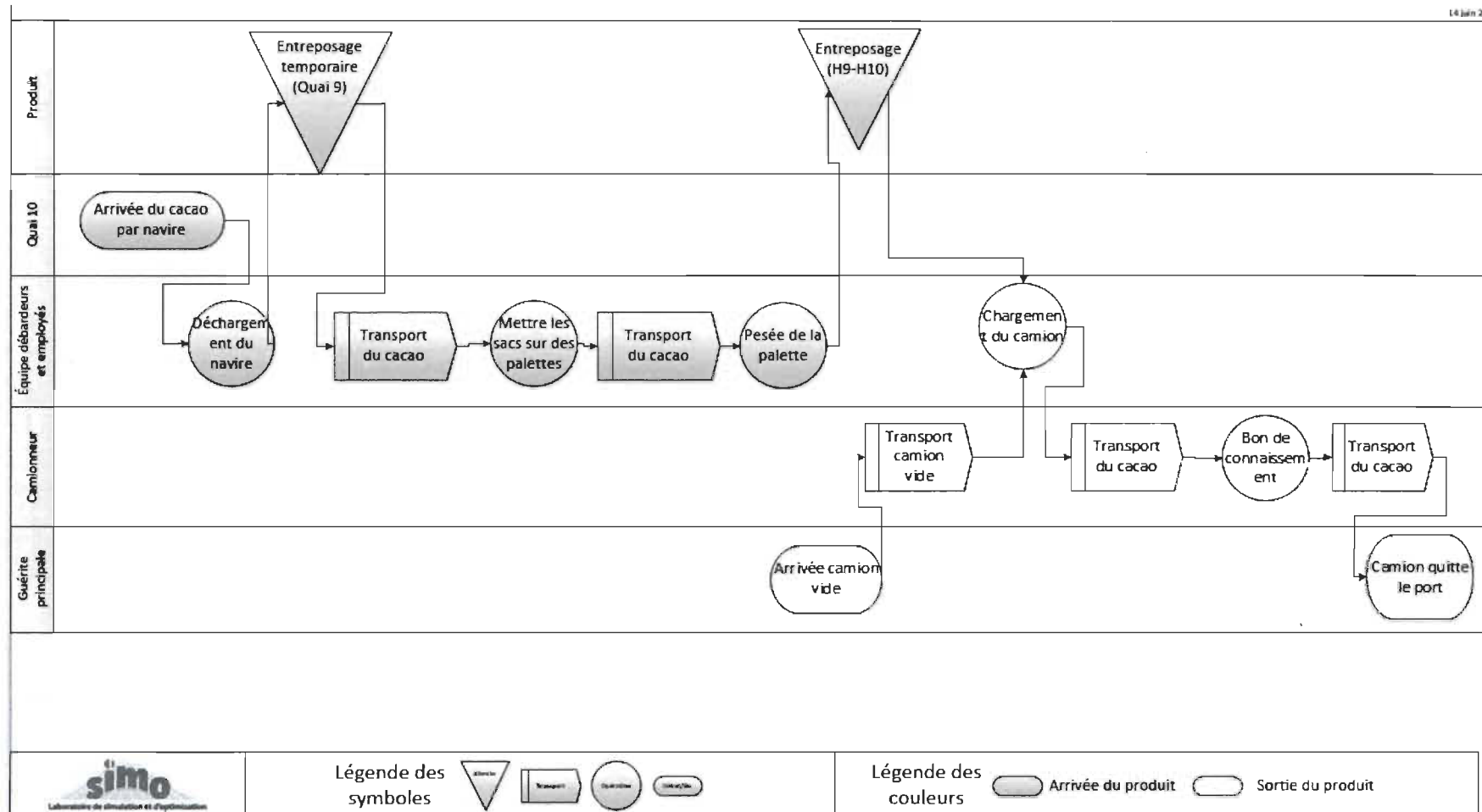
Annexe

Annexe 1

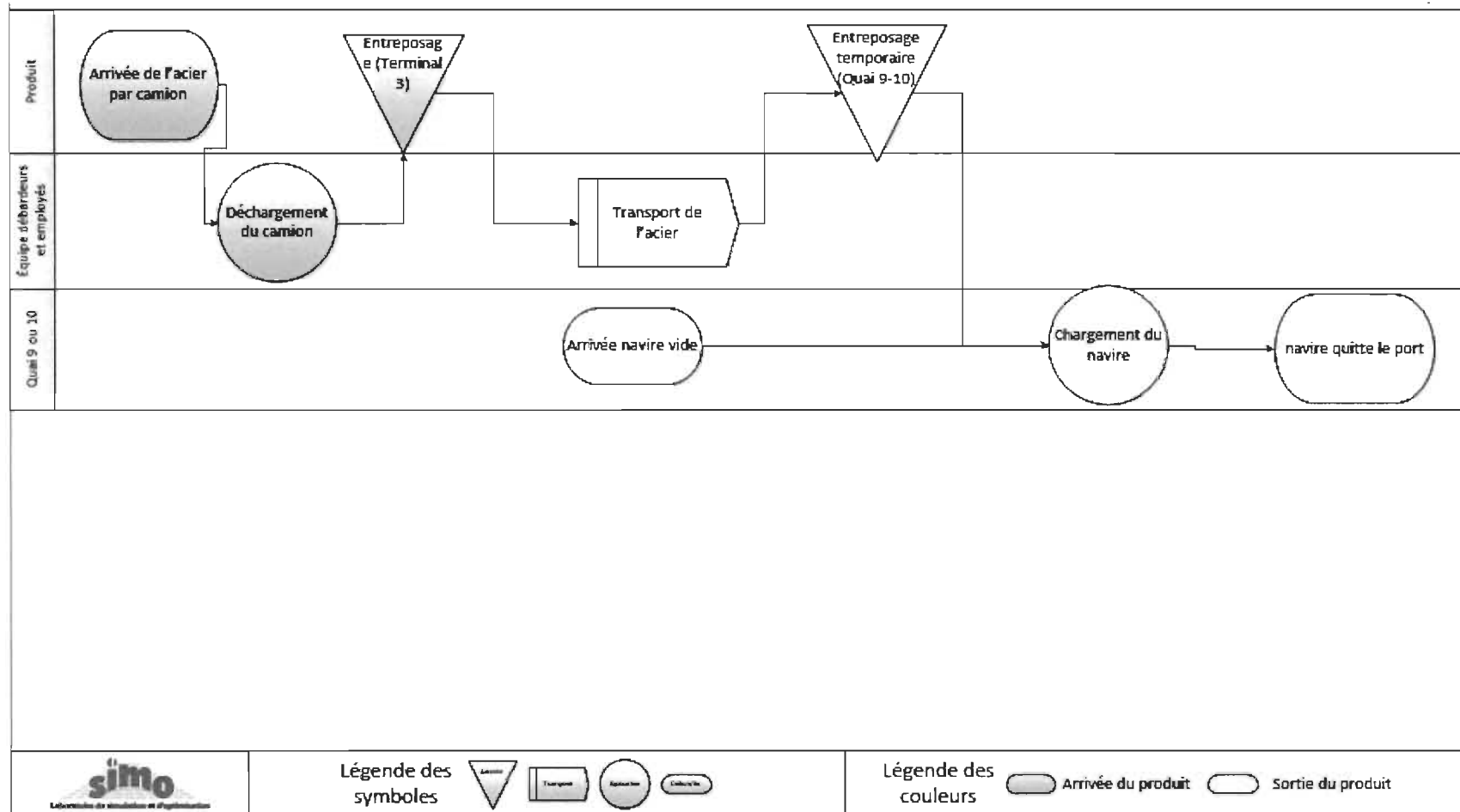
Cartographies



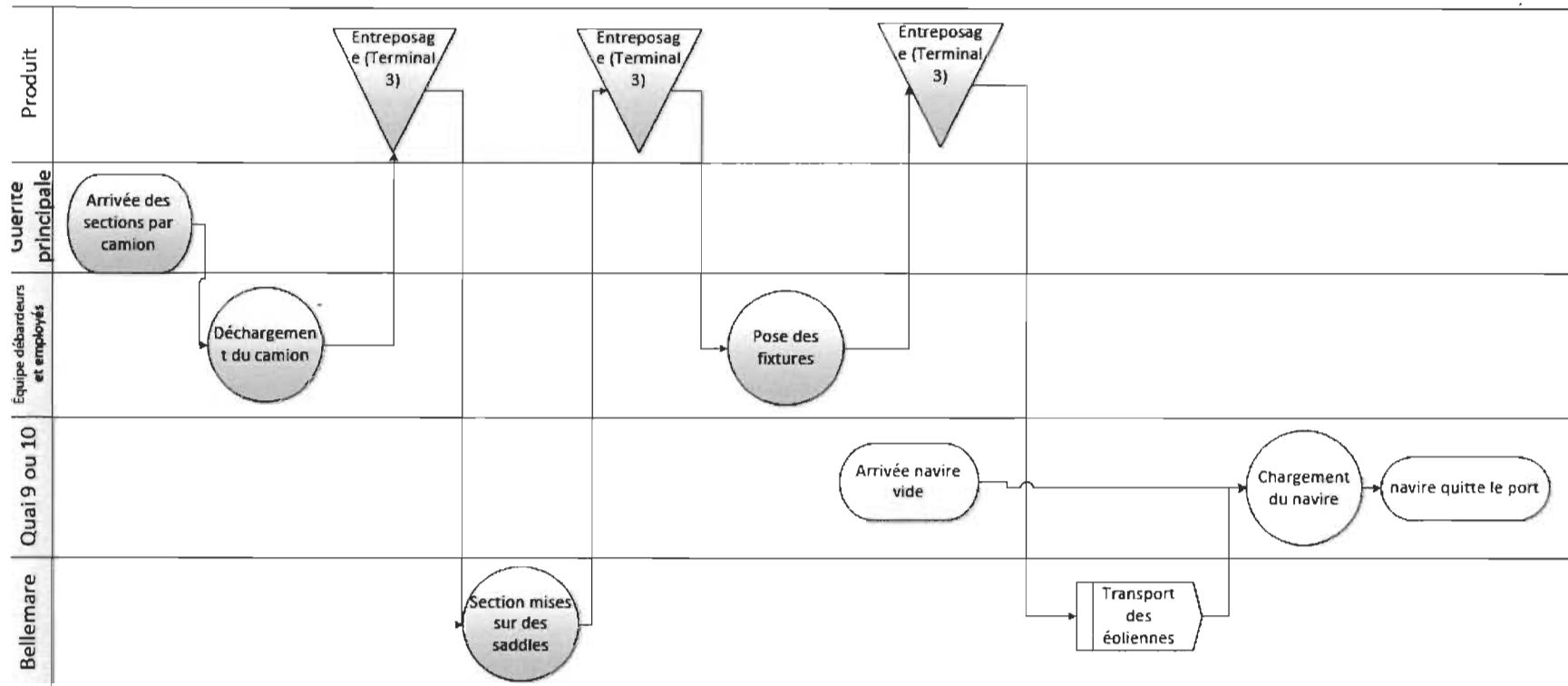
Cartographie PG2

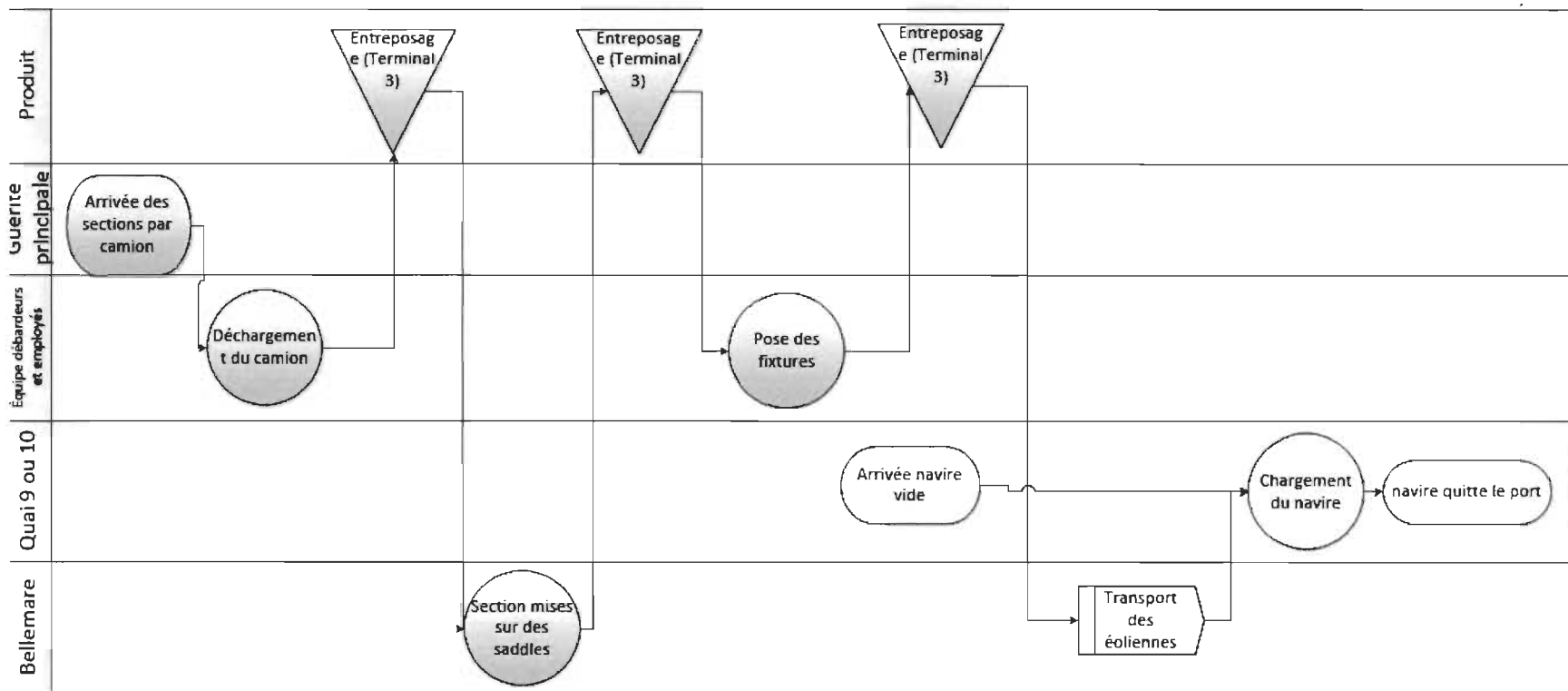


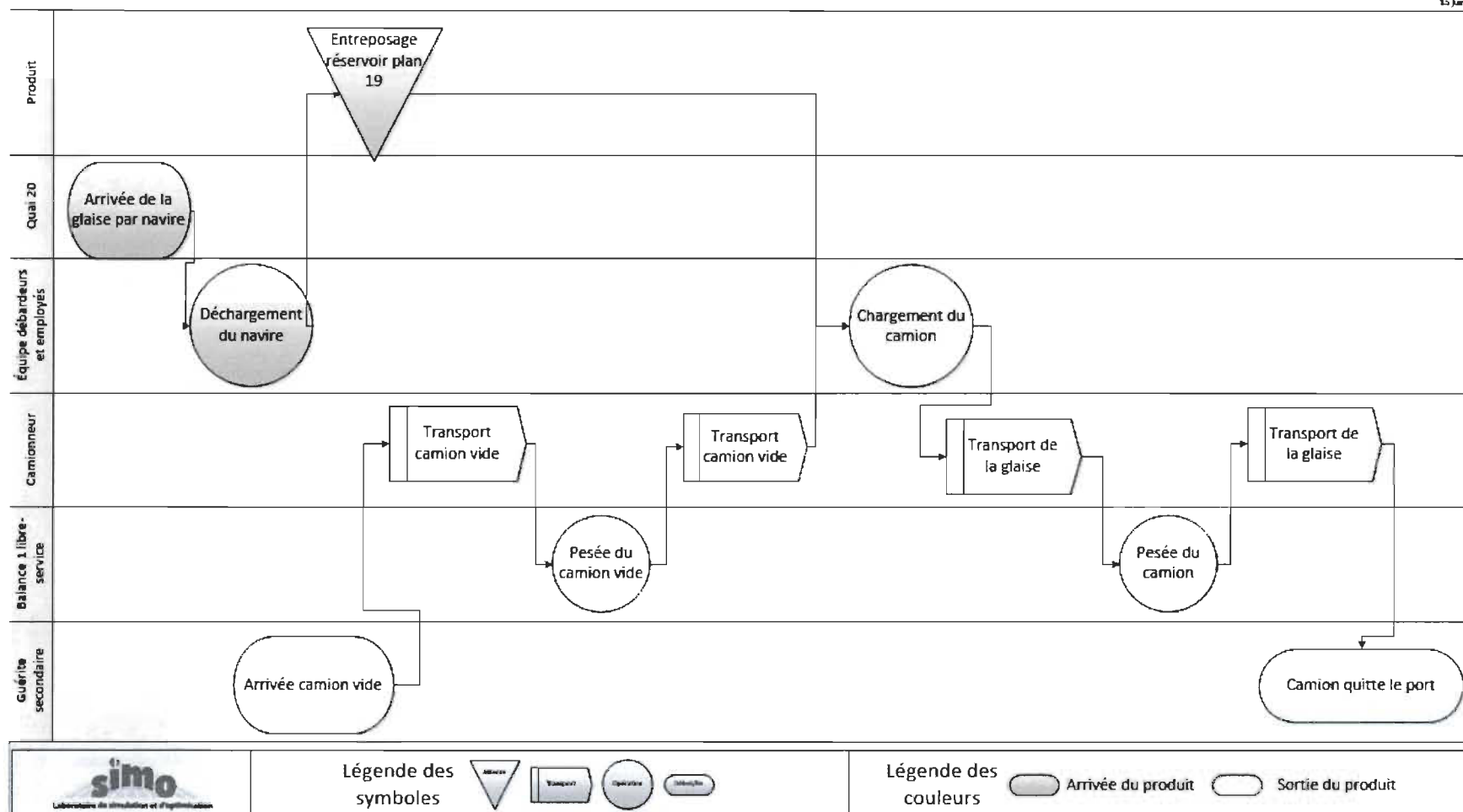
Cartographie PCA



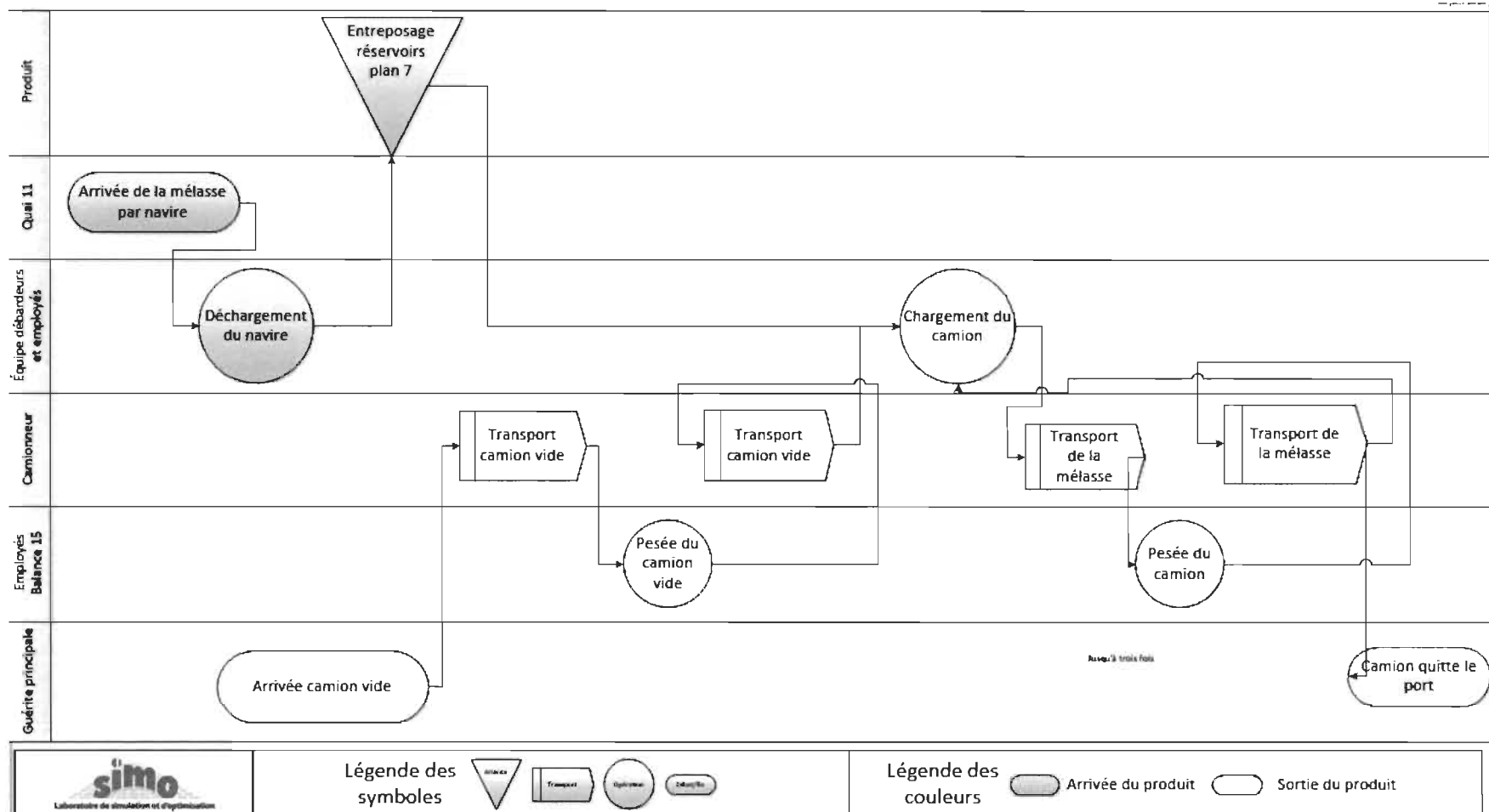
Cartographie PAC



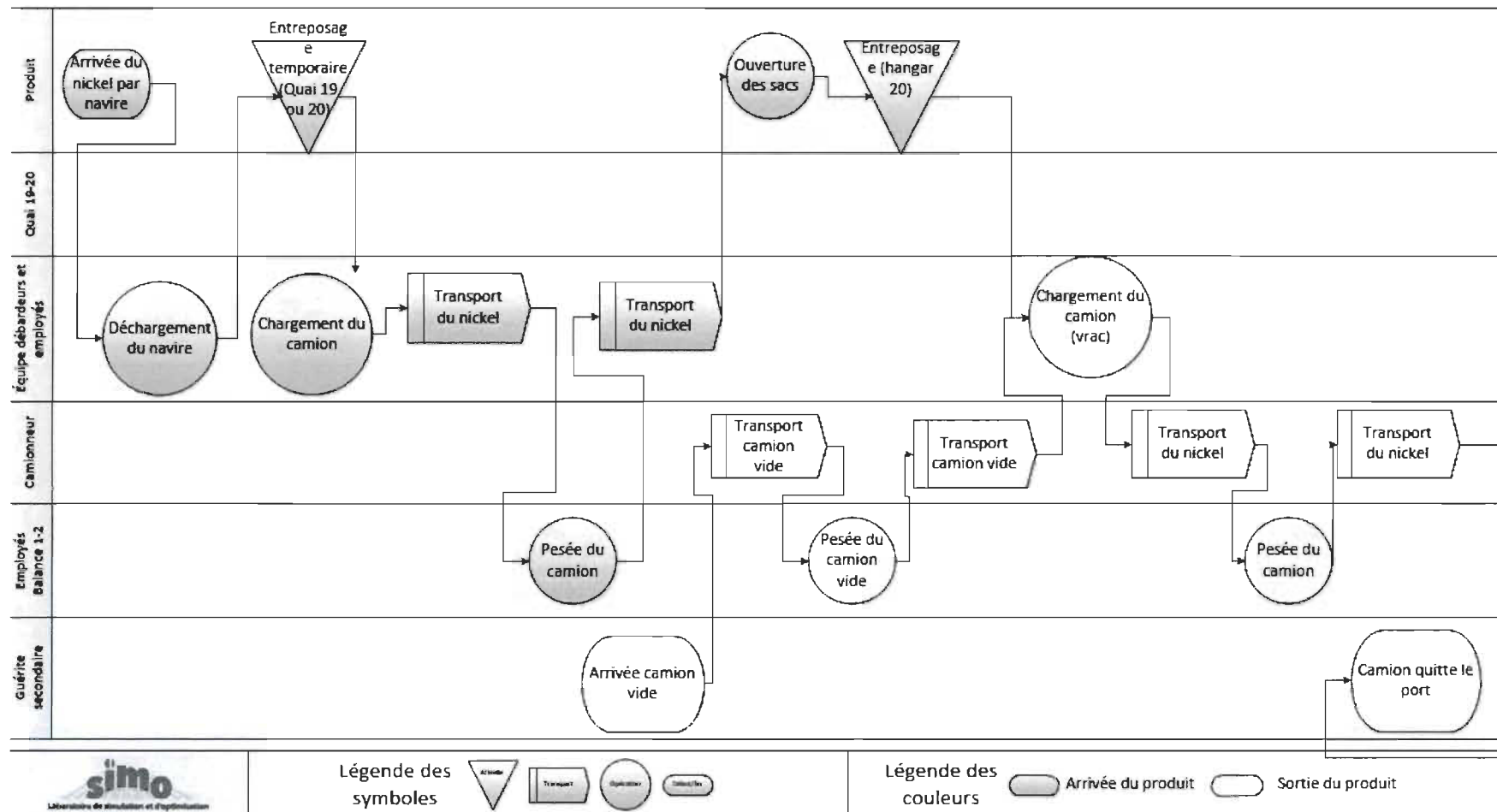




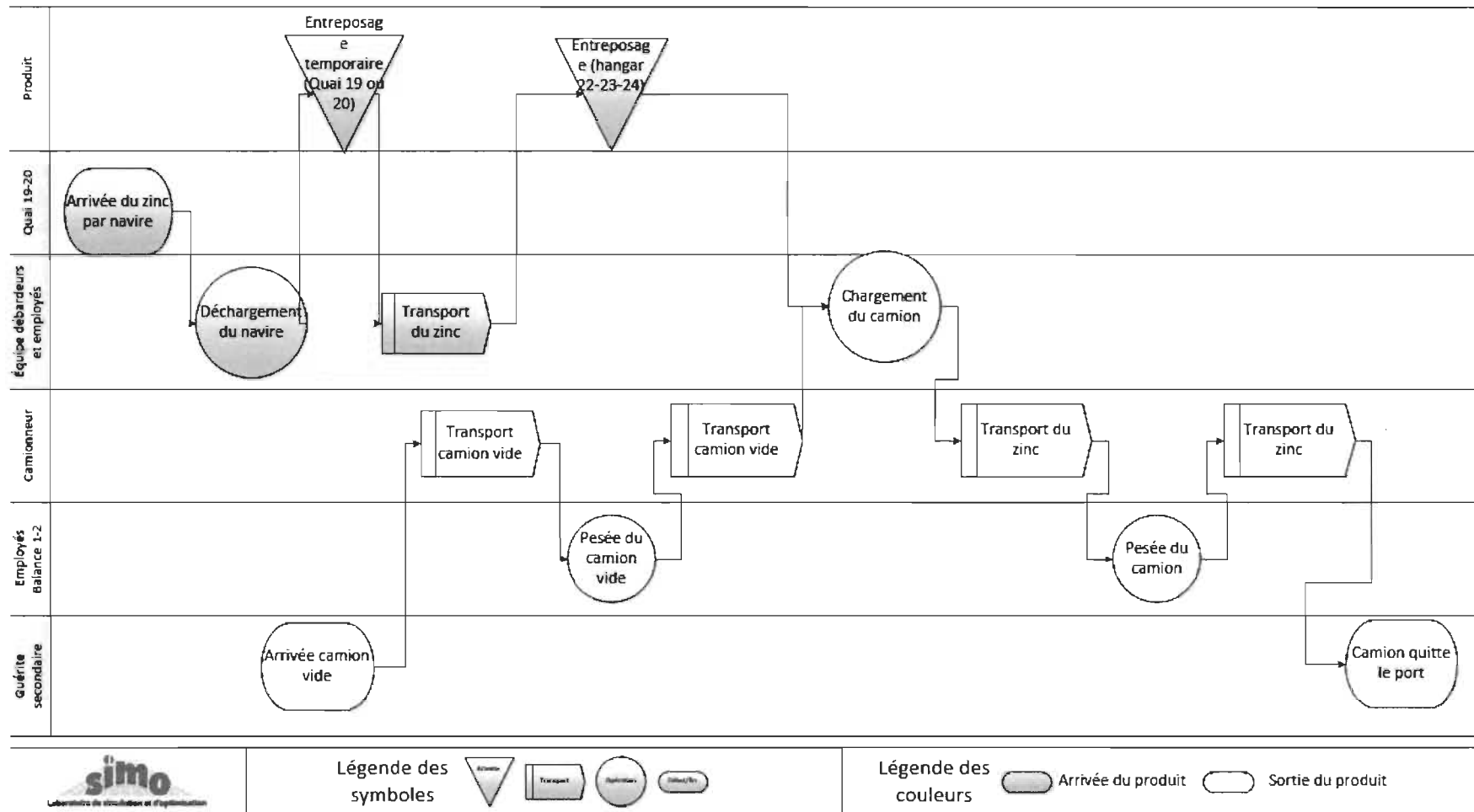
Cartographie PGL



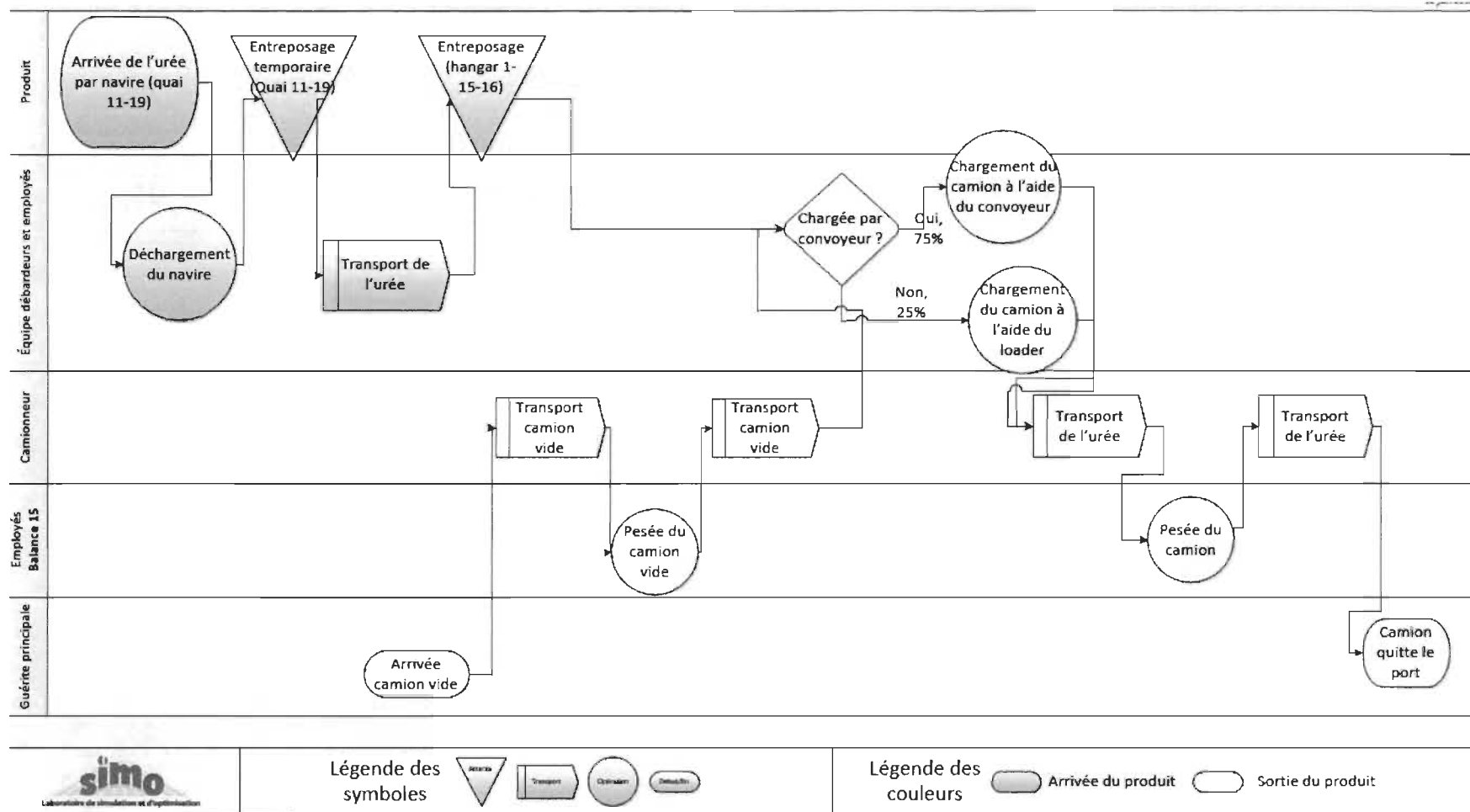
Cartographie PM



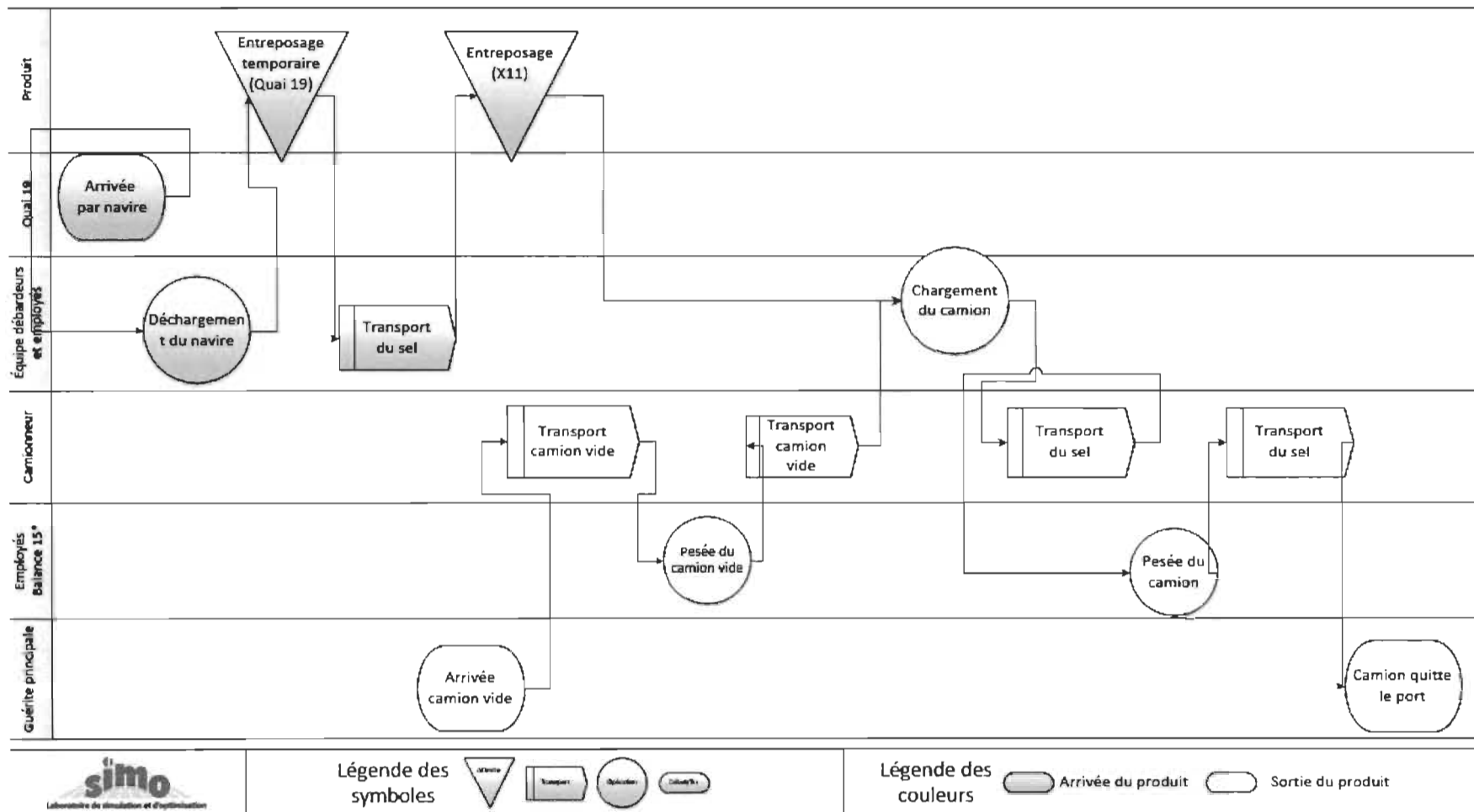
Cartographie PN



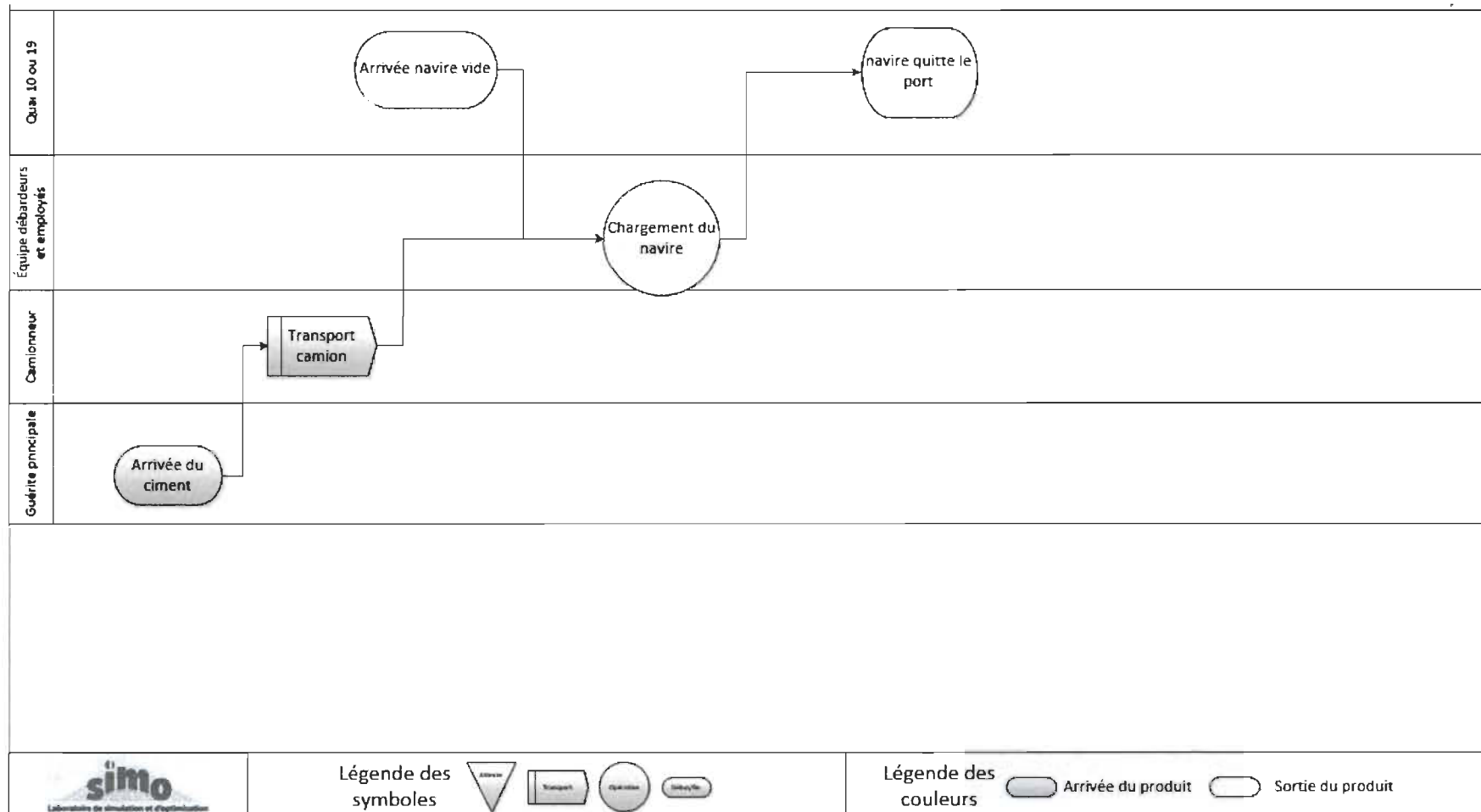
Cartographie PZ



Cartographie PU



Cartographie PSE



Annexe 2
Diagrammes de circulation

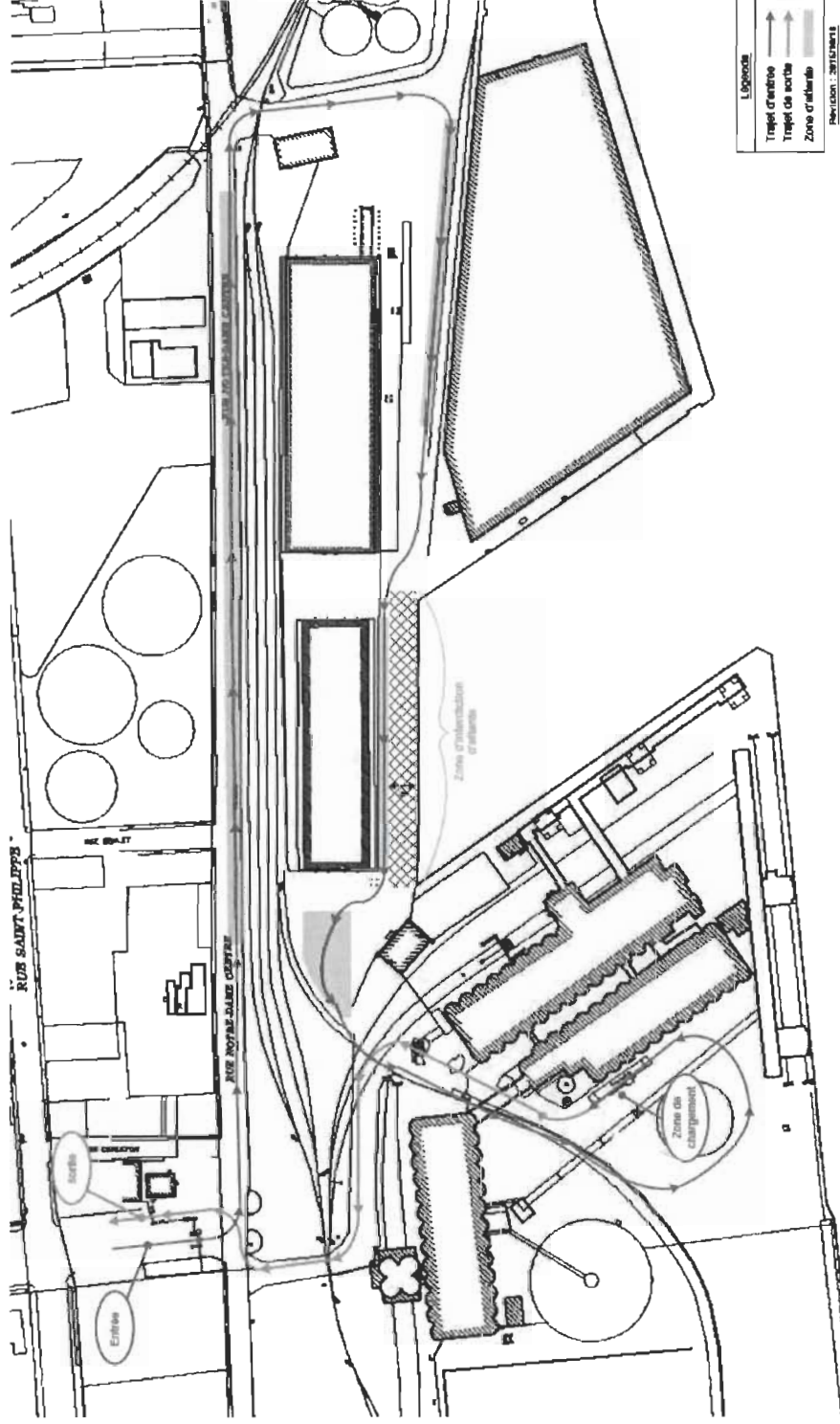


Diagramme de circulation PG2

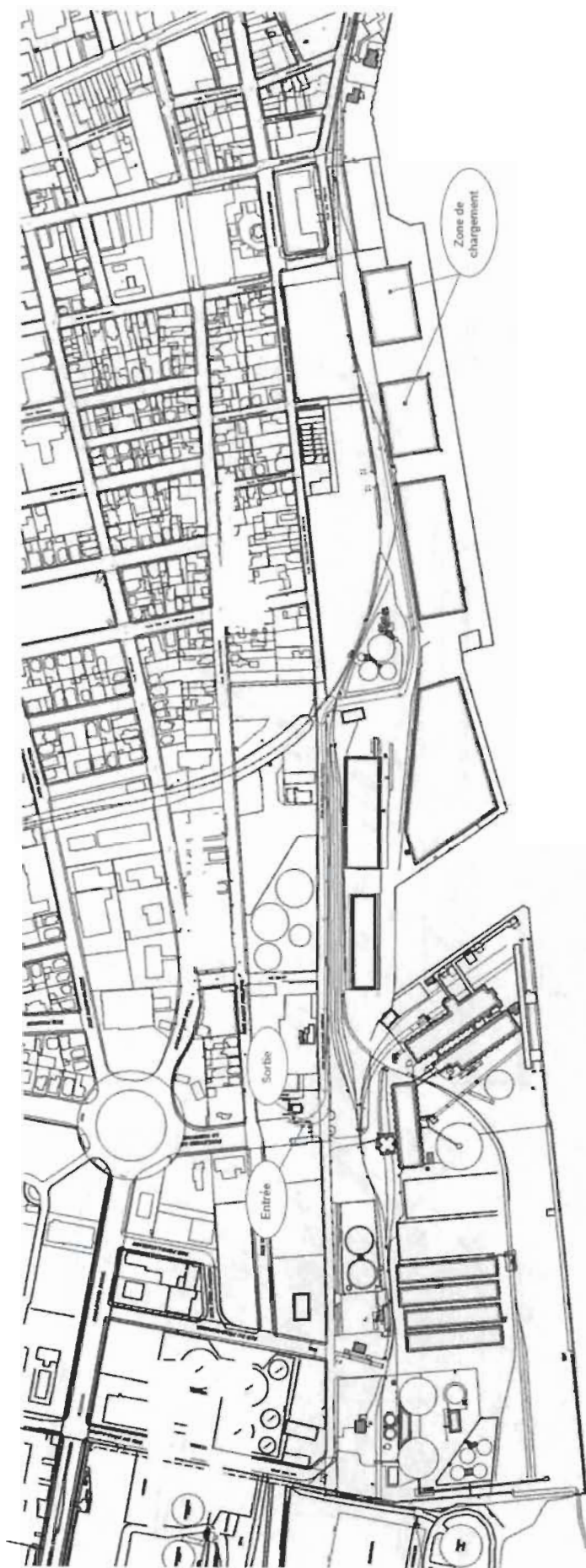


Diagramme de circulation PCA

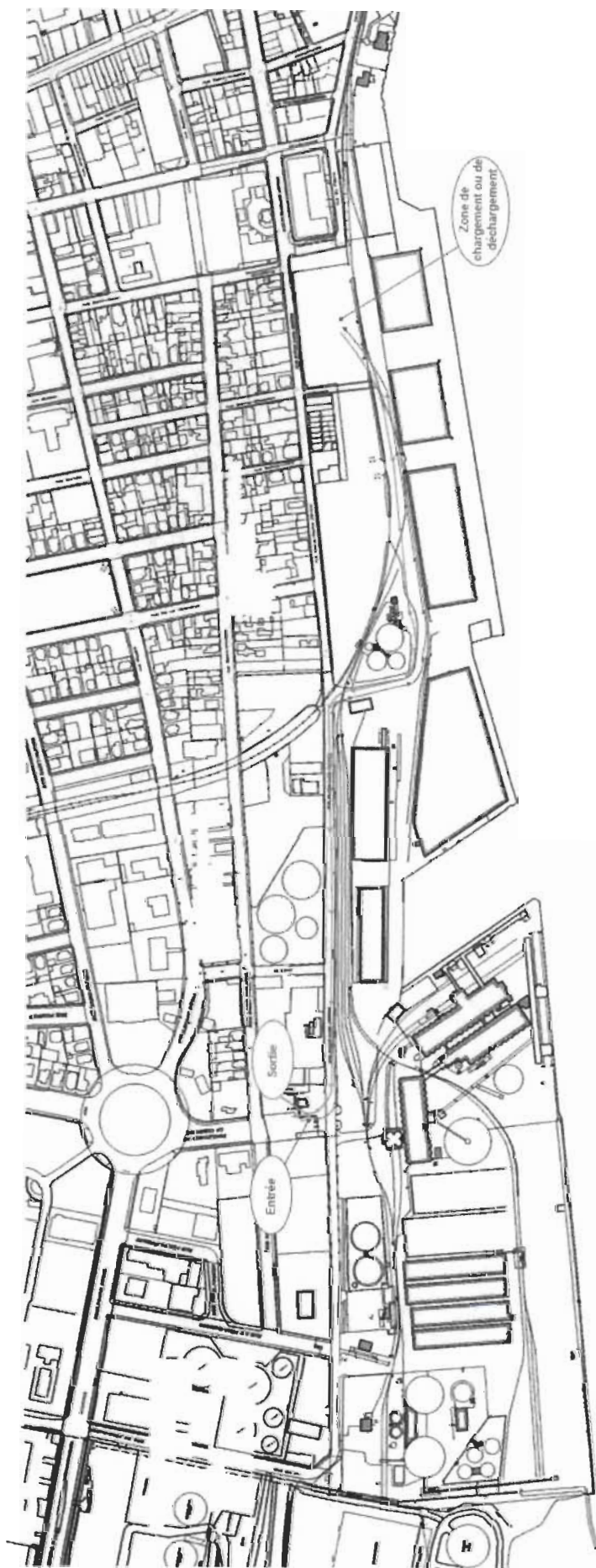


Diagramme de circulation PAC

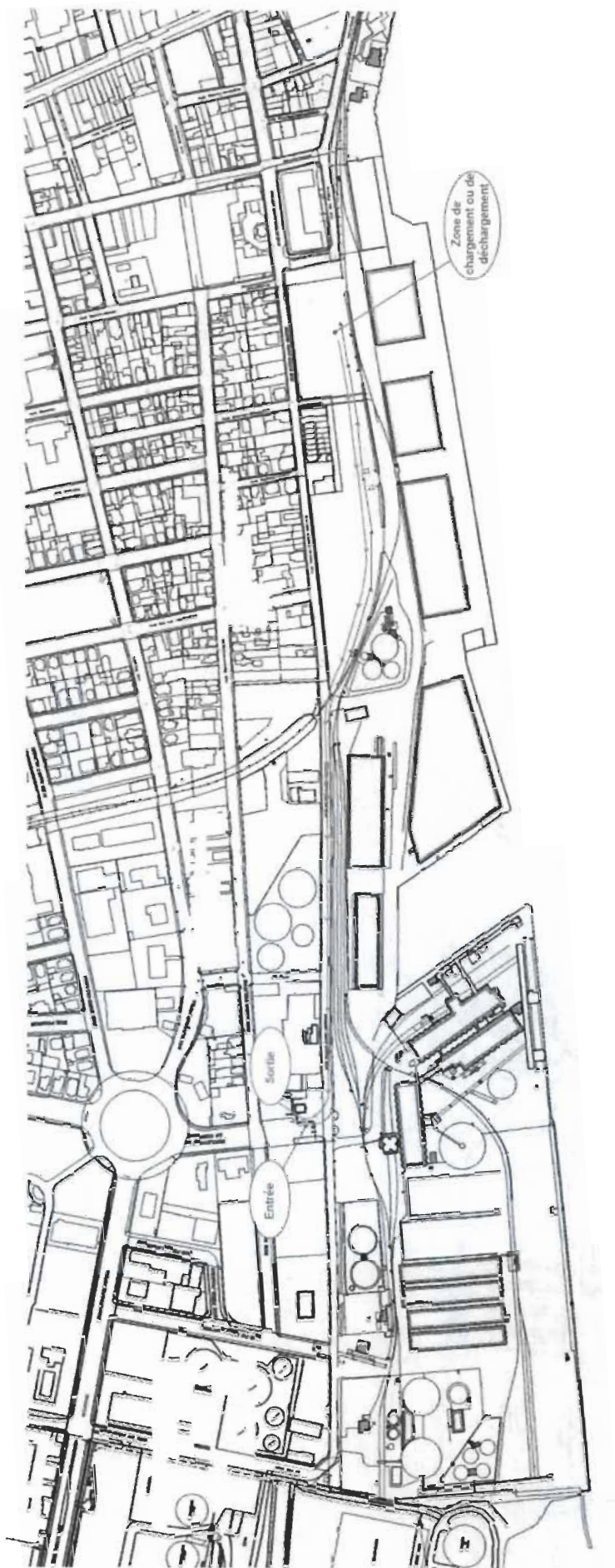


Diagramme de circulation PE

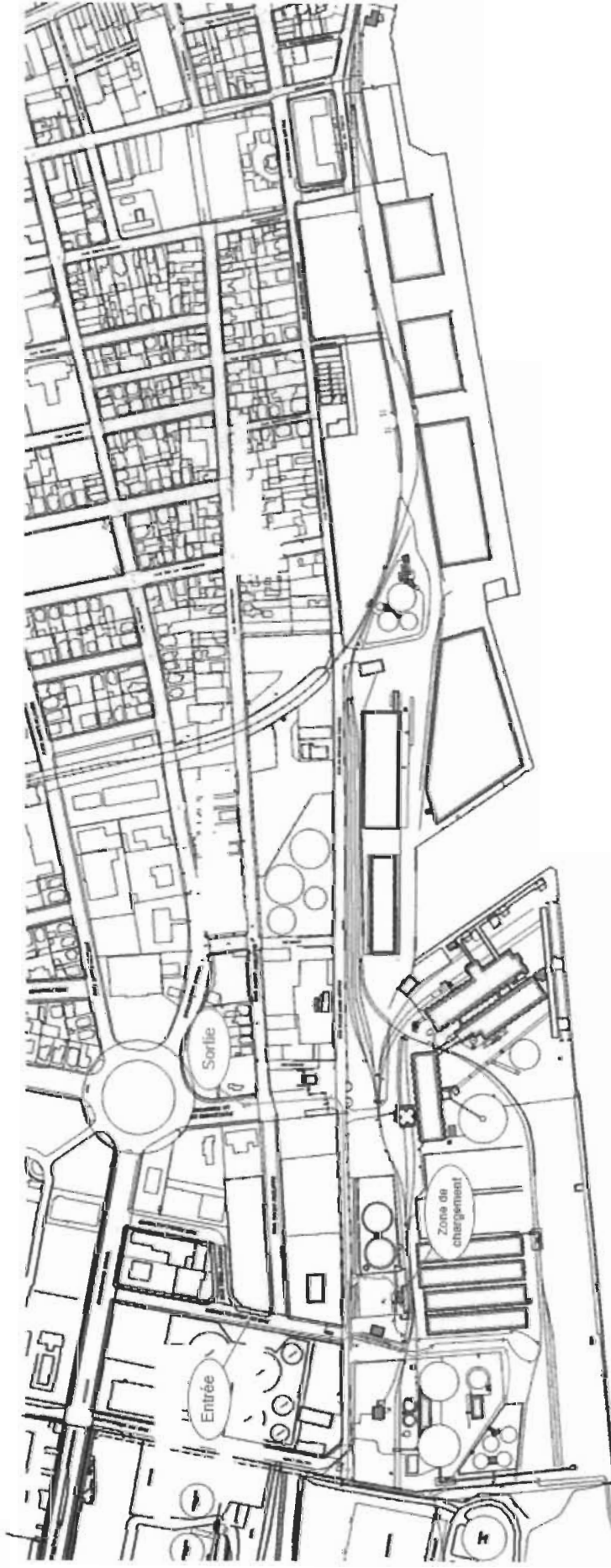


Diagramme de circulation PSC

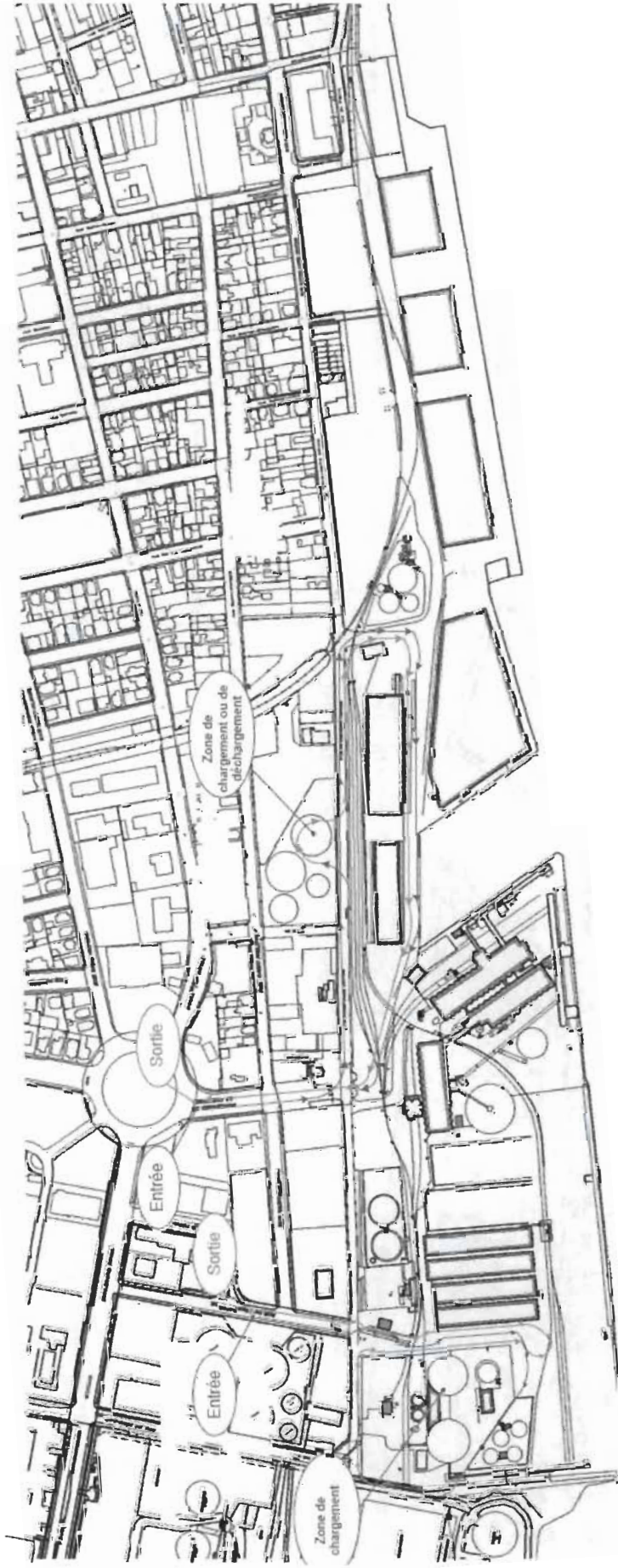


Diagramme de circulation PGL

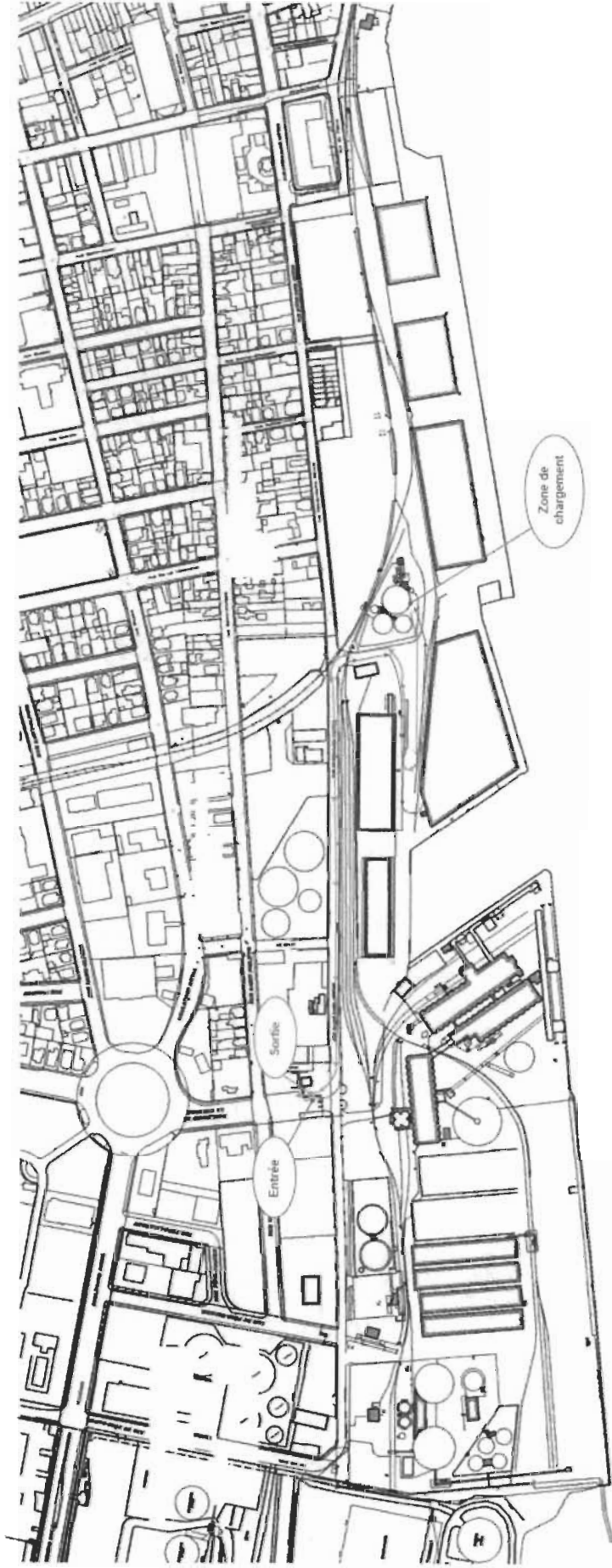


Diagramme de circulation PM

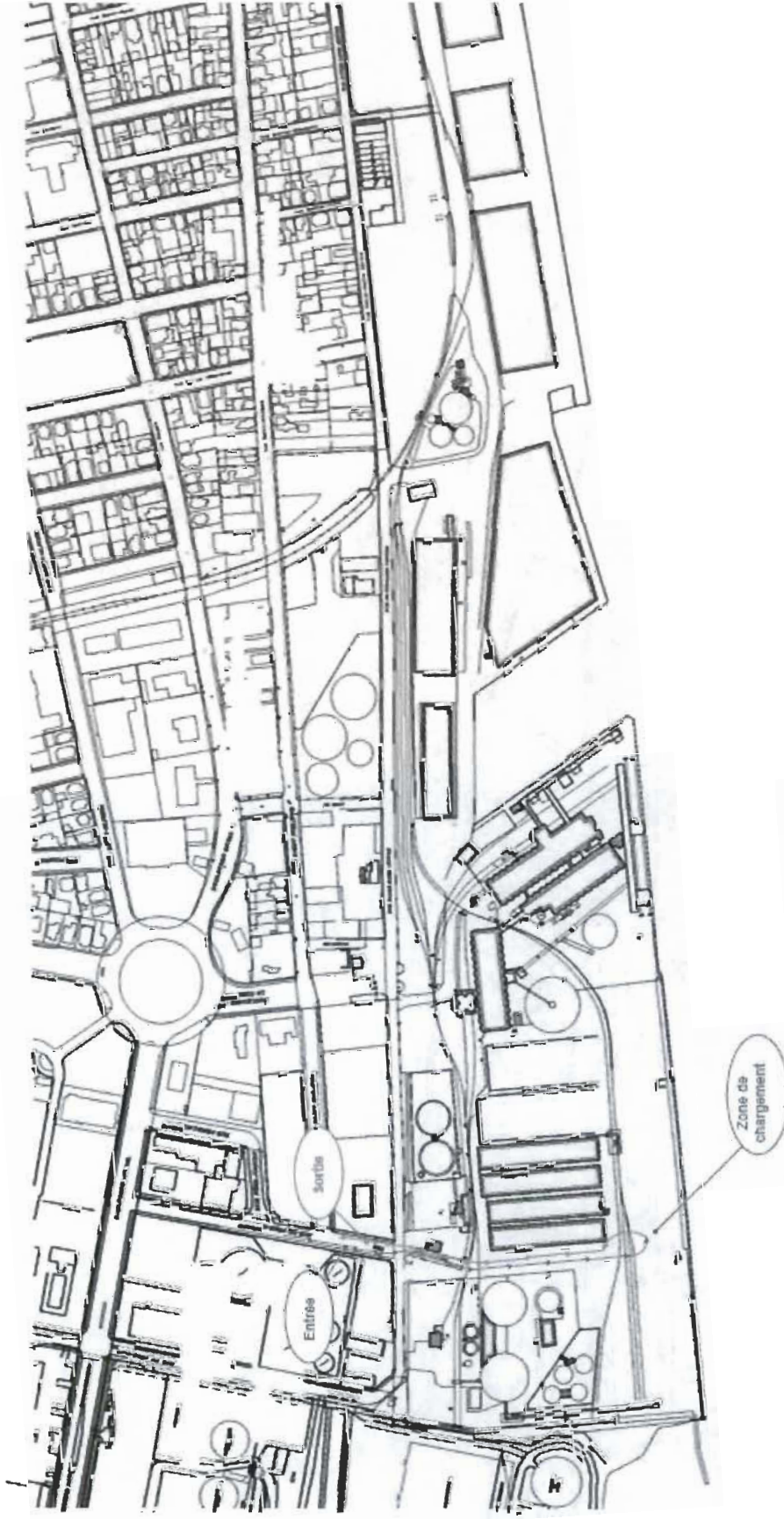


Diagramme de circulation PN

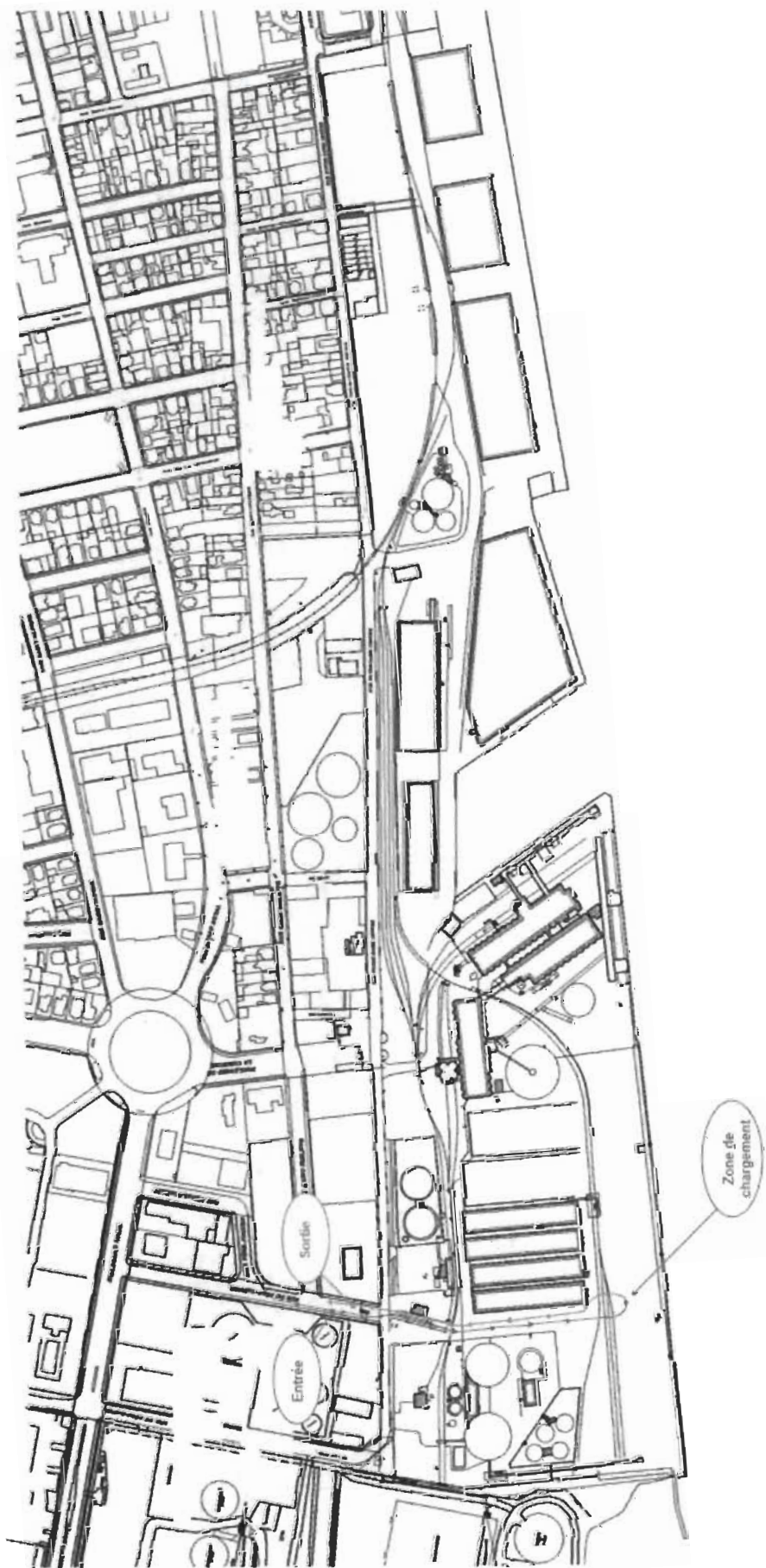


Diagramme de circulation PZ

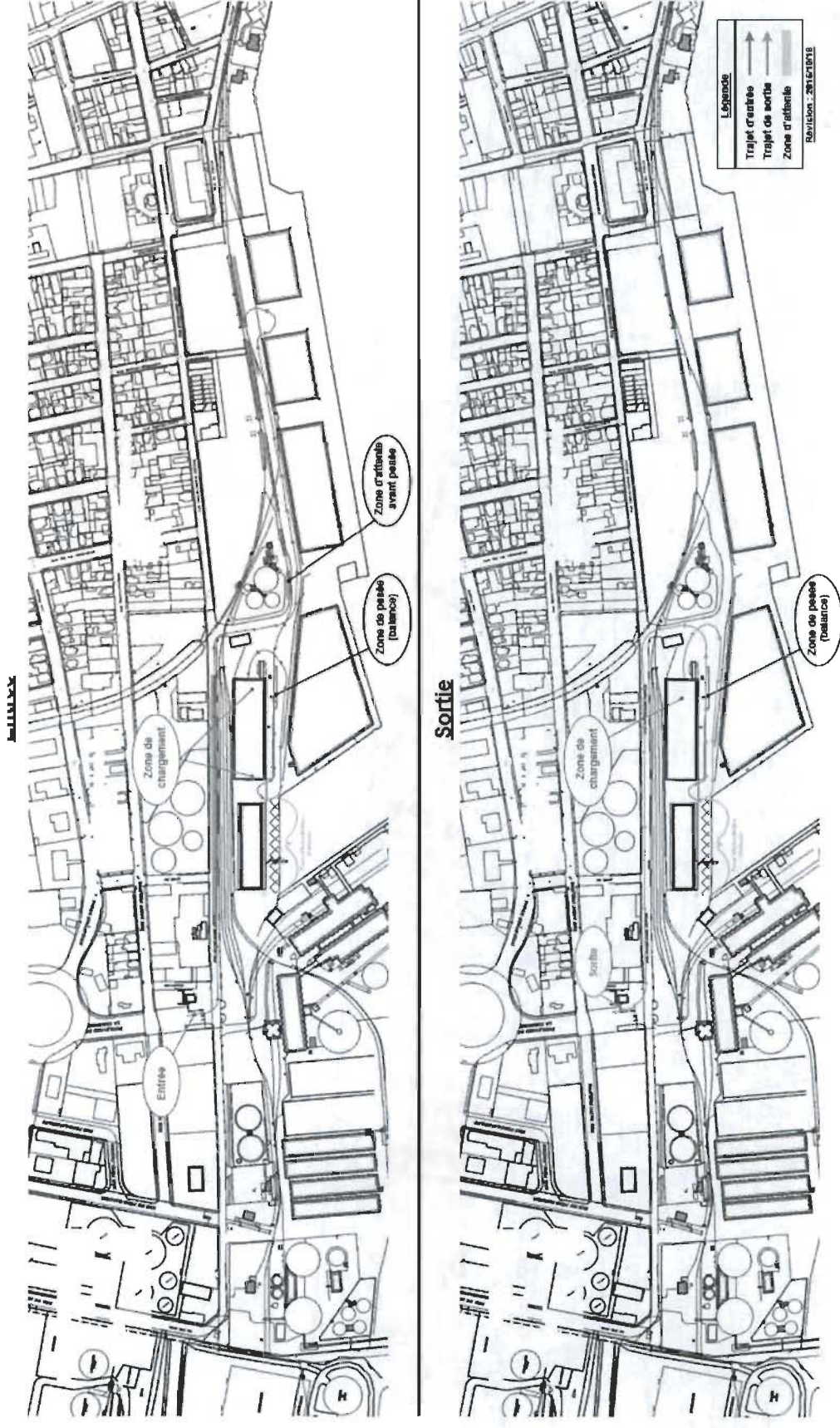


Diagramme de circulation PU

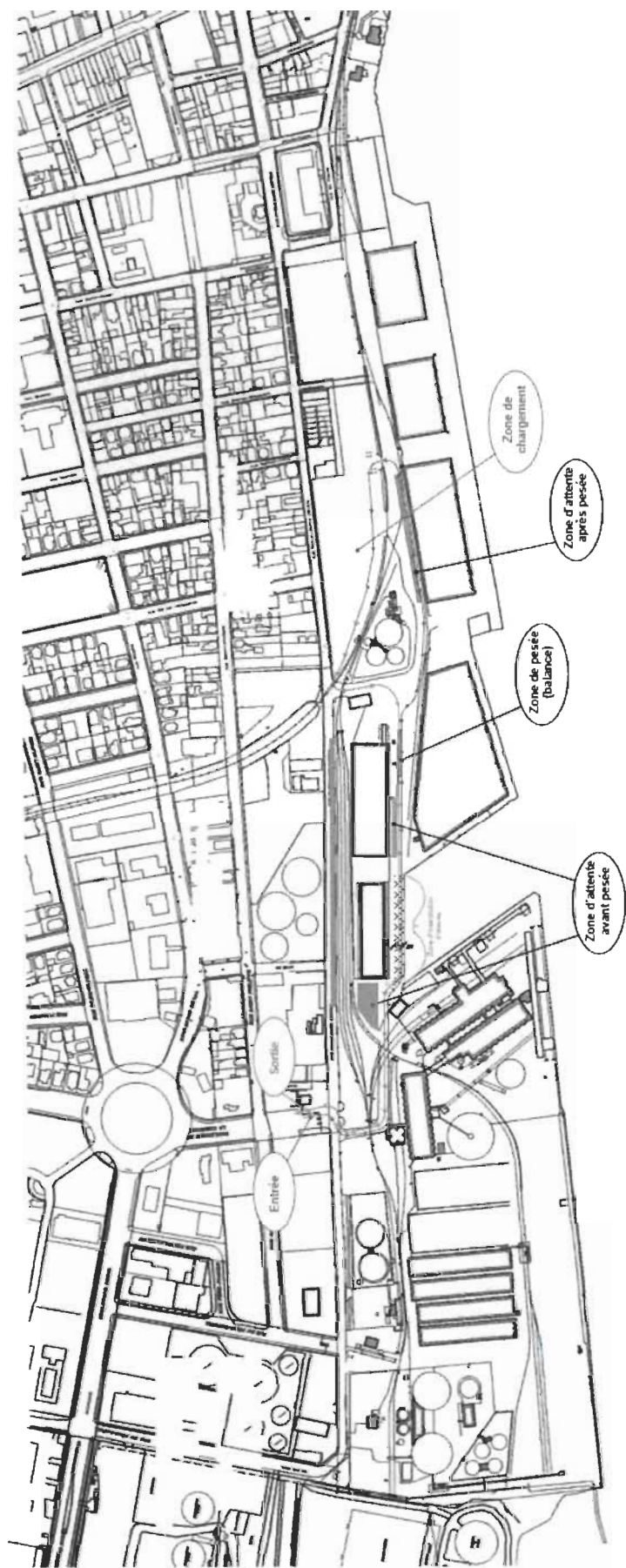


Diagramme de circulation PSE

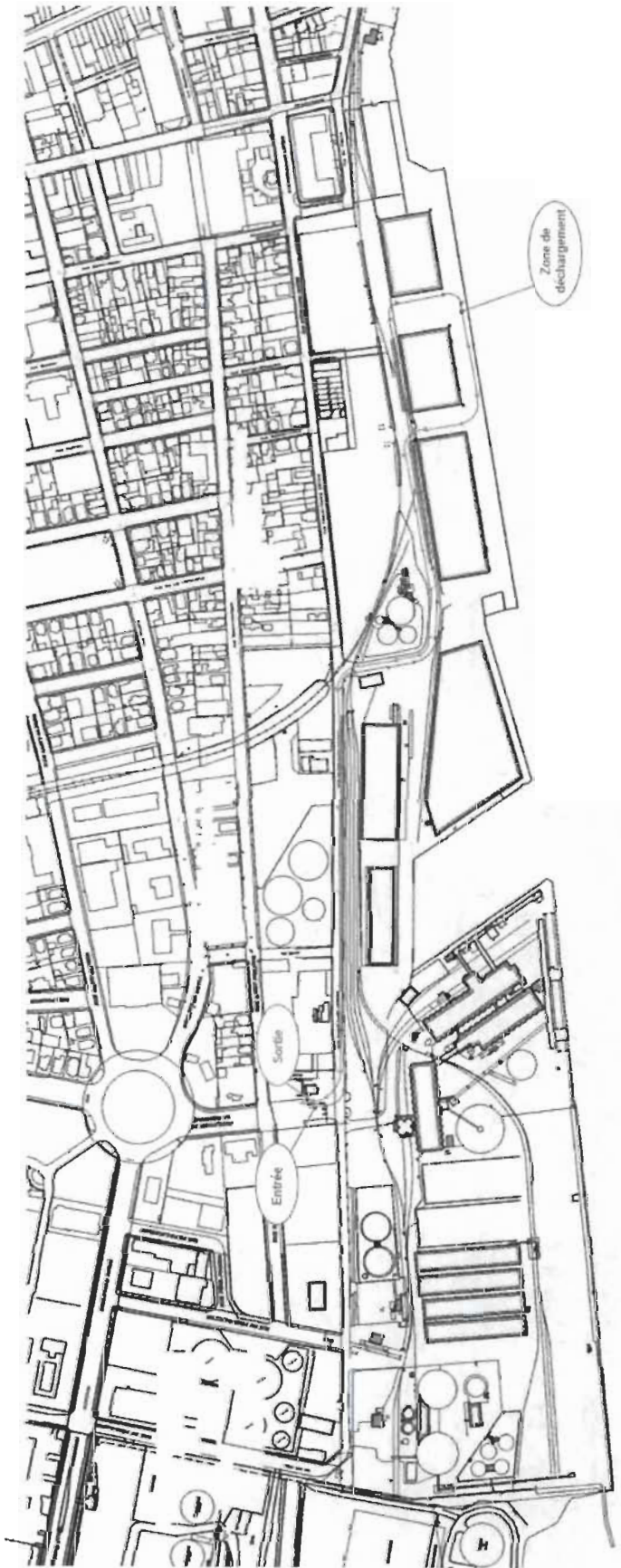


Diagramme de circulation PCI

Annexe 3

Analyse de la variance sur temps de passage total pour PG1

Temps de passage total				DL	1	2	3	3	1	2	2	3	1
				DL	1	2	3	2	3	1	3	1	2
				DL	1	2	3	1	2	3	3	2	3
				DL	1	2	3	1	2	3	3	2	3
A	B	AB	DL										
1	1	1	1	41,96	47,4	45,39	55,53	47,44	44,3	36,71	39,33	36,46	
1	2	2	2	40,38	47,76	35,15	44,32	42,46	37,16	40,21	39,03	40,85	
1	3	3	3	45,49	46,12	35,35	38,59	35,45	34,42	37,17	38,36	32,82	
2	1	2	3	74,84	63,63	46,81	65,75	68,78	43,98	46,89	52,92	52,39	
2	2	3	1	97,97	71,07	65,11	68,26	50,39	80,54	49,43	46,09	54,45	
2	3	1	2	59,31	60,93	60,04	67,22	50,84	57,23	47,76	44,51	48,15	
3	1	3	2	44,02	42,12	39	44,19	45,18	39,12	44,12	46,25	37,28	
3	2	1	3	44,02	42,12	38,92	44,19	45,18	39,12	44,12	46,25	37,28	
3	3	2	1	35,07	39,46	35,53	38,6	36,87	33,41	37,8	34,93	35,32	

Test de Newman-keuls sur temps de passage total pour PG1

Sur facteur A

Moyenne		
1	2	3
40,9485185	59,0848148	40,3507407
Moyenne ordre croissant		
3	1	2
40,3507407	40,9485185	59,0848148
Mse	Dle	
48,8097682	68	
Erreur stadard		
Syj	1,34453308	
Étendues à 5% et DL = 68		
2	3	
2,84	3,4	
Étendue significative		
2	3	
3,81847394	4,57141246	

Comparaisons		
2-3	18,7340741	4,57141246
2-1	18,1362963	3,81847394
1-3	0,59777778	3,81847394

3	1	2
Choix : 1 ou 3		

Sur facteur B

Moyenne		
1	2	3
47,8440741	49,327037	43,212963
Moyenne ordre croissant		
3	1	2
43,212963	47,8440741	49,327037
Mse	Dle	
48,8097682	68	
Erreur stadard		
Syj	1,34453308	
Étendues à 5% et DL = 68		
2	3	
2,84	3,4	
Étendue significative		
2	3	
3,81847394	4,57141246	

Comparaisons			
2-3	6,11407407	4,57141246	*
2-1	6,11407407	3,81847394	*
1-3	4,63111111	3,81847394	*

3	1	2
Choix : 3		

Analyse de la variance sur le taux d'utilisation pour PG1

Taux utilisation			DL	1	2	3	3	1	2	2	3	1	Ratio S/N
			DL	1	2	3	2	3	1	3	2	1	
			D	1	2	3	1	2	3	1	3	2	
			C	1	1	1	2	2	2	3	3	3	
A	B	AB	DL										
1	1	1	1	0,6	0,8	0,65	0,77	0,72	0,5	0,46	0,5	0,51	4,09
1	2	2	2	0,63	0,77	0,54	0,6	0,65	0,54	0,59	0,53	0,6	4,30
1	3	3	3	0,62	0,7	0,53	0,59	0,51	0,43	0,52	0,47	0,33	5,48
2	1	2	3	0,64	0,55	0,49	0,61	0,57	0,4	0,42	0,43	0,48	5,74
2	2	3	1	0,87	0,63	0,59	0,64	0,5	0,63	0,44	0,43	0,49	4,52
2	3	1	2	0,55	0,5	0,43	0,56	0,3	0,34	0,44	0,35	0,38	7,19
3	1	3	2	0,68	0,6	0,64	0,63	0,55	0,57	0,54	0,5	0,5	4,70
3	2	1	3	0,68	0,6	0,64	0,63	0,55	0,56	0,54	0,5	0,5	4,72
3	3	2	1	0,6	0,64	0,66	0,68	0,47	0,38	0,4	0,43	0,42	5,47

Test de Newman-keuls sur le taux d'utilisation pour PG1

Sur facteur A

Moyenne		
1	2	3
0,58	0,50592593	0,55888889
Moyenne ordre croissant		
2	3	1
0,50592593	0,55888889	0,58
Mse	Dle	
0,00483457	68	
Erreur stadard		
Syj	0,01338126	
Étendues à 5% et DL = 68		
2	3	
2,84	3,4	
Étendue significative		
2	3	
0,03800277	0,04549628	

Comparaisons			
1-2	0,07407407	0,04549628	*
1-3	0,02111111	0,03800277	
3-2	0,05296296	0,03800277	*

2	3	1
Choix : 1 ou 3		

Sur facteur B

Moyenne		
1	2	3
0,56703704	0,58777778	0,49
Moyenne ordre croissant		
3	1	2
0,49	0,56703704	0,58777778
Mse	Dle	
0,00483457	68	
Erreur stadard		
Syj	0,01338126	
Étendues à 5% et DL = 68		
2	3	
2,84	3,4	
Étendue significative		
2	3	
0,03800277	0,04549628	

Comparaisons			
1-2	0,09777778	0,04549628	*
1-3	0,09777778	0,03800277	*
3-2	0,07703704	0,03800277	*

3	1	2
Choix : 2		

Annexe 4

Analyse de la variance sur temps de passage total pour PF

Total			C	D	DL	DL	DL	DL	DL	DL	DL	DL	DL	DL	
			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
			1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
			1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
A	B	AB	DL											Ratio S/N	
1	1	1	1	47,28	37,95	35,86	40,63	36,93	39,83	42,63	28,85	27,22	-31,58		
1	2	2	2	47,28	37,95	35,86	40,63	36,93	39,83	42,63	28,85	27,22	-31,58		
1	3	3	3	36,89	34,65	35,75	36,16	32,78	30,89	35,99	30,79	29,14	-30,57		
2	1	2	3	87,36	85,57	47,37	63,54	90,07	41,22	41,13	64,18	35,63	-36,27		
2	2	3	1	87,36	85,57	47,37	47,37	90,07	41,22	41,13	64,18	35,63	-36,06		
2	3	1	2	65,64	103,33	47,49	80,8	47,98	50,11	44,49	56,34	42,49	-35,96		
3	1	3	2	32,6	30,89	32,56	27,08	35,72	30,29	32,19	28,73	29,15	-29,86		
3	2	1	3	32,6	30,89	32,56	27,08	35,72	30,29	32,19	28,73	29,15	-29,86		
3	3	2	1	34,31	30,57	28,03	30,67	27,04	29,09	28,29	26,51	28,47	-29,34		

Test de Newman-keuls sur temps de passage total pour PF

Sur facteur A

Moyenne		
1	2	3
36,2	60,5422222	30,4222222
Moyenne ordre croissant		
3	1	2
30,4222222	36,2	60,5422222
Mse	Dle	
119,392219	68	
Erreur stadard		
Syj	2,10283952	
Étendues à 5% et DL = 68		
2	3	
2,84	3,4	
Étendue significative		
2	3	
5,97206424	7,14965437	

Comparaisons			
2-3	30,12	7,14965437	*
2-1	24,3422222	5,97206424	*
1-3	5,77777778	5,97206424	

3	1	2
Choix : 1 ou 3		

Sur facteur Gestion A/R						
Moyenne			Comparaisons			
1	2	3	2-3	12,6705667	11,3454148	*
54,9733333	54,9733333	42,3027667	2-1	0	9,3340393	
Moyenne ordre croissant			1-3	12,6705667	9,3340393	*
3	1	2				
42,3027667	54,9733333	54,9733333				
Mse	Dle		3	1	2	
88,8932656	18		Choix : 3			
Erreur stadard						
Syj	3,14277417					
Étendues à 5% et DL = 18						
2	3					
2,97	3,61					
Étendue significative						
2	3					
9,3340393	11,3454148					

Analyse de la variance sur le taux d'utilisation pour PF

Taux utilisation			DL	1	2	3	3	1	2	2	3	1	Ratio S/N
			DL	1	2	3	2	3	1	3	1	2	
			D	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
			C	1	1	1	2	2	2	3	3	3	
A	B	AB	DL										
1	1	1	1	0,79	0,71	0,73	0,61	0,66	0,58	0,52	0,49	0,57	3,93
1	2	2	2	0,79	0,71	0,73	0,61	0,66	0,58	0,52	0,49	0,57	3,93
1	3	3	3	0,64	0,5	0,49	0,58	0,48	0,47	0,54	0,4	0,39	5,94
2	1	2	3	0,72	0,74	0,71	0,64	0,63	0,62	0,49	0,51	0,43	4,17
2	2	3	1	0,72	0,74	0,71	0,71	0,63	0,62	0,49	0,51	0,43	4,05
2	3	1	2	0,77	0,7	0,51	0,58	0,54	0,47	0,5	0,44	0,32	5,17
3	1	3	2	0,7	0,61	0,52	0,55	0,48	0,48	0,45	0,37	0,36	5,80
3	2	1	3	0,7	0,61	0,52	0,55	0,48	0,48	0,45	0,37	0,36	5,80
3	3	2	1	0,57	0,51	0,29	0,54	0,36	0,34	0,46	0,33	0,21	7,58

Test de Newman-keuls sur le taux d'utilisation pour PF

Sur facteur A

Moyenne		
1	2	3
0,58555556	0,58814815	0,46851852
Moyenne ordre croissant		
3	1	2
0,46851852	0,58555556	0,58814815
Mse	Dle	
0,00268943	68	
Erreur stadard		
Syj	0,00998041	
Étendues à 5% et DL = 68		
2	3	
2,84	3,4	
Étendue significative		
2	3	
0,02834437	0,03393341	

Comparaisons			
2-3	0,11962963	0,03393341	*
2-1	0,00259259	0,02834437	
1-3	0,11703704	0,02834437	*

3	1	2
Choix : 1 ou 2		

Sur facteur B

Moyenne		
1	2	3
0,58037037	0,58296296	0,47888889
Moyenne ordre croissant		
3	1	2
0,47888889	0,58037037	0,58296296
Mse	Dle	
0,00268943	68	
Erreur stadard		
Syj	0,00998041	
Étendues à 5% et DL = 68		
2	3	
2,84	3,4	
Étendue significative		
2	3	
0,02834437	0,03393341	

Comparaisons			
2-3	0,10407407	0,03393341	*
2-1	0,00259259	0,02834437	
1-3	0,10148148	0,02834437	*

3	1	2
Choix : 1 ou 2		